

Université du Québec
INRS - Eau Terre Environnement

**APPORT DE LA MODÉLISATION HYDROLOGIQUE
DISTRIBUÉE À LA GESTION INTÉGRÉE PAR BASSIN
VERSANT DES RESSOURCES EN EAU**

Par
Hong-Trang NGUYEN
Thèse présentée pour l'obtention du grade de
Philosophia doctor (Ph.D.) en sciences de l'eau

Jury d'évaluation

Examineur externe	Van-Thanh-Van Nguyen Université McGill
Examineur externe	Georges Vachaud Université Joseph Fourier - CNRS
Examineur interne	Jean-Pierre Fortin Université du Québec, INRS – ETE
Directeur de recherche	Jean-Pierre Villeneuve Université du Québec, INRS – ETE
Codirectrice de recherche	Sophie Duchesne Université du Québec, INRS – ETE

Février 2012

Je dédie cette thèse à
mes parents et à mes enfants

REMERCIEMENTS

Je remercie sincèrement du fond de mon cœur mon directeur de thèse Jean-Pierre Villeneuve et ma codirectrice Sophie Duchesne pour leurs conseils précieux, pour leur générosité et pour leur compréhension. Merci beaucoup pour le temps accordé et pour votre patience. Vous m'avez aidée à puiser dans mes forces et mes moyens.

J'exprime ma gratitude envers Jean-Pierre Fortin pour ses enseignements en simulation hydrologique, particulièrement au niveau du modèle HYDROTEL et aussi pour son aide très précieuse tout au long de cette thèse. J'ai énormément profité de ses critiques toujours très pertinentes.

Je remercie nos collaborateurs vietnamiens de l'Académie des Sciences et des Technologies du Vietnam, plus particulièrement Ta Dang Toan, qui nous ont fourni les données nécessaires pour les travaux de la thèse.

Je tiens également à remercier Michel Nomessi Kokutse pour m'avoir aidée dans la correction de la thèse.

Mes remerciements vont aussi au personnel de support à la recherche : Julie Fortin, Alain Garon, Sébastien Tremblay, Alain Royer et l'équipe du service informatique, pour leur aide indispensable.

J'exprime ma gratitude envers Sinh Le Quoc, qui a établi le lien académique entre le Vietnam et le Canada et qui m'a constamment encouragée dans mes études.

Je suis touchée par l'aide et le dévouement de Suzanne Dussault tout au long de mon doctorat du côté administratif.

J'aimerais offrir mes remerciements à mes collègues Kim Huong Hoang et Phu Duc Nguyen pour leur contribution et discussions relatives à mes travaux.

Je témoigne ma reconnaissance à mes amis, mes collègues et le personnel de l'INRS-ETE qui m'ont toujours encouragée.

Je remercie l'INRS-ETE et l'ACDI pour leur soutien financier.

Finalement, je tiens à exprimer toute ma gratitude aux membres de ma famille pour leur amour et leur soutien inconditionnels.



RÉSUMÉ

La détérioration des ressources en eau et l'augmentation des conflits entre les divers consommateurs de l'eau dans le processus rapide de l'urbanisation et de l'industrialisation du Sud-Est asiatique (SEA) amène ces pays, comme le Vietnam, à adopter la Gestion Intégrée des ressources en Eau par Bassin Versant (GIEBV). Cette approche de GIEBV a été appliquée pour la première fois au Vietnam sur un bassin versant entier (bassin versant de la rivière Cau) dans le cadre d'un projet pilote avec l'outil GIBSI – un système d'aide à la décision pour la GIEBV (développé au Québec, Canada). Cette thèse vient en appui à ce projet en étudiant l'applicabilité du modèle hydrologique distribué HYDROTEL, un important module de GIBSI, à de nouvelles conditions de climat (tropical de mousson) dans ce bassin, avec des données restreintes.

Une analyse de sensibilité a été réalisée et a permis l'identification des paramètres pertinents dans le contexte climatique (tropical type mousson) du bassin versant de la rivière Cau. Cette analyse a également permis de cibler des campagnes de collecte de données pour faciliter l'application d'HYDROTEL au bassin de la rivière Cau, tout en diminuant le temps requis pour l'étalonnage. Une gamme d'échelles spatiales adéquates nécessaire pour la discrétisation en unités de calcul, en tenant compte des données disponibles, du temps de simulation requis et de la précision désirée pour les activités de la GIEBV est proposée pour ce bassin. Par ailleurs, la quantité et la qualité des données d'observation du réseau nécessaires pour mettre en place une GIEBV efficace sur la rivière Cau ont également été évaluées et recommandées.

La thèse a démontré que, même sur un bassin versant où les données disponibles sont limitées en quantité et en qualité, ce modèle peut apporter des informations utiles pour la mise en place de la GIEBV. L'application avec succès du modèle hydrologique distribué HYDROTEL dans une région tropicale de mousson avec des données restreintes et la formulation de recommandations utiles pour la mise en place de la GIEBV représentent l'importante contribution apportée par cette thèse qui vise à faire avancer la démarche de la GIEBV au SEA.



ABSTRACT

Deterioration of water resources and increase of conflicts between water users during fast urbanization and industrialization processes in South East Asia (SEA) urge countries in this region like Vietnam to adopt an approach of integrated water resources management (IWRM) for river basin. In Vietnam, this approach is applied for the first time to a whole watershed (Cau's river basin) in the framework of a pilot study with the GIBSI software – a decision support system for IWRM (developed in Quebec, Canada). The aim of this thesis is to examine applicability of HYDROTEL, a distributed hydrological model which is an important module of GIBSI, in new climatic conditions of this watershed (tropical monsoon) with limited input data.

In this research, a sensitivity analysis has been carried out to identify the model's sensitive parameters for Cau's river basin watershed. The analysis helps to prioritize a list of data to be collected and to facilitate the calibration process by focusing on highly influenced and sensitive parameters. Several options of computing unit size have been tried by subdividing the studied river basin. These trials help to find out an appropriate size of calculation unit to be used in modelling the river basin of which the model can produce desired accuracy of results in short simulation time. Furthermore, impacts of data quantity and quality on simulation results have been studied. The findings help to propose improvements on hydro-meteorological observation network, on data collection and processing in the view of an efficient IWRM implementation.

The thesis shows that in the case of a lack of input data, the distributed hydrological model HYDROTEL could still bring useful information to support IWRM. Successful application of HYDROTEL to a new climate region (tropical monsoon) and recommendations to facilitate input data preparation and model calibration are main contributions of this thesis. Results of this thesis are a contribution to improve IWRM practices not only in Vietnam but also in SEA countries.



TABLE DES MATIÈRES

1	Introduction générale	1
1.1	Contexte de la thèse	1
1.2	Objectifs	2
1.3	Plan de la thèse	4
2	Revue de littérature	5
2.1	Gestion intégrée des ressources en eau (GIRE)	5
2.1.1	Approche et définition	5
2.1.2	Les scientifiques et la GIRE	6
2.2	Gestion intégrée de l'eau par bassin versant (GIEBV)	6
2.2.1	Approche	6
2.2.2	Défis	7
2.2.3	Données et outils	9
2.2.4	Applications dans les pays du Sud-Est Asiatique	11
2.3	Modèles hydrologiques	12
2.4	Étalonnage, validation et analyse de sensibilité des modèles	15
2.4.1	Étalonnage	15
2.4.2	Validation	18
2.4.3	Analyse de sensibilité (AS)	19
2.5	Échelle spatiale	20
2.5.1	Concepts de découpage d'un bassin versant	22
2.5.2	Impact de l'échelle spatiale	23
2.5.3	Découpage spatial pour la GIEBV	24
2.6	Effet des données météorologiques	24
3	Cas d'application, outils et données	27

3.1	Bassin versant de la rivière Cau	27
3.2	Modèle HYDROTEL.....	30
3.3	Données.....	31
3.3.1	Données physiographiques	32
3.3.2	Données hydrométriques.....	36
3.3.3	Données météorologiques.....	37
3.3.4	Synthèse.....	38
3.4	Application du modèle HYDROTEL	39
3.4.1	Choix des sous-modèles	39
3.4.2	Choix des paramètres pour l'étalonnage	39
3.4.3	Choix des indicateurs de performance	40
4	Analyse de sensibilité.....	45
4.1	Introduction	45
4.2	Étalonnage préliminaire	45
4.2.1	Discrétisation du bassin versant à l'étude	45
4.2.2	Périodes d'étalonnage et de validation.....	47
4.2.3	Résultats.....	48
4.2.4	Synthèse.....	51
4.3	Méthodologie d'analyse de sensibilité	52
4.4	Résultats d'analyse de sensibilité des paramètres spéciaux.....	53
4.4.1	Coefficient additif d'optimisation de la classe du sol (CAOC).....	53
4.4.2	Indice foliaire.....	55
4.4.3	Profondeur des racines.....	58
4.5	Résultats de l'analyse de sensibilité des 11 autres paramètres	61
4.5.1	-50 % de variation.....	61
4.5.2	-25 % de variation.....	62

4.5.3	25 % de variation	63
4.5.4	50 % de variation	64
4.6	Synthèse	67
5	Choix dU découpage spatial	69
5.1	Introduction	69
5.2	Méthodologie	69
5.3	Impacts de la taille avec les paramètres du projet 235 UHRH	71
5.3.1	Période 1997-2001	71
5.3.2	Période de pluie.....	74
5.3.3	Période sèche.....	75
5.4	Impacts de la taille des UHRH avec les paramètres du projet 2 052 UHRH	77
5.4.1	Période 1997-2001	77
5.4.2	Période de pluies	79
5.4.3	Période sèche.....	79
5.5	Synthèse	81
6	Impact du découpage spatial sur la sensibilité des paramètres.....	83
6.1	Introduction	83
6.2	Étalonnage du modèle avec le projet 1 593 UHRH	84
6.3	Paramètres spéciaux	85
6.3.1	Coefficient additif d'optimisation de la classe de sol (CAOC).....	85
6.3.2	Indice foliaire.....	86
6.3.3	Profondeur racinaire	88
6.4	Les 11 autres paramètres	90
6.4.1	Variation de -50 % des valeurs de référence.....	90
6.4.2	Variation de -25 % des valeurs de référence.....	92
6.4.3	Variation de 25 % des valeurs de référence.....	94

6.4.4	Variation de 50 % des valeurs de référence.....	96
6.5	Synthèse.....	98
7	Capacité de reconstruction du régime hydrologique dans le cas de données restreintes .	101
7.1	Introduction.....	101
7.2	Capacité de reconstruction du régime hydrologique d'une station en amont du bassin 102	
7.2.1	Méthodologie.....	102
7.2.2	Résultats.....	104
7.3	Capacité de reconstruction du régime hydrologique à partir données météorologiques restreintes.....	106
7.3.1	Méthodologie.....	106
7.3.2	Impacts du bruit dans les données de température et de pluie.....	108
7.3.3	Impacts du manque de stations sur la qualité de la simulation.....	112
7.4	Synthèse.....	119
8	Conclusion.....	123
9	Références bibliographiques.....	127
10	Annexes.....	137

LISTE DES FIGURES

Figure 3-1 : Bassin versant de la rivière Cau (Tiré de : Asian Development Bank, 2006).	28
Figure 3-2 : Stations hydrométriques.	37
Figure 4-1 : Subdivision du bassin en 235 UHRH.	46
Figure 4-2 : Débits moyens annuels au cours des dix années.	47
Figure 4-3 : Résultats de l'étalonnage du modèle pour l'année 1997, projet 235 UHRH.	49
Figure 4-4 : Résultats de la validation du modèle pour l'année 2002 – Projet 235 UHRH.	51
Figure 4-5 : Variation des indicateurs de performance en fonction des changements du coefficient additif d'optimisation de la classe du sol.	54
Figure 4-6 : Variation du Nash-Sutcliffe (NS) en fonction des changements de l'indice foliaire.	56
Figure 4-7 : Variation du RCEQM en fonction des changements de l'indice foliaire.	57
Figure 4-8 : Variation de l'ERSVET en fonction des changements de l'indice foliaire.	58
Figure 4-9 : Variation du NS en fonction des changements de la profondeur racinaire.	59
Figure 4-10 : Variations de la RCEQM en fonction des changements de la profondeur racinaire.	60
Figure 4-11 : Variations de l'ERSVET en fonction des changements de profondeur racinaire.	61
Figure 4-12 : Impact de la variation de -50 % des 11 paramètres sur les trois indicateurs de performance.	62
Figure 4-13 : Impact de la variation de -25 % des 11 paramètres sur les trois indicateurs de performance.	63
Figure 4-14 : Impact de la variation de 25 % des 11 paramètres sur les trois indicateurs de performance.	64
Figure 4-15 : Impact de la variation de 50 % des 11 paramètres sur les trois indicateurs de performance.	65
Figure 5-1 : Niveaux plus grossier (a) et moins grossier (b) de découpage en UHRH.	70
Figure 5-2 : Débits observés et simulés - Six scénarios d'UHRH - 2001 (scénario de référence 235 UHRH).	72

Figure 5-3 : Débits observés et simulés - trois scénarios UHRH – saison de pluie – 1999 (scénario de référence 235 UHRH).....	75
Figure 5-4 : Débits observés et simulés - trois scénarios UHRH – saison sèche 2000-2001 (scénario de référence 235 UHRH).....	76
Figure 5-5 : Débits observés et simulés - six scénarios UHRH – 2001 (scénario de référence : 2 052 UHRH).	77
Figure 5-6 : Débits observés et simulés - trois scénarios UHRH - 1999 (scénario de référence 2 052 UHRH).	79
Figure 5-7 : Débits observés et simulés- trois scénarios UHRH – saison sèche : 2000-2001 (scénario de référence 2 052 UHRH).....	80
Figure 6-1 : Comparaison de la variation des indicateurs de performance pour le coefficient additif d'optimisation de la classe du sol - deux projets d'UHRH.....	86
Figure 6-2 : Comparaison de la variation des indicateurs pour l'indice foliaire - deux projets d'UHRH.....	87
Figure 6-3 : Comparaison de la variation des indicateurs pour la profondeur racinaire- deux projets d'UHRH.....	89
Figure 6-4 : Impacts des variations de -50 % autour des valeurs de référence de 11 paramètres sur les trois indicateurs de performance - deux projets d'UHRH.....	91
Figure 6-5 : Impacts des variations de -25 % autour des valeurs de référence des 11 paramètres sur les trois indicateurs de performance - deux projets d'UHRH.....	93
Figure 6-6 : Impacts des variations de 25 % autour des valeurs de référence des 11 paramètres sur les trois indicateurs de performance - deux projets d'UHRH.....	95
Figure 6-7 : Impacts des variations de 50 % autour des valeurs de référence des 11 paramètres sur les trois indicateurs de performance - deux projets d'UHRH.....	97
Figure 7-1 : Position et bassins de drainage de station hydrométrique Thac Rieng (en amont).....	103
Figure 7-2 : Résultats de simulation avec deux stations de débit Gia Bay (en aval) et Thac Rieng (en amont) – année 1999.	106

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3-1 : Description des données physiographiques utilisées.....	32
Tableau 3-2 : Algorithmes sélectionnés pour les simulations HYDROTEL.....	39
Tableau 3-3 : Paramètres d'étalonnage du modèle HYDROTEL.....	41
Tableau 3-4 : Indicateurs de performance des simulations.....	43
Tableau 4-1 : Résultats de l'étalonnage préliminaire - Projet 235 UHRH.....	50
Tableau 4-2 : Grille d'appréciation de l'impact de la variation des paramètres sur l'indicateur...53	
Tableau 4-3 : Niveaux de sensibilité des 11 paramètres dans l'ordre décroissant.....	66
Tableau 5-1 : Nombre et surfaces moyennes des UHRH pour différents niveaux de découpage.....	70
Tableau 5-2 : Indicateurs de performance pour les six scénarios d'UHRH, 1997- 2001.....	73
Tableau 5-3 : Classement des trois scénarios UHRH selon l'application de deux jeux de paramètres.....	81
Tableau 6-1 : Résultats d'étalonnage et de validation du modèle avec les deux projets.....	84
Tableau 6-2 : Comparaison des niveaux sensibilité des 11 paramètres – deux projets d'UHRH.....	98
Tableau 7-1 : Résultats de simulation avec les deux stations hydrométriques.....	104
Tableau 7-2 : Grille de jugement des impacts du niveau du bruit.....	108
Tableau 7-3 : Impact du bruit dans les données de température sur les indicateurs.....	108
Tableau 7-4 : Impact du bruit dans les données de pluie sur les indicateurs.....	110
Tableau 7-5 : Impact de la combinaison de bruits sur les indicateurs.....	111
Tableau 7-6 : Impact d'une station météorologique manquante sur les indicateurs de référence.....	113
Tableau 7-7 : Impact d'une station pluviométrique manquante sur les indicateurs de référence.....	114

Tableau 7-8 : Impacts du manque de deux stations de plus faible importance sur les indicateurs de référence.....	116
Tableau 7-9 : Impacts du manque de deux stations plus fortes en importance sur trois indicateurs de référence.....	117
Tableau 7-10 : Impact de manque de la température au sein d'une station météorologique. ...	118

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES

BV3C :	Bilan vertical en trois couches
CAOC :	Coefficient additif d'optimisation de la classe du sol
CDR :	Coefficient de récession
DES :	Coefficient d'extinction
ERSVET :	Erreur relative sur volume d'écoulement total
ETP :	Coefficient multiplicatif d'optimisation de l'évapotranspiration potentielle
GIEBV :	Gestion intégrée de l'eau par bassin versant
GIRE :	Gestion intégrée des ressources en eau
GVT :	Gradient vertical des températures
HGM :	Hydrogramme géomorphologique de référence
LR-HGM :	Lame de référence pour l'hydrogramme géomorphologique de référence
MNA :	Modèle numérique d'altitude
NS :	Indicateur Nash-Sutcliffe
RCEQM :	Indicateur Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne
RMAM :	Coefficient de rugosité de Manning des autres milieux
RME :	Coefficient de rugosité de Manning de l'eau
RMMF :	Coefficient de rugosité de Manning des milieux forestiers
SIG :	Système d'information géographique
UHRH :	Unité Hydrologique Relativement Homogène
Z ₁ :	Limite inférieure de la couche 1 du sol
Z ₂ :	Limite inférieure de la couche 2 du sol
Z ₃ :	Limite inférieure de la couche 3 du sol



1 INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1 Contexte de la thèse

Ce début de nouveau siècle est riche en défis de toute sorte. Le fait que la population mondiale ait augmenté de deux milliards et demi au cours des 60 dernières années, avec ses implications sur le développement économique, sur la santé et sur la production de nourriture, menace sérieusement les écosystèmes déjà fragiles et soumis à de nombreuses contraintes. L'eau a émergé comme une des questions les plus vitales auxquelles doit faire face l'humanité. Elle occupe une place de plus en plus importante dans l'agenda global des Nations Unies. D'autres questions, telles que la santé publique, la pauvreté, les changements climatiques, la biodiversité, le déboisement et la désertification sont étroitement liées à l'eau, à son utilisation et à sa gestion. Selon l'organisme *Global Water Partnership (GWP/TAC, 2000)*, le taux actuel d'utilisation de l'eau augmente deux fois plus vite que le taux de croissance de la population mondiale. On estime que cette tendance s'accroîtra au cours des 40 années à venir.

Les actions préconisées par la communauté internationale pour la protection des ressources en eau depuis les 20 dernières années sont basées sur la gestion intégrée de ces ressources. Ce type de gestion est généralement considéré comme le moyen le plus logique de gérer durablement les écosystèmes d'eau douce (UN-Water, 2008). Le but de la gestion intégrée de l'eau par bassin versant est de maintenir l'équilibre des écosystèmes tout en garantissant un usage optimal et rationnel des ressources à l'échelle du territoire défini par le bassin versant. Au centre de ce processus, on retrouve les prises de décision en vue d'une gestion fiable, éclairée et optimale des ressources en eau. Selon le *Global Water Partnership (GWP/TAC, 2003)*, dans un contexte de gestion intégrée, les décisions doivent s'appuyer sur un instrument de gestion dans le but de faire les meilleurs choix entre les différentes actions en s'appuyant sur des modules de modélisation. Ces modules de modélisation peuvent intégrer des modèles hydrologiques, de qualité de l'eau, d'érosion et hydrodynamiques.

Le modèle hydrologique est un élément essentiel des modules de modélisation. En effet, il permet, par exemple, de simuler la réponse des rivières aux changements du climat, aux conditions physiques du bassin selon une modélisation des processus naturels (Villeneuve *et al*, 2008) et à divers scénarios d'intervention dans le bassin. Les sorties du modèle hydrologique sont aussi utilisées comme entrées à d'autres modèles pour diverses analyses comme l'évaluation de stratégies de gestion reliées, par exemple, à la qualité de l'eau.

Aujourd'hui, le besoin de développer et/ou d'utiliser des modèles hydrologiques s'accroît dans plusieurs pays tropicaux pour un objectif de gestion intégrée de l'eau par bassin versant. Malheureusement, dans le cas des pays tropicaux, les efforts consentis pour l'amélioration dans de la modélisation hydrologique sont réduits ou annulés par le manque de données requises. Qui plus est, lorsqu'elles existent, ces données sont souvent de piètre qualité (McGregor et Nieuwolt, 1998). Ceci est le résultat d'un manque de compréhension ou d'appréciation du besoin d'enregistrement continu de données comme le débit, ou encore d'un manque de ressources informationnelles. Par conséquent, la compréhension et la modélisation du comportement hydrologique d'un bassin versant dans ces pays deviennent un défi difficile à relever. Ce problème de qualité des données est souvent rencontré dans certains pays du Sud-Est asiatique comme le Vietnam.

Un modèle de simulation a besoin, en entrée, de diverses données telles que la pluviométrie, les types de sol, l'occupation du sol, un modèle numérique d'élévation, etc. De plus, avant son application sur un bassin, un étalonnage du modèle est nécessaire par ajustement de la valeur des paramètres et coefficients des modèles mathématiques de simulation aux caractéristiques propres du bassin. L'étalonnage d'un modèle hydrologique nécessite aussi un certain nombre de mesures de débits et/ou de niveaux d'eau. Malheureusement, dans le cas du Vietnam, il n'est pas rare que les données disponibles sur un bassin versant soient inadéquates ou même inexistantes. Ceci entraîne des difficultés d'étalonnage et/ou des incertitudes importantes dans les résultats de simulation. Dans ce contexte, il apparaît important de se poser la question sur la quantité et la qualité minimales de données disponibles dont il faut disposer pour une prise de décision éclairée dans un contexte de gestion intégrée de l'eau par bassin versant.

1.2 Objectifs

Il convient de rappeler que dans le cadre de cette thèse, on se concentre sur le modèle hydrologique comme première étape des modules de modélisation nécessaires à la gestion intégrée par bassin versant. Les sorties du modèle hydrologique, combinées à celles d'autres modèles, peuvent permettre aux gestionnaires de la ressource en eau d'analyser les impacts sur le régime d'écoulement de divers scénarios d'intervention dans le bassin et d'examiner les questions relatives à la quantité et à la qualité de l'eau. Le modèle hydrologique permet également d'examiner les effets du risque et de l'incertitude sur la gestion des ressources en eau et sur la conservation de l'eau. Il est, par la suite, possible de planifier de manière optimale

les décisions d'aménagement pour protéger les ressources du bassin versant dans un esprit de développement durable.

L'objectif principal de la thèse est, par conséquent, de démontrer que même sur des bassins versants où les données disponibles sont limitées, la modélisation hydrologique peut apporter des informations utiles pour la mise en place de la gestion intégrée de l'eau par bassin versant. À la lumière des résultats, des recommandations seront émises pour la collecte de données afin d'améliorer la performance des modèles utilisés, surtout sur des bassins ayant des régimes hydrologiques extrêmes de type tropical-mousson.

Le modèle hydrologique HYDROTEL (Fortin *et al.*, 1995) a été choisi pour atteindre ces objectifs. Ce modèle a été développé dans un contexte de climat du Québec (Canada), qui est un climat tempéré. Principalement, en dehors des nombreuses utilisations sur des bassins versants du Québec, d'autres applications ont été réalisées avec succès en France et en Argentine (Fortin *et al.*, 2007). Cependant, à l'exception de deux applications sous climat tropical, soit en Côte d'Ivoire (Kouamé *et al.*, 2007) et au Mexique (Armando, 2007), il n'existe aujourd'hui aucune application d'HYDROTEL sous conditions climatiques tropicales de type mousson. Ceci ne permet donc pas de mettre en relief la capacité de ce modèle à être utilisé dans le contexte climatique précédemment décrit. Par conséquent, la capacité du modèle hydrologique HYDROTEL d'être appliqué sur des bassins versants ayant des régimes hydrologiques extrêmes en conditions climatiques tropicales de type mousson sera prioritairement démontrée dans cette étude.

Pour atteindre ses objectifs, cette thèse s'est appuyée sur une étude de cas qui est une application du modèle hydrologique HYDROTEL dans le cadre du projet « Gestion intégrée du bassin de la rivière Cau au Vietnam ». Ce projet est un partenariat entre le Centre Eau, Terre et Environnement de l'INRS (Québec) et l'Académie des Sciences et des Technologies du Vietnam (ASTV).

1.3 Plan de la thèse

La présente thèse est subdivisée en six principales parties. Le résumé bibliographique est présenté au chapitre 2. Il aborde divers aspects (étalonnage, validation, etc.) de la gestion intégrée de l'eau par bassin versant et des modèles hydrologiques. Le cas d'application, les outils d'étude et les données sont présentés au chapitre 3. L'étalonnage préliminaire et l'analyse de sensibilité du modèle, dans le cas du bassin subdivisé en unités spatiales de calculs de grande taille, sont présentés au chapitre 4. Le chapitre 5 vise à définir une échelle spatiale adéquate pour le site d'étude et aborde l'échelle spatiale nécessaire pour les données d'entrée en tenant compte des données disponibles, du temps de simulation et de la précision désirée. L'impact du découpage spatial sur la sensibilité des paramètres est réalisé au chapitre 6 à partir d'une analyse de sensibilité des paramètres du modèle à deux échelles spatiales différentes. Au chapitre 7, l'impact de la quantité et de la qualité des données hydrométéorologiques sur la qualité de la simulation a été analysé pour trois objectifs. D'abord, il s'agit d'évaluer la capacité du modèle à reproduire les débits à l'intérieur du bassin lorsqu'étalonné avec les débits à l'exutoire. Ensuite, l'impact sur la qualité de la simulation de bruits aléatoires dans les données météorologiques ainsi que le manque de stations dans le réseau d'observation ont été analysés. Finalement, le chapitre 8 expose une synthèse et une discussion des principaux résultats et formule des recommandations pour une mise en place efficace de la gestion intégrée par bassin versant.

2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Gestion intégrée des ressources en eau (GIRE)

2.1.1 Approche et définition

Le concept de GIRE s'est développé depuis le début des années 1980, alors qu'on tentait de déployer des solutions pour réduire la pression croissante sur les ressources en eau provoquée par la croissance de la population et le développement socio-économique, surtout dans des pays émergents comme le Vietnam, la Chine, l'Inde, le Brésil, etc. En tant qu'approche holistique et intégrée, la GIRE doit prendre en compte aussi bien les aspects économiques, environnementaux, techniques, sociaux que culturels, tout en assurant la durabilité des ressources en eau pour les générations futures (Braga, 2001).

La GIRE est souvent confondue avec d'autres approches telles que la gestion des bassins versants, la gestion de la demande en eau et la gestion des écosystèmes. Quoique ce concept soit étroitement lié à ces approches, son objectif principal est différent. Chacune des approches précédemment mentionnées peut contribuer de façon significative à la GIRE, bien qu'individuellement, elles ne concernent seulement qu'une partie des problématiques complexes associées à la GIRE (Jorgensen et Rast, 2007).

Il existe, dans la littérature, plusieurs définitions de la GIRE (Grigg, 1999; GWP/TAC, 2000; Jonker, 2002; Thomas et Durham, 2003). Selon le « Status Report on Integrated Water Resources Management and Water Efficiency Plans » de UN-Water (2008), la définition de la GIRE proposée par le GWP/TAC (2000) est celle qui est la plus citée et acceptée au plan mondial. Cette définition est : « La GIRE est un processus qui favorise le développement et la gestion coordonnés de l'eau, de la terre et des ressources connexes, en vue de maximiser, de manière équitable, le bien-être social qui en résulte, sans pour autant compromettre la pérennité d'écosystèmes vitaux ». La façon de mettre en application ce concept n'a pas encore été entièrement explorée. La GIRE pourrait finalement être considérée comme un processus cyclique : elle commence par la planification, suivie de la mise en place d'un cadre de travail, d'un plan d'action et de la surveillance du progrès. En tout point de ce cycle, une rétroaction peut être donnée ou demandée afin de servir de base pour la mesure et l'évaluation.

2.1.2 Les scientifiques et la GIRE

Le rôle des scientifiques dans la GIRE est de développer les instruments de gestion. À cette fin, plusieurs méthodes quantitatives et qualitatives sont disponibles. Ces instruments sont utilisés en combinaison avec d'autres connaissances en économie, en sciences de l'environnement, en sociologie et dans d'autres disciplines pertinentes au problème en question, pour définir et évaluer des plans de gestion de l'eau et des scénarios alternatifs.

Un Cadre d'Aide à la Décision est un des principaux instruments de gestion pour la GIRE. Il s'agit à la fois d'un processus et d'un outil pour résoudre des problématiques qui revêtent un caractère quantitatif trop complexe pour être résolues par une personne seule, ainsi que des aspects qualitatifs importants. En tant que processus, le cadre d'aide à la décision est une méthode systématique qui assiste les décideurs et les autres parties prenantes pour la prise en considération de tous les objectifs. Par la suite, il permet d'évaluer des options en vue d'identifier une solution qui, tout en respectant le plus d'objectifs possibles, résout le problème posé de la meilleure façon. En tant qu'outil, il se compose de modèles mathématiques, de données et d'interfaces qui permettent aux décideurs d'accéder directement aux modèles et aux données dont ils ont besoin pour prendre des décisions scientifiques éclairées. Le cadre d'aide à la décision combine aussi les aspects d'information et les systèmes de modélisation, convertit la politique et les décisions de gestion en modèles et analyses de données appropriées. Il permet finalement aux résultats des décisions d'être comparés et peut, dans certains cas, donner des conseils sur la décision optimale à appliquer (Westen *et al.*, 2004).

2.2 Gestion intégrée de l'eau par bassin versant (GIEBV)

2.2.1 Approche

L'application de la GIRE requiert la prise en compte de la gestion des ressources en eau dans les politiques socio-économiques nationales (et vice-versa). Il est aussi convenu universellement que les ressources en eau doivent être gérées au niveau du bassin, d'où la gestion intégrée de l'eau par bassin versant (GIEBV) est née, conduisant à une approche plus compréhensive de la GIRE (Burton, 2003). Selon l'UNESCO (2002), l'implantation de la GIRE au niveau du bassin signifie qu'il faut gérer les ressources en eau de façon durable. L'approche de GIEBV se focalise, à la base, sur une meilleure coordination entre l'opération et la gestion de l'eau, sur l'allocation et la distribution des services qui dépendent de l'eau, et ce, de façon fiable et

équitable. Étant donné que l'eau est gérée localement, l'approche de GIEBV constitue un cadre pratique, défini par les caractéristiques géographiques et hydrologiques qui facilite l'implantation de la GIRE (Stakhiv *et al.*, 2009).

L'approche de GIEBV a été présentée pour la première fois en 2001 au cours d'une conférence organisée dans le cadre du Programme intergouvernemental international de coopération scientifique de l'UNESCO dans le domaine de l'hydrologie et des ressources en eau (UNESCO, 2002). Plusieurs sujets liés à cette approche ont été plus largement couverts au sommet mondial sur le développement durable ayant lieu à Johannesburg (Afrique du Sud) en 2002. De plus, selon Eugene *et al.* (2009), durant les huit dernières années, plusieurs pays ont convenu de développer la GIEBV au niveau national par des plans efficaces de gestion par bassin versant. Plusieurs de ces plans nationaux sont actuellement mis en route.

2.2.2 Défis

Dans un contexte de GIEBV, toutes les problématiques associées à l'eau, toutes les parties prenantes (avec leurs intérêts socio-économiques particuliers) ainsi que toutes les préoccupations environnementales sont rassemblées. Tous ces divers éléments et composantes sont largement interconnectés à l'intérieur du système, ce qui rend très complexe l'application pratique du concept de GIEBV (Burton, 2003). À travers une approche de système souple, on peut faire face aux problèmes de l'ambiguïté des frontières et des liens complexes à prendre en compte, ainsi qu'à des objectifs, des alternatives et des conséquences qui ne sont pas toujours bien définis ni cernés par toutes les parties prenantes, et à l'incertitude omniprésente, qui n'est pas toujours quantifiable. Également, la gestion itérative implique parfois des conflits et négociations entre les multiples parties prenantes ayant des intérêts et des valeurs qui peuvent être divergents (UNESCO, 2009).

Pour identifier les éléments essentiels d'une GIEBV, les prescriptions et directives rigides et génériques devraient être évitées, car il existe de grandes différences entre les pays. Les pays émergents et les pays développés ont des façons différentes d'implanter le processus de GIEBV puisqu'ils agissent dans des contextes différents. Les pays émergents voient la gestion durable des ressources en eau comme un élément important dans la résolution des problèmes touchant la pauvreté, la faim, la santé et l'environnement durable, alors que les pays développés considèrent la GIEBV comme une approche rationnelle pour accroître l'efficacité de la gestion de leurs ressources, contribuant ainsi au développement continu de leur économie

(ADB, 2006b). En plus de chercher à atteindre les mêmes objectifs que ceux poursuivis par les pays développés dans l'application de la GIEBV, les pays émergents cherchent à implanter des mécanismes pour la conciliation des usages de l'eau et la consultation de la population. La préservation des écosystèmes est également un enjeu important pour les pays développés (Kennedy *et al.*, 2009).

Plusieurs facteurs contribuent au succès de l'implantation de la GIEBV. Les diverses expériences à travers le monde démontrent que les principaux facteurs sont (Jorgensen et Rast, 2007) :

- le manque de conditions propices aux activités de gestion;
- la méconnaissance des outils de gestion existants;
- l'incapacité d'intégrer les politiques locales et/ou nationales de l'eau;
- la fragmentation institutionnelle;
- la main d'œuvre sous-qualifiée;
- le manque de ressources financières;
- une conscientisation inadéquate du public;
- un faible niveau d'implication des associations, des organisations non gouvernementales et du secteur privé dans les activités de gestion de l'eau;
- la focalisation sur le perfectionnement des modèles au lieu de tests sur le terrain;
- les conflits entre les parties prenantes autour des valeurs écologiques;
- les données inappropriées ne permettant pas de disposer d'une image complète et réaliste du bassin versant comme son comportement hydrologique.

Toutefois, un des défis majeurs que pose la GIEBV demeure dans le fait qu'il est difficile de transposer à un contexte donné les applications réussies dans un autre contexte. En effet, les conditions d'application (ex. : climat, périodes de données disponibles, réseaux d'observation), de même que les échelles spatiale et temporelle, varient d'un bassin à un autre et d'un pays à un autre. Ainsi, les pays souhaitant débiter la mise en place de la GIEBV sur leur territoire ne peuvent pas appliquer directement les principes et méthodes déjà appliqués ailleurs avec succès. De plus, le transfert effectif des expériences positives de GIEBV à d'autres bassins ou pays demeure limité en raison du manque de connaissances empiriques concernant les caractéristiques des expériences de GIEBV réussies. La démonstration non ambiguë des bénéfices associés à la GIEBV est encore soit manquante, soit très peu rapportée (Jeffrey et Geary, 2004). En 2009, l'UNESCO a souligné que le transfert effectif des expériences positives

de GIEBV à d'autres bassins ou d'autres pays demeure encore une grande limitation pour la réussite de la GIEBV (Kennedy *et al.*, 2009).

Malgré l'attrait indéniable du concept de GIRE il existe, parmi les chercheurs, un consensus selon lequel les applications couronnées de succès demeurent limitées, puisqu'il n'existe aucune loi, aucune formule ni d'ailleurs aucun modèle unique pour une mise en application (Levine, 2004). En 2009, l'UNESCO a publié deux documents présentant des études de cas ainsi que des leçons apprises pour faciliter et aider l'application de la GIEBV à travers le monde (UNESCO, 2009; Kennedy *et al.*, 2009).

Les autres obstacles de mise en application de la GIEBV sont : la résistance des gestionnaires qui craignent une transparence accrue, le risque politique causé par l'incertitude des bénéfices à venir, la difficulté d'obtenir des ressources financières stables, la crainte de l'échec et les coûts élevés de la collecte d'informations (Lee et Dinar, 1995). Tel que précédemment mentionné, les problèmes relatifs aux données conduisent à des difficultés pour construire et utiliser les instruments de gestion. Cette problématique particulière relative aux données nécessite une discussion détaillée.

2.2.3 Données et outils

Selon l'organisme GWP/TAC (2003), il y a trois principaux types d'information impliqués dans la GIEBV :

- les données : faits quantifiables et qualitatifs sur les caractéristiques des ressources en eau (les volumes, la qualité, les fréquences d'occurrence, la variabilité spatiale, etc.);
- l'information : comment ces données peuvent être assemblées de façon efficiente en vue d'objectifs spécifiques;
- la connaissance : compréhension des implications à long terme des tendances et des valeurs observées, compréhension individuelle et corporative des pratiques d'utilisation des ressources et de leurs impacts, etc.

Le besoin d'implantation de systèmes d'information pour la GIEBV fait face à plusieurs défis : 1) le manque ou la mauvaise qualité des données et les différences parmi celles-ci; 2) les limites dans les méthodes d'analyse pour l'intégration des données sociales, naturelles, économiques et conceptuelles dans un ensemble; et 3) le manque d'appropriation institutionnelle et économique. Parmi les autres défis associés aux données, mentionnons : 1) différents organismes de collecte de données qui utilisent différents cadres de mesures;

2) l'importance relative des divers processus et la précision avec laquelle chacun d'eux doit être représenté; et 3) des données qui sont souvent recueillies pour un objectif autre que celui de la GIEBV.

En ce qui concerne les données géographiques compilées dans les systèmes d'information géographique (SIG), nous faisons face à plusieurs problèmes provenant du fait que les différentes sources de données spatiales offrent :

- des objets qui sont des entités comme les bâtiments, les routes, les conduites, les propriétés, etc., et qui ne doivent pas être directement considérés pour la GIEBV;
- différents modèles de base de données vectorielles et matricielles;
- différents cadres de référence spatiale : datums horizontaux et verticaux.

Aux problèmes précédemment énumérés, on peut ajouter le fait que les données ne sont pas toujours mises à jour et qu'on possède souvent peu d'information sur les méthodes d'analyse. De plus, les données concernant l'eau n'existent pas toujours pour tous les secteurs de la GIEBV (nombre insuffisant de stations, séries courtes, qualité, incertitudes, etc.). Des coûts importants sont souvent associés à la mise en place de systèmes pour la collecte des données requises. Ceci constitue un des plus grands obstacles à la GIEBV. Même les pays développés font face à ce problème et la situation est encore plus sérieuse dans les pays en voie de développement. Comment traiter ce problème? Comment appliquer la GIEBV lorsque les données sont insuffisantes ou de mauvaise qualité? Comment reconstruire les conditions naturelles et prévoir l'impact du développement futur? Quel type de modèle peut aider la GIEBV dans une situation donnée ou dans un contexte hydrométéorologique donné? Ces questions d'importance demeurent encore sans réponse précise pour les pays émergents comme ceux du Sud-Est asiatique. Aussi, est-il important de préciser que les travaux de cette thèse ont pour but d'apporter des éléments de réponse à ces différentes questions qui sont aujourd'hui fondamentales pour l'implantation de la GIEBV ainsi que de la GIRE.

En 2005, et ceci pour la première fois, l'UNESCO a déterminé qu'il n'existait pas de liste d'outils clairement identifiés pour la GIEBV et qu'il faut préciser la définition de ce que sont ces outils. En 2009, cette organisation met l'accent sur le fait que les outils pour la GIEBV doivent être bien catalogués et documentés et on devrait être en mesure de démontrer clairement et rationnellement comment on peut implanter la GIEBV avec les outils existants et déjà fonctionnels, plutôt que de réinventer ceux-ci (Kennedy *et al.*, 2009).

2.2.4 Applications dans les pays du Sud-Est Asiatique

L'Asie du Sud-Est est composée de 11 pays¹ et possède des ressources en eau qui représentent environ 15 % des précipitations totales du monde. Il s'agit de l'une des régions les plus peuplées du monde, avec environ 593 millions d'habitants en 2004. L'urbanisation rapide y apporte son propre lot de problèmes, qui vont du manque d'eau pour les approvisionnements jusqu'à l'excès d'eaux usées non traitées et à la prolifération des maladies transmises par l'eau. Ainsi, en novembre 2003, un premier forum de l'eau de l'Asie du Sud-Est a été conduit pour définir les recommandations spécifiques concernant les problèmes associés à l'eau dans cette région (<http://www.gwpsea.org/>). En février 2004, le premier rendez-vous du « Network of Asian River Basin Organizations » a été organisé (<http://www.narbo.jp/narbo/whats/index.htm>). Parmi les nombreuses recommandations, la construction et le renforcement de la capacité de mise en œuvre de la GIEBV constituent des priorités (http://www.adb.org/Documents/Events/2003/SEA_Water_Forum/default.asp). Plusieurs forums et conférences ont été réalisés pour informer les populations, les associations, etc. à propos de la GIEBV et de la philosophie qui lui est associée. Des expériences pratiques, essentiellement de pays développés, ont également été présentées. Des visions régionales et nationales ainsi que des cadres d'actions ont été rédigés pour la région de l'Asie du Sud-Est. Au moins cinq pays, dont le Vietnam, ont incorporé les concepts et les objectifs de la GIEBV dans leurs lois. Ainsi, la gestion durable de l'eau se développe et commence à influencer les politiques au niveau national et régional de plusieurs pays.

La première tentative de GIEBV en Asie du Sud-Est a concerné le bassin versant du fleuve Mekong, lequel traverse six pays. Il est cependant difficile d'utiliser dans d'autres pays l'expérience de GIEBV acquise sur cette région en raison de sa taille et de son caractère international. Dans cette région, la Thaïlande est pionnière dans l'introduction de la GIRE et ceci depuis 1999. Elle prévoyait déjà, dans son plan d'action de juillet 2006 à mai 2008, l'implantation de la GIEBV pour trois bassins. En 2006, l'Indonésie a réalisé des projets visant à introduire les concepts de la GIEBV sur quatre bassins versants et a poursuivi cette introduction pour un cinquième bassin (ADB, 2006b). Quant au Vietnam, il a commencé la GIEBV en 2004 avec plusieurs projets. Parmi ces projets, on peut citer : « Helping to Introduce Integrated water resources management in red river », « Integrated water resources management in Cau river

¹ Le Cambodge, le Laos, le Myanmar, la Thaïlande, le Vietnam, la Malaisie, le Brunei, le Timor Oriental, l'Indonésie, les Philippines et le Singapour.

basin, 2004-2006 » (ADB, 2006c). Il y a également le projet « Development of a Decision Support System for Integrated water resources management in Vietnam » pour trois bassins versants, financé par la coopération allemande en 2008. Les travaux de cette thèse ont pour but de contribuer à l'expérience scientifique de la mise en œuvre de la GIEBV, particulièrement dans le bassin versant de la rivière Cau au Vietnam et, plus généralement, en Asie du Sud-Est.

2.3 Modèles hydrologiques

La modélisation hydrologique, dans le sens mathématique du terme, a probablement commencé quand Darcy (1856) publia son analyse selon laquelle la circulation de l'eau est provoquée par un différentiel de pression, et ce, à une vitesse déterminée par la propriété du milieu à travers lequel elle circule. Dès les années 1960, il était possible de modéliser le bilan hydrologique de base lors d'une précipitation grâce au développement des ordinateurs. La modélisation hydrologique a énormément progressé depuis cette époque et aujourd'hui on peut inclure dans les modèles un grand nombre de processus. Un nombre impressionnant de modèles hydrologiques plus ou moins complexes ont ainsi été développés jusqu'à ce jour.

Selon Singh (1995), les modèles hydrologiques peuvent être classés selon quatre critères : les entrées, les sorties, les lois de formalisation des processus et la discrétisation temporelle.

Selon le traitement des entrées, on peut distinguer les modèles globaux et distribués. Les modèles globaux considèrent un bassin versant comme une entité unique, les paramètres et les entrées ne variant pas dans l'espace à l'intérieur du bassin et la réponse du bassin est évaluée seulement à la sortie. On peut citer, à titre d'exemples de modèles globaux, les modèles SSARR (Rockwood et Nelson, 1966) et HEC-1 (USACE, 1981). Les modèles distribués divisent le bassin versant en plusieurs entités, chacune représentant une petite partie du bassin, c-à-d. un sous-bassin-versant avec une résolution spatiale choisie par l'utilisateur. Les variables d'état et les flux entre les entités sont déterminés à travers le bassin, comme dans les modèles SHE (Abbott *et al.*, 1986), HYDROTEL (Fortin *et al.*, 1995) et SHETRAN/UP (Ewen *et al.*, 2000). Il y a également des modèles qui se situent entre les deux catégories précédemment citées, soit les modèles « semi-distribués ». TOPMODEL (Beven *et al.*, 1995) et SLURP (Kite, 1997) restent des exemples de modèles semi-distribués.

Une autre caractéristique qui permet de distinguer les modèles est la méthode selon laquelle les résultats sont présentés et le type de calculs effectués dans ces modèles. Selon cette classification, un modèle déterministe produit toujours les mêmes réponses si les mêmes

données se trouvent à l'entrée et si les réserves en eau du bassin sont identiques. À l'opposé, dans un modèle stochastique, certains ou encore tous les paramètres et entrées sont représentés par des distributions statistiques au lieu de valeurs uniques. Ils déterminent un ensemble de sorties, chacune étant associée à une certaine probabilité d'occurrence. Évidemment, certains modèles ne peuvent être qualifiés d'entièrement « déterministes » ou « stochastiques » et se situent entre les deux catégories.

Qu'ils soient distribués ou globaux, déterministes ou stochastiques, les modèles peuvent être classés dans trois principales catégories selon la représentation des processus qu'ils adoptent : empiriques, conceptuels ou physiques (Grayson et Chiew, 1994). Les modèles empiriques sont les modèles les plus simples de type « boîte noire ». Ils sont basés entièrement sur l'analyse du comportement passé du bassin versant. Ils reproduisent la dynamique des variables de sortie en fonction des variables d'entrée sans décrire les processus élémentaires. Les modèles conceptuels sont, quant à eux, désignés comme des modèles de type « boîte grise ». Un ensemble de processus hydrologiques y sont représentés, mais les hypothèses de départ y sont souvent altérées en se basant sur des observations comparatives des entrées et des sorties du système à l'étude. Les modèles SACRAMENTO (Burnash, 1995) et HBV (Bergström, 1995) sont des exemples de modèles conceptuels. Les modèles physiques, quant à eux, décrivent le comportement du système avec le plus de détails possible. La structure du modèle contient des lois physiques connues qui sont considérées importantes pour la dynamique du système. Se situant à l'extrémité de l'échelle de complexité des modèles hydrologiques, les modèles physiques peuvent, en principe, être opérés sans étalonnage, étant donné qu'ils prétendent représenter les procédés physiques importants en fonction de paramètres qui peuvent être mesurés de façon indépendante et assignés, *a priori*, aux caractéristiques appropriées du modèle (ex. : SHE, Abbott *et al.*, 1986). Toutefois, dans la pratique, cette approche souffre d'un manque de données requises pour caractériser adéquatement le modèle, puisqu'aucun modèle ne peut représenter toute l'hétérogénéité interne d'un bassin (Grayson *et al.*, 1992b). Par conséquent, les modèles de bassins les plus sophistiqués reposent encore sur les données d'entrée et de sortie pour l'étalonnage, puisqu'en pratique, la caractérisation du bassin ne peut jamais être suffisamment détaillée pour l'éviter.

Selon les objectifs de la modélisation, le comportement du bassin versant peut être présenté seulement pour des événements de précipitations spécifiques par les *modèles événementiels*, ou encore en continu sur une période de temps donnée par les *modèles continus*.

L'accent n'a pas été mis sur le temps de simulation dans ce texte, puisque presque tous ces modèles simulent au pas de temps journalier et certains à des pas de temps inférieurs, ce qui est amplement suffisant dans une démarche de gestion intégrée.

Avec la disponibilité croissante des données de télédétection, la modélisation hydrologique est arrivée dans les années 1990 à un stade où elle peut prendre en compte l'hétérogénéité spatiale des bassins versants (élévation, occupation du sol, etc.). Ce niveau de détails des modèles hydrologiques permet de rencontrer les conditions essentielles pour évaluer des scénarios d'aménagement dans un cadre de GIEBV (Villeneuve *et al.*, 2008).

Les applications des modèles hydrologiques dans les pays tropicaux sont moins nombreuses que dans d'autres régions (Singh et Woolhiser, 2002; Ma *et al.*, 2005). Toutefois, les applications dans les pays soumis à un régime climatique de type tropical-mousson n'ont réellement avancé qu'en Australie (<http://typo38.unesco.org/es/worldwide/ihp-asia-and-pacific.html>). Dans les pays du SEA, les études sur ce sujet n'ont commencé que récemment et principalement avec l'aide de pays développés. Les projets suivants pourraient être cités à titre d'exemples :

- « Development of an operational monsoon flood management system in Malaysia » (Mardiana *et al.*, 2004).
- « La gestion intégrée du bassin versant de la rivière Cau du Vietnam », financé par le Canada (2006-2012), projet dans lequel s'intègre la présente thèse.

Les modèles, quels qu'ils soient, présentent encore une certaine difficulté d'utilisation liée à l'identification de la valeur des paramètres (étalonnage). L'étalonnage devient aussi de plus en plus difficile avec la complexité des modèles, ce qui accroît le nombre de paramètres et exige donc de plus en plus de données pour réaliser un étalonnage acceptable.

Choisir un modèle hydrologique distribué, adapté pour les régions soumises à des conditions météorologiques de type tropical-mousson, comme le Vietnam, et convenant à la GIEBV, tout en limitant les besoins en main-d'œuvre pour l'utilisation et l'adaptation de ce modèle, n'est pas toujours un exercice facile. Les travaux présentés dans cette thèse contribueront en partie à trouver des réponses à cette problématique.

2.4 Étalonnage, validation et analyse de sensibilité des modèles

2.4.1 Étalonnage

Les modèles hydrologiques permettent d'étudier des problèmes complexes et de synthétiser différents types d'information. Toutefois, les résultats de ces modèles ne sont fiables que dans la mesure où les hypothèses, les entrées et les paramètres estimés le sont également. À cet égard, nous faisons face à deux problématiques principales. La première est de sélectionner un modèle approprié pour représenter le bassin à l'étude. La deuxième est de choisir les valeurs des paramètres du modèle de sorte que celui-ci représente le mieux possible le comportement du bassin. Le processus par lequel les valeurs des paramètres sont choisies est désigné comme étant l'étalonnage du modèle. Il s'agit d'un processus lors duquel les valeurs des paramètres sont changées jusqu'à ce qu'un accord satisfaisant entre le comportement simulé du bassin et celui observé soit obtenu (Gupta et Sorooshian, 1985). Le succès de l'application d'un modèle hydrologique dépend aussi du degré de précision de l'étalonnage, mais l'étalonnage d'un modèle distribué pourrait être une histoire sans fin où il y a toujours une possibilité d'amélioration (Refsgaard, 1997).

Les modèles hydrologiques sont basés sur une représentation des processus qui gouvernent l'écoulement de l'eau dans le sol et à sa surface. Ils peuvent utiliser des caractéristiques physiques des bassins versants (surface du bassin, réseau hydrographique, variation d'élévation, occupation et types de sol, etc.), mais aussi des paramètres d'ajustement. Certains modèles collent davantage à la représentation physique des bassins versants et des conditions météorologiques et hydrologiques pour ces bassins. Dans ce cas, les paramètres d'ajustement ne servent qu'à compenser les erreurs dues aux imprécisions de certaines données. D'autres modèles sont moins physiques et les paramètres d'ajustement jouent donc un plus grand rôle. Généralement, le processus d'étalonnage se fait en deux étapes : spécification des paramètres et estimation des valeurs des paramètres.

2.4.1.1 Spécification des paramètres

On utilise, *a priori*, les connaissances sur les propriétés et le comportement du bassin pour spécifier les estimations initiales des paramètres du modèle. Pour les paramètres physiques, les spécifications sont faites à partir des mesures obtenues sur le terrain ou à partir de cartes. Ces paramètres sont typiquement fixés aux valeurs mesurées et demeurent inchangés sauf s'ils sont

considérés comme erronés. Pour les paramètres d'ajustement, leurs valeurs sont déterminées en se basant sur la physique du phénomène, la nature des équations, les expériences et la compréhension hydrologique du bassin versant. L'incertitude dans l'estimation des paramètres qui en résulte est ensuite réduite par le processus d'estimation des paramètres décrit ci-après.

2.4.1.2 Estimation des paramètres

Il s'agit des techniques conçues pour réduire l'incertitude concernant les paramètres associés aux processus. Une approche typique serait de choisir en premier des estimations initiales pour les valeurs des paramètres et, par la suite, d'ajuster ces valeurs pour approcher le comportement simulé par le modèle à celui du bassin. Il s'agit donc de rechercher le minimum d'une fonction mathématique reliant les données mesurées aux valeurs des paramètres calculés.

2.4.1.3 Objectif

La recherche continue de solutions pour l'estimation des paramètres lors de l'étalonnage des modèles hydrologiques a conduit à divers objectifs, parfois contradictoires, mais le plus souvent concernant (Madsen, 2000) :

- une bonne adéquation des volumes mesurés et simulés;
- une bonne adéquation de la forme des hydrogrammes mesurés et simulés;
- une bonne adéquation des débits de pointe par rapport au temps de réponse, aux flux et aux volumes;
- une bonne adéquation des débits faibles.

Ces mesures d'adéquation se font au moyen d'indicateurs. Plusieurs indicateurs ont été mis au point, par exemple les coefficients de Nash-Sutcliffe. Ces indicateurs sont utilisés seuls lorsqu'il s'agit d'un étalonnage mono-objectif ou en combinaison dans le cas d'étalonnage multi-objectif.

Les résultats de l'étalonnage deviennent moins dépendants des fonctions « objectif » utilisées lorsque le modèle constitue une bonne représentation de la réalité et qu'il a un plus grand potentiel de prédiction. Ainsi, selon Fenicia *et al.* (2007), il est souvent plus efficace d'essayer de comprendre les limitations d'un modèle et de les corriger par une schématisation améliorée que de consacrer beaucoup d'efforts pour tenter d'améliorer l'ajustement d'un modèle déficient par des procédés d'étalonnage sophistiqués.

L'approche traditionnelle d'étalonnage est de comparer les écoulements observés et simulés à la sortie du bassin. Selon Refsgaard (1997), cette approche n'est pas suffisante, particulièrement pour les modèles hydrologiques distribués. En effet : 1) cette approche peut augmenter l'erreur sur la simulation de certains aspects du signal observé aux dépens d'autres aspects; et 2) l'intégration des résidus dans une valeur peut cacher ou sous-estimer la teneur en information des données disponibles, ne capturant ni n'exploitant toute l'information présente dans les données. Ces limitations suggèrent de recourir à un plus grand nombre de fonctions « objectif », apportant une dimension multi-objective au problème d'étalonnage, tel que suggéré par Gupta *et al.* (1998).

2.4.1.4 Étalonnages manuel et automatique

Fondamentalement, l'étalonnage peut être exécuté soit manuellement, soit de façon automatique par la résolution à l'aide d'algorithmes préétablis.

- **Étalonnage manuel** : Dans l'étalonnage manuel, l'ajustement des paramètres se fait par un processus d'essais et erreurs. Après chaque ajustement des paramètres, les hydrogrammes simulés et observés sont visuellement comparés pour vérifier si la concordance s'est améliorée. Des indicateurs de performance de modèle (ex. : Nash-Sutcliffe, erreur sur les apports, etc.) sont vérifiés aussi pour savoir si leurs valeurs sont conformes avec les valeurs attendues par le modélisateur. Différents modélisateurs peuvent obtenir des valeurs de paramètres différentes pour un même bassin. L'étalonnage manuel requiert donc une personne très bien entraînée et expérimentée pour assurer la précision des simulations réalisées ultérieurement.
- **Étalonnage automatique** : Alors que l'étalonnage manuel peut produire de bons résultats, il nécessite du temps et implique une bonne part de jugement subjectif. L'étalonnage automatique permet, quant à lui, de corriger certains défauts de l'étalonnage manuel, soit :
 - la nécessité d'accélérer le processus d'étalonnage;
 - le fait qu'il y ait peu d'experts d'étalonnage disponibles pour chaque modèle de bassin;
 - la nécessité d'assigner un certain degré de confiance et d'objectivité aux prédictions du modèle.

Cependant, il est important de souligner que les méthodes d'étalonnage automatique ne sont pas encore suffisamment éprouvées au point où elles peuvent remplacer entièrement les méthodes manuelles. Bien qu'elles puissent identifier rapidement une solution, les méthodes automatiques requièrent aussi une certaine expertise de la part de l'utilisateur et sont généralement utilisées en conjonction avec une procédure manuelle. Il faudrait noter que cette thèse s'appuiera sur l'étalonnage manuel avec multi-objectifs (Chapitre 3).

2.4.2 Validation

Le résultat de tout processus d'étalonnage dépend de plusieurs facteurs tels que les données d'étalonnage, la fonction « objectif » et la procédure d'optimisation. Par conséquent, il est de bonne pratique de conduire initialement un test de vérification. Klemes (1983) propose quatre points importants pour la validation des modèles qui sont l'application du modèle : 1) à une série de données non utilisées pour l'étalonnage; 2) à d'autres zones géographiques (*proxy-basin test*); 3) au bassin versant d'étalonnage, mais avec des données correspondant à un changement de l'occupation du sol ou du climat; et 4) à d'autres zones climatiques.

La méthode usuelle est de vérifier les résultats du modèle étalonné avec des données qui n'ont pas été utilisées pour l'étalonnage. Ces données de vérification doivent contenir un comportement hydrologique similaire à celui sous lequel le modèle devra produire des prévisions. Ce genre de test est généralement désigné comme un test de validation ou d'« échantillonnage divisé ». Une partie des données disponibles est utilisée pour l'étalonnage, le reste est utilisé pour la vérification, avec comme objectif de détecter tout biais qui aurait pu se glisser dans l'estimation des paramètres. Les résultats de la validation seront dépendants de la qualité et du type de données utilisées. La validation peut porter soit sur le même type de variables et d'indicateurs que ceux qui ont servi à l'étalonnage (validation mono-indicateur) ou sur d'autres variables et indicateurs (validation multi-indicateur).

La validation mono-indicateur utilise une variable unique pour valider les résultats d'étalonnage. Généralement, en modélisation hydrologique, on utilise le débit, car c'est la grandeur la plus mesurée et c'est un terme intégrateur de tous les processus intervenant sur le bassin versant (Silberstein *et al.*, 1999). Pour la validation multi-indicateur, il s'agit de variables qui reflètent le fonctionnement hydrologique supposé par le modélisateur. On peut citer par exemple :

- la teneur en eau et les niveaux piézométriques (Anderson et Woessner, 1990) et l'extension de la zone saturée (Güntner *et al.*, 1999).

- des mesures de débit provenant de stations intermédiaires ou intégrées sur des pas de temps différents, comme les débits journaliers, mensuels ou annuels si l'étalonnage s'est fait par rapport à des débits horaires encore appelé « validation multi-échelle » (Ambroise *et al.*, 1995).

Il n'est pas rare qu'un modèle étalonné reproduise bien les données utilisées pour l'étalonnage, mais qu'il ne soit pas bien performant avec les données de vérification (phénomène souvent désigné comme « divergence du modèle »). Lorsque ceci survient, il est nécessaire d'examiner la procédure d'étalonnage pour vérifier si certaines hypothèses sont inappropriées ou invalides, puis de réviser la procédure en conséquence. Quelques fois, des modifications survenues dans le temps comme l'occupation du sol, la construction de barrages, des modifications dans le réseau d'observations météorologiques, etc., pourraient expliquer les divergences du modèle. Il est alors important d'adapter le modèle en tenant compte de ces modifications. C'est une étape ultime dans la chaîne pour appliquer un modèle hydrologique. La validation aide aussi à éviter les problèmes de non-unicité des paramètres et d'équifinalité de la solution. Les hydrologues espèrent qu'avec une validation à différentes variables et différentes échelles, les modèles hydrologiques pourront mieux représenter la réalité.

Cette thèse s'appuiera sur deux approches : la première est de choisir une série de données pour l'étalonnage et une série différente pour la validation. Cette approche utilise les débits mesurés à l'exutoire comme unique variable de validation. La seconde approche est la validation multi-échelle : elle utilise d'autres données mesurées tels les débits d'une station dans la partie amont du bassin à l'étude.

2.4.3 Analyse de sensibilité (AS)

Il est recommandé d'appuyer une procédure d'étalonnage par une analyse de sensibilité (McCuen, 1973), plus particulièrement lorsqu'il y a possibilité d'interactions entre les paramètres de non-sensibilité ou d'équifinalité. Par exemple, la réponse d'un modèle peut augmenter avec l'accroissement d'un paramètre donné *A*, alors que la réponse diminue dans les mêmes proportions avec l'augmentation d'un autre paramètre *B*. Le paramètre *A* est donc couplé au paramètre *B*. Par contre, un autre paramètre pourrait n'avoir aucune sensibilité envers une variable simulée. On parle d'équifinalité quand il est possible d'obtenir différents jeux optimaux de paramètres qui donnent sensiblement la même valeur de la fonction « objective ».

De plus, un paramètre peut être important pour une variable simulée donnée et peut être insensible envers une autre variable simulée (Saltelli *et al.*, 2000).

La raison d'être d'une analyse de sensibilité est très claire. Elle permet au modélisateur d'estimer le taux de changement de la sortie du modèle par rapport au changement de chaque entrée du modèle. Plus spécifiquement, les objectifs d'une telle analyse sont de :

- déterminer les paramètres pour lesquels il est important d'obtenir des valeurs plus précises;
- comprendre le comportement du système modélisé;
- évaluer l'applicabilité du modèle.

L'analyse de sensibilité est une procédure pour déterminer quels paramètres peuvent être considérés comme bien déterminés (sensibles) et quels paramètres sont faiblement déterminés (non sensibles).

Il existe plusieurs méthodes pour faire cette analyse et peu importe la méthode choisie, l'objectif est d'identifier les paramètres sur lesquels on devra concentrer les efforts d'étalonnage. Cette information est particulièrement utile dans un contexte de gestion intégrée en vue de mieux cibler une éventuelle campagne d'échantillonnage pour la mise en place du modèle sur un nouveau bassin versant. L'analyse de sensibilité qui sera réalisée dans cette thèse est basée sur l'idée de la méthode « un paramètre à la fois » de Morris (1991).

2.5 Échelle spatiale

Dans l'histoire de la modélisation hydrologique, les modèles tant globaux que distribués tentent de simuler sur une large gamme d'échelles spatiales, allant d'une échelle de pente de colline de 100 mètres à l'échelle régionale de 1 000 km et plus, en passant par l'échelle de bassins d'une dizaine de kilomètres (Blöschl et Sivapalan, 1995). Comment choisir une échelle spatiale appropriée demeure toujours une question d'importance pour les modélisateurs.

La problématique de l'échelle spatiale en hydrologie provient du fait que les relations mathématiques décrivant un phénomène physique sont dépendantes de l'échelle spatiale (Gupta *et al.*, 1986a). Le transfert d'information d'une échelle à l'autre est appelé « mise à l'échelle ». La mise à l'échelle et ses effets sur la modélisation hydrologique sont liés à l'hétérogénéité. Ainsi, cette hétérogénéité, qui affecte la mise à l'échelle, est faible aux petites échelles et élevée aux grandes échelles. Par conséquent, plus le degré d'hétérogénéité sur le

terrain est grand, plus l'échelle de la carte devrait être grande pour tenir compte d'une telle variabilité.

Les modèles hydrologiques utilisent diverses équations pour représenter les processus sur un bassin entier, alors que les données sur les caractéristiques du bassin sont collectées seulement à un nombre limité d'endroits sur le terrain. Cela est vrai pour les données hydrométéorologiques et les données topographiques. Il est difficile de transformer ces données de terrain en une représentation distribuée du bassin entier (Singh, 1995). Ceci amène à la question suivante : « Quelle échelle permettrait la meilleure simulation hydrologique? ». Si cette échelle est trop grande, elle sera dominée par les caractéristiques physiques locales et nécessitera des données d'entrée détaillées, alors que trop petite, elle ignorera l'hétérogénéité hydrologique causée par la variabilité spatiale.

De plus, les valeurs prises par divers paramètres du modèle pourraient différer lorsque le degré de désagrégation du bassin change, puisqu'elles peuvent être dépendantes de l'échelle. Une échelle de bassin optimale reflète un compromis entre la disponibilité des données et les processus complexes qui génèrent la réponse hydrologique. L'hétérogénéité du sol, de la couverture végétale, de l'utilisation du terrain, pour ne citer que ces exemples, couvre une grande gamme d'échelles, rendant difficile l'analyse des processus hydrologiques. La question importante à laquelle le modélisateur cherche à répondre est : « Quelle est l'échelle spatiale qui permettrait une performance optimale du modèle? ». Cette performance peut être envisagée sur la base de deux critères. Le premier critère, lié à la physique, porte sur la capacité du modèle à préserver le mécanisme essentiel du ruissellement et à produire une réponse hydrologique la plus proche possible de la réponse observée. Le deuxième critère est en relation avec la durée, c'est-à-dire le temps requis pour la préparation des données et les calculs pour la modélisation.

Il existe des études, dans la littérature, à l'intérieur desquelles des investigations ont été réalisées sur les effets de l'utilisation de différentes tailles de la grille sur les résultats de régime hydrologiques de modélisation (Western *et al.*, 2004). Ainsi, on note de nombreuses recherches sur comment la taille de la grille, les caractéristiques topographiques et l'index de l'humidité affectent la sortie de TOPMODEL (Quinn *et al.*, 1991; Moore *et al.*, 1993; Bormann, 2006). Dans d'autres études, ont été analysés les impacts de la résolution spatiale des données d'entrée à sur les sorties d'un modèle comme SWAT (Chaubey *et al.*, 2005). Le rôle de différentes tailles d'unités spatiales de calculs sur la description des caractéristiques physiques du bassin et leur effet sur la modélisation de processus hydrologique avec le modèle HYDROTEL ont été analysés par Indarto (2002).

2.5.1 Concepts de découpage d'un bassin versant

Les concepts de découpage d'un bassin versant pour un modèle distribué supposent qu'à une échelle spatiale donnée, il existe une homogénéité ou une similarité qui peut être approchée au niveau des processus, de l'interprétation de la variabilité topographique, de la définition d'unités de réponse hydrologique et de l'analyse des comportements hydrologiques. Ces concepts peuvent mener à différentes approches et l'accent sera mis sur l'approche de l'homogénéité dans le cadre de cette thèse. Plusieurs concepts sont à la base de cette approche :

- La maille carrée : la distribution des valeurs des paramètres et de la réponse hydrologique du bassin est représentée horizontalement selon une maille carrée et régulière, puis verticalement par une colonne correspondant à chaque maille. Le modèle le plus connu utilisant la maille carrée est le modèle SHE (Abbott *et al.*, 1986), dont la taille des mailles peut ne mesurer que quelques dizaines de mètres carrés. SHE est un modèle tridimensionnel tenant également compte de l'écoulement souterrain et qui demande une grande quantité d'information. Les autres modèles qui utilisent la maille carrée sont essentiellement bidimensionnels. À titre d'exemples, on peut citer : le modèle CEQUEAU (Morin *et al.*, 1981) et le modèle WATFLOOD (Kouwen *et al.*, 1993); des modèles dont la taille de chaque maille peut varier de quelques kilomètres à plusieurs kilomètres carrés. D'autres modèles, comme ceux de Leavesley *et al.* (1983) et de Fortin *et al.* (1995), font aussi appel à des mailles carrées, mais les simulations sont effectuées sur des unités de calcul, des sous-bassins versants, intégrant plusieurs de ces mailles.
- La surface représentative élémentaire (SRE) : elle suppose que les caractéristiques de la topographie du sol et de la pluie à l'échelle des petits sous-bassins définissent le ruissellement de surface. Une répartition spatiale différente d'une de ces grandeurs à l'intérieur du bassin va produire une réponse hydrologique différente alors même que la distribution statistique de cette grandeur est conservée. La SRE est fortement influencée par la topographie ainsi que par les tailles et les formes du sous-bassin; la variabilité du sol et de la pluie apparaissent seulement comme des facteurs secondaires pour déterminer la taille des SRE (Wood *et al.*, 1988).
- Unité de Réponse Hydrologique (URH) : Leavesley *et al.* (1983) supposent, dans la conceptualisation du modèle PRMS, que le bassin versant est un ensemble de plusieurs URH définies selon des indicateurs tels que la pente, l'orientation, la végétation, le type de sol et la distribution des précipitations. Ils précisent que la variation de la dynamique des processus à l'intérieur d'une URH peut être négligée par rapport à la variation d'une

URH à l'autre. Le terme « Unité Hydrologique Relativement Homogène » (UHRH) est proposé avec le modèle HYDROTEL (Fortin *et al.*, 1995). Il est défini comme un très petit sous-bassin versant associé à un tronçon de rivière. L'objectif visé est d'effectuer les simulations sur des unités hydrologiques qui sont relativement homogènes par rapport au bassin étudié et de conserver la structure interne d'écoulement de cette unité. Une modélisation hydrologique basée sur les URH suppose que les processus physiques peuvent être représentés de façon déterministe. Ainsi, le modèle à base d'URH est distribué tout comme le modèle à base physique, mais ces modèles sont différents au niveau de la conception. Le modèle à base physique tente de représenter une distribution spatiale de chaque paramètre pour chaque unité de calcul, tandis que le modèle à base d'URH implique qu'il existe des sous-zones homogènes qui peuvent être agrégées (Cai et Maidment, 1996).

- Group Response Unit (GRU) : Kouwen *et al.* (1993) ont décrit le concept de *Grouped Response Unit (GRU)* utilisé dans le modèle WATFLOOD. Ce concept est utilisé de la façon suivante : « Une GRU est simplement une unité du bassin versant. Elle peut être une maille carrée individuelle, un groupe de mailles ou un bassin versant plus petit ».
- Unité Hydrologique Similaire (UHS) : Schultz (1994) a proposé la notion d'UHS définie comme la surface sur laquelle la réserve utile du sol est homogène. La réserve utile est le produit de la porosité du sol par la profondeur racinaire de la végétation. Une simplification est faite en regroupant en une seule classe les types de végétation ayant des profondeurs racinaires similaires.

En somme, il faut noter que la classification des modèles dans les différents concepts de découpage n'est pas si absolue. Certains modèles peuvent utiliser un mélange de deux concepts. Les différents concepts d'échelle utilisés sont également liés aux différents processus à modéliser. On peut donc discrétiser l'espace selon différentes hypothèses du modèle. Cela peut nous servir afin de comprendre la variabilité des processus hydrologiques à l'échelle spatiale donnée.

2.5.2 Impact de l'échelle spatiale

La façon dont on conceptualise les processus dans un modèle va déterminer la taille « idéale » des éléments. En général, une résolution spatiale élevée des données d'entrée conduit à un meilleur résultat de simulation. Toutefois, plus la taille de la grille est grande, plus le volume d'information requis sera important. Il s'ensuit un temps de collecte et de traitement des

données plus long et une description fine n'est pas toujours la meilleure solution. Grayson (2000) a montré que même si la finesse de la résolution du Modèle Numérique de Terrain (MNT) offre une description plus réaliste de l'emplacement, la simulation du débit peut donner des résultats équivalents avec une résolution plus grossière du MNT. Il s'agit d'une conséquence de la structure du modèle qui n'est pas capable de profiter de l'addition d'information apportée par le MNT à résolution fine.

Il existe peut-être une interaction entre la structure du modèle et la résolution spatiale idéale. Même si le modèle est parfait dans sa structure et est capable de capter la variabilité du terrain présente dans le MNT à résolution fine, il n'en demeure pas moins que si on ne dispose pas de données pour représenter la variabilité spatiale des paramètres du modèle, l'utilisation d'une résolution fine devient inutile. Le choix de la résolution est donc une décision fonctionnelle pour un modèle spécifique à travers duquel on peut observer de l'inconsistance face à la réalité imposée par cette approche. Ceci est lié au processus itératif entre la nature des processus hydrologiques, la démarche de modélisation distribuée et les données disponibles pour représenter la réalité. Cependant, la finesse de discrétisation est limitée par la disponibilité des données et il subsiste des questions fondamentales auxquelles il est encore nécessaire de répondre : « Quelle est la taille de l'élément qui est utile pour la modélisation? » et « Est-ce qu'un découpage plus fin garantit de meilleurs résultats pour les simulations? ».

2.5.3 Découpage spatial pour la GIEBV

Avec un modèle hydrologique, quelle est l'échelle spatiale requise qui serait efficace tant du point de vue de la GIEBV que du côté de la science et de l'économie? Cette question demeure sans réponse.

Un des objectifs de la thèse est donc de déterminer l'échelle spatiale qui satisferait à la fois l'objectif scientifique de la GIEBV ainsi que l'objectif économique lié aux ressources nécessaires pour mettre en œuvre la modélisation avec le modèle HYDROTEL. On souhaite ainsi contribuer à la création d'un guide d'outils pour la GIEBV.

2.6 Effet des données météorologiques

Pour un modèle hydrologique, la connaissance précise des précipitations ou des données météorologiques est essentielle afin d'estimer les débits de façon précise. Aucun modèle, fût-il

bien fondé sur les théories de la physique ou ayant démontré sa performance antérieurement, ne pourrait produire des prédictions hydrologiques précises si les données d'entrée ne caractérisent pas bien les propriétés météorologiques. Dans un bassin versant, les écoulements sont gouvernés par des processus physiques complexes qui sont non linéaires et extrêmement sensibles. Les données météorologiques et les débits varient souvent de façon significative dans l'espace et dans le temps sur un bassin versant. La distribution spatiale et la précision de ces données à l'entrée d'un modèle hydrologique influencent considérablement les résultats de simulation. Schultz (1994) et Sun *et al.* (2002) ont démontré que les erreurs dans l'estimation des débits sont directement reliées à la distribution spatiale des données d'entrée et à la représentation des conditions spatiales à travers le bassin. Selon Bormann (2006), la qualité des résultats de simulation dépend aussi des données d'entrée.

Un réseau d'observations météorologiques est un outil fondamental pour estimer les précipitations en un point donné. L'influence de la densité d'un réseau de pluviomètres sur les sorties des modèles hydrologiques (*p. ex.* débits simulés) a été investiguée par plusieurs auteurs (Peters-Lidard et Wood, 1994; St-Hilaire *et al.*, 2003) avec des précipitations réelles et synthétiques ainsi que des données de débits observés. Les effets de la dégradation du réseau de pluviomètres sur les hydrogrammes simulés ont aussi été étudiés (Mahe *et al.*, 2008). Selon Anctil *et al.* (2006), la performance du modèle diminue rapidement lorsque la précipitation réelle moyenne est calculée en utilisant un nombre relativement faible de pluviomètres. Ils ont démontré également que quelques combinaisons de stations météorologiques ne fournissent de meilleures prévisions que lorsque toutes les données disponibles des stations sont utilisées. Une représentation inadéquate de la variabilité spatiale du réseau de météo peut être partiellement responsable des erreurs de modélisation. Au moment où les variations spatiales dans les précipitations en entrée n'ont pas été prises en compte, Chaubey *et al.*, (1999b) ont obtenu une grande incertitude dans l'estimation des paramètres du modèle AGNPS (hypothèse : pluie homogène dans l'espace). Oudin *et al.* (2006) ont observé que des erreurs aléatoires dans les précipitations d'entrée affectent considérablement la performance d'un modèle ainsi que les valeurs des paramètres étalonnés.

Un choix approprié de données d'entrée peut réduire de façon importante les difficultés rencontrées lors de l'étalonnage d'un modèle hydrologique. Toutefois, on ne peut objectivement définir ce qui constitue un « bon » jeu de données pour le modèle. Les questions importantes, dans ce cas, sont de déterminer combien de données (quantité) sont nécessaires et suffisantes pour le bassin versant étudié (selon les dimensions et les caractéristiques physiques du bassin,

les intensités et la variabilité spatiale des précipitations et des températures) et quels types de données (qualité) produiront les meilleurs résultats.

Certains pourraient avoir tendance à utiliser le plus de données possible pour l'étalonnage. Toutefois, selon Gupta et Sorooshian (1985), d'un point de vue statistique, l'ensemble des données utilisées pour l'étalonnage devrait être d'une longueur d'au moins 20 fois le nombre de paramètres à estimer (c.-à-d. s'il y a dix paramètres, alors au moins 200 données d'écoulement devraient être utilisées). De plus, il faut viser l'obtention de réseaux à peu près identiques pour la période d'étalonnage, la période de vérification et la période pendant laquelle on compte utiliser le modèle sur le bassin. Le modèle étant étalonné à partir des informations produites par un réseau donné, si ce réseau change de manière importante de sorte que, par exemple, les précipitations sur le bassin étudié ne sont plus estimées avec la même précision, l'étalonnage s'en trouvera affecté.

En matière d'étalonnage des modèles, la *qualité* des données dépend des informations (concernant les paramètres) que contiennent les données et du bruit (erreurs) dans celles-ci. Le premier aspect de la qualité est la *nature informative* des données. Les données devraient contenir ou représenter la variabilité des conditions météorologiques possibles sur le bassin à l'étude. Ceci maximise les chances que les données contiennent suffisamment d'information afin d'identifier correctement la valeur des paramètres. Plus le régime hydrologique varie souvent entre les conditions sèches, intermédiaires et humides dans le jeu de données utilisé pour l'étalonnage, plus on a de chances que les données soient informatives.

Le second aspect de la qualité des données concerne les erreurs associées aux données. Les erreurs dans les données peuvent provenir de plusieurs sources, telles que les méthodes de transfert des données, les approximations dans les transformations de données, le déplacement du lit de la rivière, les négligences, la mauvaise prise de données, etc. En sélectionnant les données pour l'étalonnage, il est souhaitable qu'elles soient examinées attentivement pour détecter les erreurs évidentes, par exemple, les périodes où l'hydrogramme monte malgré l'absence de précipitations.

En conclusion, mentionnons qu'à ce jour, il y a toujours très peu de recherches sur l'impact du nombre de stations météorologiques et la qualité des données d'entrée sur les résultats de la modélisation hydrologique. Par conséquent, cette thèse propose d'apporter une contribution aux recherches sur ce sujet.

3 CAS D'APPLICATION, OUTILS ET DONNÉES

3.1 Bassin versant de la rivière Cau

Situé au nord du Vietnam, le bassin versant de la rivière Cau s'étend de 21° 01' à 22° 18' de latitude nord et de 105° 28' à 106° 08' de longitude, sa superficie totale est de 6 030 km² (Figure 3-1). La partie visée par la présente étude a une superficie de 2 760 km². Il est considéré comme l'un des deux plus importants bassins versants au nord du Vietnam. Il revêt une importance sociale et économique considérable, puisqu'il constitue une source d'alimentation en eau importante pour des communautés totalisant environ 3,8 millions d'habitants. La majeure partie du bassin s'étend à de faibles altitudes, mais dans la partie amont du bassin, quelques crêtes de montagne seulement excèdent les 1 000 m.

Ce bassin s'étend dans le secteur tropical des moussons et reçoit des précipitations annuelles oscillant entre 1 500 et 2 700 mm, dont 60 % à 80 % tombent pendant la saison des pluies (mai à octobre). La région du nord reçoit annuellement environ 1 700 mm, tandis que dans la partie sud-ouest, les précipitations annuelles s'élèvent à 1 575 mm. La partie la plus sèche est celle du sud-est avec presque 1 500 mm par an. Les températures journalières peuvent varier de 3 °C à 35 °C dans la région nordique (Bac Can) et de 3 °C à 40 °C dans le sud-est (Bac Giang).

La densité moyenne de la population s'élève à 540 personnes/km². La plus faible densité de population se situe dans la province de Bac Can (53 personnes/km²), tandis que la plus élevée, 2 000 personnes/km², se trouve dans les régions de Ha Noi et Bac Ninh. La plupart des habitants (environ 82 %) vivent dans des secteurs ruraux. Dans les provinces de Bac Can, de Thai Nguyen et de Bac Giang, l'activité dominante est l'agriculture, tandis que l'industrie et les services dominent dans les provinces de Ha Noi, de Vinh Phuc et de Bac Ninh. La structure économique dans le bassin peut être subdivisée comme suit : agriculture et sylviculture (30 %), industrie et construction (30 %) et services (40 %). Le secteur industriel est diversifié et une zone industrielle d'importance est actuellement en développement. L'industrialisation et la croissance économique rapides augmentent de façon notable la demande en eau et les charges polluantes dans le bassin versant.

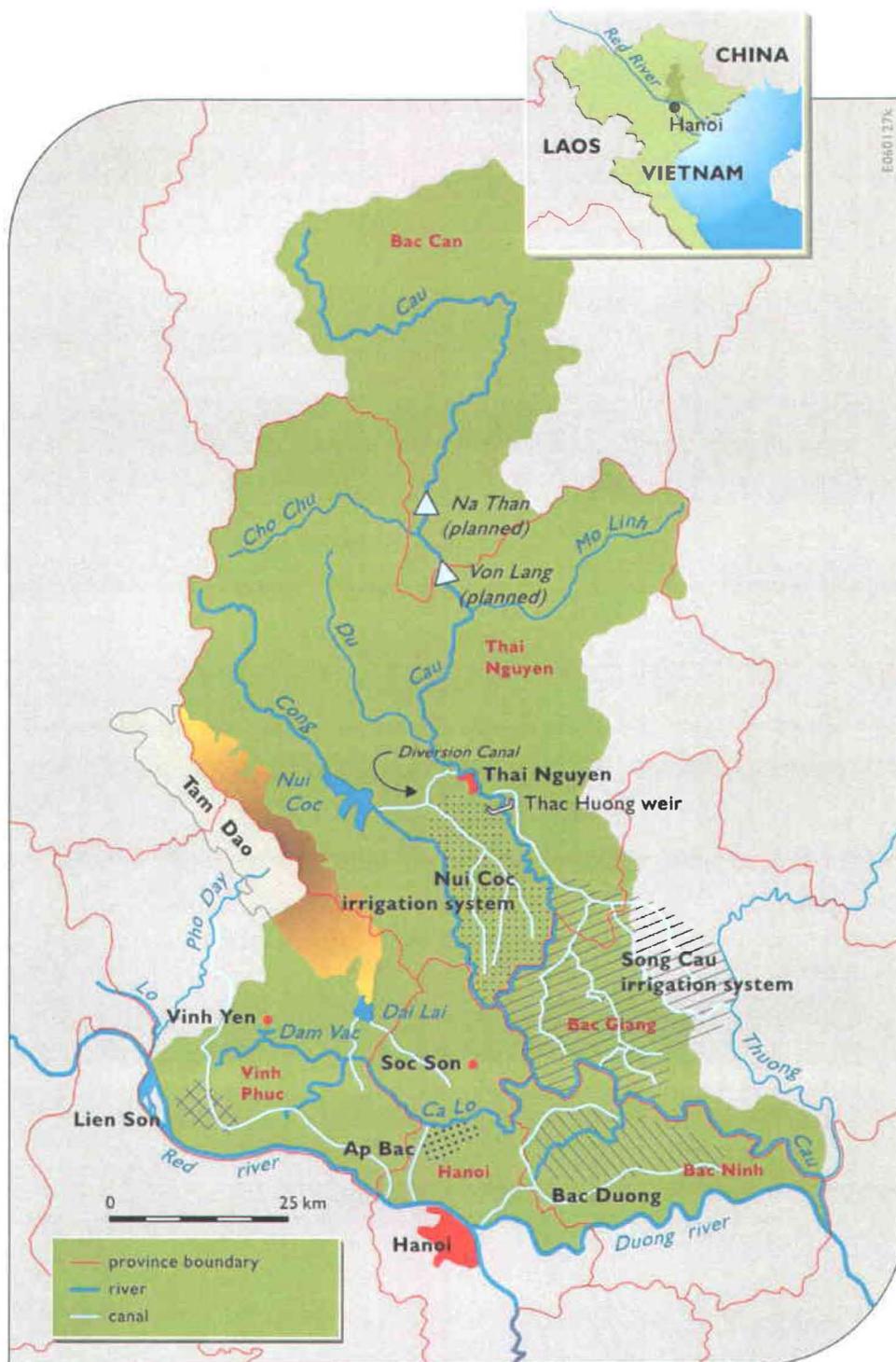


Figure 3-1 : Bassin versant de la rivière Cau (Tiré de : Asian Development Bank, 2006).

Comme plusieurs autres bassins dans les pays du Sud-Est Asiatique, le bassin versant de la rivière Cau fait face à de nombreuses utilisations de l'eau. Les activités humaines sur le bassin de la rivière Cau ont causé de sérieux problèmes écologiques qui entraînent une dégradation de l'environnement de la rivière. Parmi ces problèmes écologiques on peut citer :

- le recul des forêts dû aux activités agricoles et pour la production de bois de chauffe et de bois d'œuvre;
- la pollution de l'air due aux rejets domestiques et industriels;
- la contamination en nutriments (azote et phosphore) des eaux de surface, en raison de l'utilisation abusive des fertilisants;
- la croissance des mauvaises herbes dans la rivière;
- une perte générale de la diversité biologique observée dans certaines parties du bassin;
- la piètre qualité de l'eau dans le bassin versant.

Les problèmes liés aux activités humaines tels que précédemment décrits sont exacerbés par :

- la méconnaissance des outils et des méthodes de gestion disponibles;
- les pénuries d'eau causées principalement par la variabilité spatiale et temporelle de l'offre et de la demande, par la capacité insuffisante du système à transporter l'eau vers les endroits où les besoins sont les plus élevés.

Dans le cadre de sa stratégie nationale 2005-2010 de protection de l'environnement, le pays considère la gestion intégrée des eaux du bassin versant de la rivière Cau comme l'une des priorités. À cet égard, le Vietnam souhaite réaliser un projet de GIEBV dans tout le bassin versant de la rivière Cau dès que possible.

La mise en place d'une GIEBV nécessite de nombreuses connaissances sur l'utilisation et l'occupation du sol ainsi que sur divers processus comme le régime hydrologique, la pluviométrie, le ruissellement, l'érosion des sols et le transport des contaminants. Dans le bassin versant de la rivière Cau, les différents types de données sont rares. Pour pallier à ce manque de données, il est nécessaire d'avoir recours à un modèle hydrologique distribué pouvant permettre d'appliquer la GIEBV. Cette approche permettra de construire une base de données qui pourra servir pour le développement de toutes les autres connaissances nécessaires à la GIEBV (érosion, transports de contaminants, qualité de l'eau en rivière, etc.).

3.2 Modèle HYDROTEL

NOTE : Cette partie est une adaptation des publications de Fortin et al. (1995, 2001, 2007), de Turcotte et al. (2001, 2010), de Villeneuve et al. (2008), du manuel de l'utilisateur d'HYDROTEL (Fortin et Royer, 2004).

Le modèle hydrologique HYDROTEL a été développé au centre Eau, Terre et Environnement de l'Institut national de la recherche scientifique (INRS-ETE, Canada) depuis 1985 (Fortin et al., 1995). Sur le plan spatial, HYDROTEL est un modèle distribué; il subdivise le bassin à l'étude en Unités Hydrologiques Relativement Homogènes (UHRH). Ainsi, une UHRH est un petit sous-bassin versant associé à un tronçon de rivière. À partir d'un modèle numérique d'altitude (MNA), les directions d'écoulement sont déterminées pour chaque cellule en fonction de son altitude relative par rapport à celle de ses huit cellules voisines. En sélectionnant la cellule constituant son exutoire, le bassin versant est donc défini par toutes les cellules se drainant vers la cellule qui est l'exutoire.

Pour tenir compte de l'hétérogénéité plus ou moins grande du bassin, on discrétise le réseau hydrographique en un nombre minimal de mailles. Le réseau d'écoulement est ainsi défini. Lorsqu'il y a des lacs ou des plaines à l'intérieur du bassin versant, il est impossible de déterminer les formes et les superficies des lacs de même que les directions d'écoulement à partir du MNA. On doit alors avoir recours à une modification du MNA et des directions d'écoulement à partir d'un réseau hydrographique vectoriel (RHV). Le RHV est superposé à la matrice d'élévation et les élévations des cellules-rivières sont modifiées de façon à ce que le réseau hydrographique obtenu avec le MNA corresponde au RHV. Les UHRH sont ensuite définies en fonction des confluences des divers tronçons de rivière de manière à associer à chacun des tronçons de rivière le sous-bassin versant auquel il appartient.

Les classes d'occupation et les types de sol représentent d'autres types de données nécessaires en entrée au modèle. Pour chaque UHRH, le pourcentage de chacune des classes d'occupation du territoire peut être estimé à partir de la télédétection. Par contre, un seul type de sol, le type de sol ayant la plus grande superficie à l'intérieur de l'UHRH, est retenu par celle-ci. Pour des raisons de simplification du modèle, des valeurs identiques pour tout le bassin versant sont souvent attribuées à chacun des autres paramètres caractéristiques d'une UHRH (ex. : les coefficients de rugosité de Manning). HYDROTEL offre toutefois la possibilité de former des groupes d'UHRH à l'intérieur du bassin à l'étude de manière à permettre de mieux tenir compte de la variation spatiale des valeurs prises par ces paramètres à l'intérieur du bassin.

Sur le plan temporel, HYDROTEL est un modèle qui fonctionne en continu. Il est capable de faire des simulations au pas de temps horaire mais aussi journalier. Il permet également d'utiliser d'autres pas de temps de simulation sur un même bassin avec un minimum d'ajustement de l'étalonnage du modèle.

Les divers processus hydrologiques intervenant sur un bassin versant, entre les chutes de pluie ou de neige et les débits en rivière, sont considérés dans HYDROTEL comme des sous-modèles. Il divise la simulation des processus hydrologiques en six sous-modèles. Pour chacun des processus hydrologiques, il offre le choix entre un ou plusieurs algorithmes (Tableau A-1 en annexe). La disponibilité de ces divers algorithmes permet de sélectionner le sous-modèle le plus performant sur un bassin donné en tenant compte de la disponibilité des données d'entrée.

Au niveau des calculs, les cinq premiers processus hydrologiques (Tableau A-1) se déroulent au niveau des UHRH, le sixième (l'écoulement par le réseau hydrographique) est simulé sur les tronçons. HYDROTEL a des caractéristiques techniques qui lui confèrent une grande souplesse d'application, ce qui lui permet d'être utilisé, par exemple, pour estimer l'impact sur l'hydrologie de modifications des caractéristiques physiques d'un bassin versant (coupe forestière massive, rotation des cultures, barrage, etc.). Il permet de prévoir les débits en rivière en temps réel en utilisant des prévisions météorologiques. Sa conception est prévue pour que le modèle puisse être facilement modifié en changeant des sous-modèles et des algorithmes ou en en ajoutant d'autres. Ceci rend HYDROTEL particulièrement bien adapté pour une utilisation dans une démarche de gestion intégrée. Il est déjà utilisé avec succès dans une perspective de prévision hydrologique par le Centre d'Expertise Hydrique du Québec. Sa capacité d'application pour la gestion intégrée par bassin versant, dans un climat tropical-mousson comme celui du Vietnam, sera testée dans cette thèse.

3.3 Données

Il existe un outil, PHYSITEL (Fortin *et al.*,1990), qui permet de construire la structure d'écoulement d'un bassin versant à partir d'un MNA et d'un réseau hydrographique vectoriel pour identifier les lacs/réservoirs et les rivières à méandres. Ensuite, le réseau hydrographique peut être exporté sous un format spécifique pour une utilisation par HYDROTEL.

À l'aide de PHYSITEL, il est aussi possible de structurer et de visualiser les données d'occupation du sol et de types de sol sous forme matricielle. Des classes d'occupation du sol ayant des effets significativement différents sur les processus hydrologiques sont formées et

sont caractérisées par des attributs quantitatifs (indice foliaire, profondeur des racines, hauteur de la végétation, albédo). Ces attributs peuvent varier en fonction du temps si des changements d'occupation du sol ne sont pas réalisés.

Des données météorologiques, hydrométriques et nivométriques sont utilisées pour les simulations réalisées avec HYDROTEL. Ces données peuvent contenir : 1) des observations météorologiques aux stations; 2) des prévisions météorologiques à des stations définies; 3) des mesures de débits en rivière; et 4) des mesures nivométriques aux stations. Selon le pas de temps et les sous-modèles choisis pour les simulations, le modèle fait appel aux données dont il a besoin.

Les données disponibles pour effectuer les simulations avec HYDROTEL dans le cadre de cette thèse seront présentées dans les sections suivantes.

3.3.1 Données physiographiques

La nature, la réalité physique associée ainsi que l'origine des différents jeux de données physiographiques utilisés dans le cadre de ce projet sont présentés au tableau 3-1.

Tableau 3-1 : Description des données physiographiques utilisées.

Jeu de données	Nature	Réalité physique associée	Origine
Modèle numérique d'altitude (MNA)	Matricielle	Topographie	Travail réalisé à partir d'une carte de la MÉCV* par Nguyen T.T.
Réseau hydrographique vectoriel (RHV)	Vectorielle	Réseau hydrographique	Travail à partir d'une carte de la MÉCV* de Garon A. (INRS-ETE).
Occupation du sol	Matricielle	Occupation du territoire	Hoang (2007).
Type de sol	Matricielle	Pédologie	Fourni par Tran M.Y. de l'ASVT - une carte de la MECV* (vectorielle). Transformée par l'équipe de Bernier (INRS-ETE) sous forme matricielle.

(*)MÉCV : *Maison d'Édition de Cartes du Vietnam.*

3.3.1.1 Modèle numérique d'altitude (MNA)

La résolution du MNA suggérée pour une application dans HYDROTEL varie entre 50 m (et moins si possible) et 200 m. Dans le cas du bassin versant de la rivière Cau, le MNA utilisé est d'une résolution de 30 m.

3.3.1.2 Réseau hydrographique vectoriel (RHV)

La version initiale du RHV, telle que fournie par la MÉCV, contient une surabondance d'information ainsi que beaucoup de fragments de rivière intermittents. Le RHV original ne correspondait pas *à priori* aux caractéristiques exigées par HYDROTEL (réseau mal connecté) non plus à celles pour la GIEBV (réseau trop détaillé). À partir la carte de la MÉCV, le RHV original (Figure A-1 en annexe) a été simplifié et corrigé pour qu'il soit compatible avec HYDROTEL (Figure A-2 en annexe) et conforme avec les besoins de GIEBV. Le tableau A-2 en annexe énumère les différentes étapes de traitements nécessaires à l'aide du SIG PHYSITEL afin d'obtenir le résultat attendu.

3.3.1.3 Occupation du sol

À partir de données réparties sur le territoire pour une maille donnée, l'occupation du sol est redistribuée sur chaque UHRH en fonction du pourcentage de chacune des classes d'occupation du sol à l'intérieur de l'UHRH. Les données d'occupation du sol ont été fournies par Hoang (2007). L'auteur a construit des cartes d'occupation du sol de sept classes pour le bassin de la rivière Cau à partir d'images satellites de 2003. La figure A-3 présente la carte d'occupation du sol utilisée dans le cadre de cette thèse et les pourcentages des différentes classes sont présentés en annexe (Tableau A-3). Ces classes sont : agricole, forestier, eau, urbain, sol nu, agri-hab-plant et arbustif. La classe « agri-hab-plant » est une classe d'occupation mixte formée de champs agricoles, de petits villages (habitations) et de plantations forestières. C'est la dominante d'occupation du sol répartie sur 43,28 % de la superficie du bassin. La deuxième classe dominante est la classe « forestier » occupant 36,55 % de la superficie du bassin. La troisième classe est « agricole » avec 8,21 %. Les autres classes occupent moins de 5 % de la superficie du bassin. La difficulté de faire la distinction entre les occupations agricole, habitation et plantation due à la forte hétérogénéité dans certaines parties du bassin et à la faible résolution spatiale des images satellites, pourrait avoir des impacts sur la

capacité de reconstruire un bon régime hydrologique sur le bassin versant de la rivière Cau avec le modèle HYDROTEL.

3.3.1.4 Types de sols

Tout comme pour l'occupation du sol, la caractérisation des types de sol s'opère par le biais d'une distribution matricielle à laquelle est associée une classification pédologique des sols régissant l'attribution de propriétés hydrodynamiques. Pour chaque maille, des propriétés hydrodynamiques sont attribuées en fonction d'une classification contenant 12 textures de sol (Annexe, Tableau A-4). Ces textures correspondent aux classes de Rawls et Brakensiek (1989), proposées dans HYDROTEL. Pour chaque UHRH, on retient le type de sol dont le pourcentage est le plus élevé dans l'UHRH. Selon la carte des types de sol obtenue dans le cadre de cette thèse et en tenant compte des règles spécifiques à HYDROTEL pour la classification des sols, les deux classes dominantes dans le bassin d'étude sont : « *Silty_clay_loam* » et « *Loam* ». Il y a quatre classes prédéterminées (*Sand*, *Loamy_Sand*, *Sandy_Clay_Loam* et *Sandy_Clay*) dans la liste des types de classes d'HYDROTEL. Cependant, ces classes n'existent pas dans le bassin d'étude. Six autres classes (*Sandy_loam*, *Silty_loam*, *Clay_loam*, *Silty_Clay*, *Clay*, *Rocky*) sont très peu représentées dans le bassin d'étude. La présence ou non de chaque classe de type de sol est dépendante du niveau de détail en nombre d'UHRH (Figure A-4 et Tableau A-5 en annexe).

3.3.1.5 Indice foliaire

L'indice foliaire (IF) mesure la surface de feuille par unité de surface au sol (m^2/m^2). L'IF est utilisé pour déterminer l'évaporation du sol. Pour le bassin d'étude, ces données ne sont pas disponibles. En plus, l'échelle de culture est très petite, de quelques dizaines à quelques centaines de m^2 et il y a plusieurs types de plantes dans chaque champ. Par conséquent, sur la carte, il est possible de classer chaque région de façon très générale au sein de l'une des classes d'occupation du sol.

Pour les besoins des simulations, il a fallu supposer des valeurs d'IF pour chaque classe d'occupation du sol en se basant sur des travaux publiés dans d'autres pays. Ainsi, différentes valeurs d'IF ont été considérées pour les différentes classes (Tableau A-6 en annexe) :

- Pour les classes eau, urbain et sol nu, la valeur considérée est de 0.

- La classe agricole contient deux types de surfaces réservées pour des cultures saisonnières et pérennes. Sur les terres occupées par les plantes saisonnières, les plantes sont remplacées les unes par les autres tout au long de l'année. Il s'agit du riz, du maïs, de la pomme de terre, de la tomate, du concombre, etc. Sauf dans le cas des rizières, sur ces terres on peut trouver différents arbres fruitiers à la même saison étant donné que les propriétaires cultivent aussi certaines plantes en fonction de la demande du marché. Les plantes pérennes sont le thé, l'abricotier, le caféier, etc. Notons qu'il n'existe ni de période de feuilles mortes ni aucune période de sécheresse pas plus que de gel. Ainsi, les terres dites « agricoles » sont toujours vertes dans cette région. On suppose que la variation de la surface des feuilles est négligeable au cours de l'année. On fixe alors l'IF à 3 pour cette occupation du sol.
- Le bassin versant de la rivière Cau se situe dans la région tropicale où l'occupation du sol de type « forestier » est constituée de forêts à feuilles persistantes. Ce sont des types de forêt entièrement constitués d'arbres à feuillage vert toute l'année. Ces forêts sont denses, multicouches et hébergent une grande variété d'espèces. Par conséquent, on fixe une valeur unique égale à 5 pour l'IF pour cette classe d'occupation du sol.
- Les valeurs de l'IF des classes d'occupation agricole et mixte (agricole-habitation-plantations) ont été fixées égales à 2.

Les valeurs d'IF fixées sont considérées comme constantes au cours de l'année et ceci pour toutes les classes d'occupation. Il est important de préciser que le fait de disposer de valeurs estimées pour des variables comme l'IF permettrait aussi de tester la capacité du modèle à obtenir des résultats satisfaisants. L'un des objectifs de cette étude est d'arriver à obtenir des résultats satisfaisants pouvant servir de base pour la mise en place de la GIEBV dans un contexte de données restreintes.

3.3.1.6 Profondeur des racines

La profondeur des racines (PR) représente la limite inférieure du sol atteinte par les racines du couvert végétal. Ce paramètre intervient dans le calcul de la transpiration par les racines du couvert végétal. Selon Canadell *et al.* (1996), la profondeur maximale des racines pour une forêt tropicale est autour de 7,3 m pour les arbres et de 2,6 m pour les plantes herbacées. Pour sa part, Crow (2005), dans une synthèse tirée de plusieurs articles antérieurs portant sur les variations de profondeur racinaire, conclut que 80 % à 90 % des racines se situent à moins de 60 cm de profondeur. Seulement 5 % des racines se situent au-delà de 2 m de profondeur. Tout

comme les indices foliaires, les données de profondeurs racinaires ne sont pas disponibles pour le bassin d'étude. Pour les classes d'occupation du sol *eau, urbain et sol nu*, la profondeur racinaire considérée est de 0, étant donné que la végétation est presque absente dans ces classes d'occupation. Les valeurs de profondeur racinaire pour les autres classes d'occupation ont été choisies en se basant sur une méthode semblable à celle du choix des valeurs d'indice foliaire (Tableau A-7 en annexe). Tout comme pour l'indice foliaire, les valeurs estimées de profondeur racinaire permettraient de savoir s'il est possible d'obtenir des résultats satisfaisants dans le contexte de données estimées pour certaines variables.

3.3.2 Données hydrométriques

Les données de débits interviennent dans les processus d'étalonnage et de validation du modèle hydrologique. Dans le cadre de cette étude, l'un des problèmes était celui de la disponibilité des données de débits. Au début de l'étude, la station Gia Bay (identifiée par le code 777726, Figure 3-2) située en aval de la zone d'étude était la seule station pour laquelle des données étaient disponibles. Comme l'un des objectifs de cette étude est de tester le modèle dans des conditions de données restreintes, cette station a été retenue pour effectuer l'étalonnage d'HYDROTEL, puis ensuite pour valider les résultats de simulation.

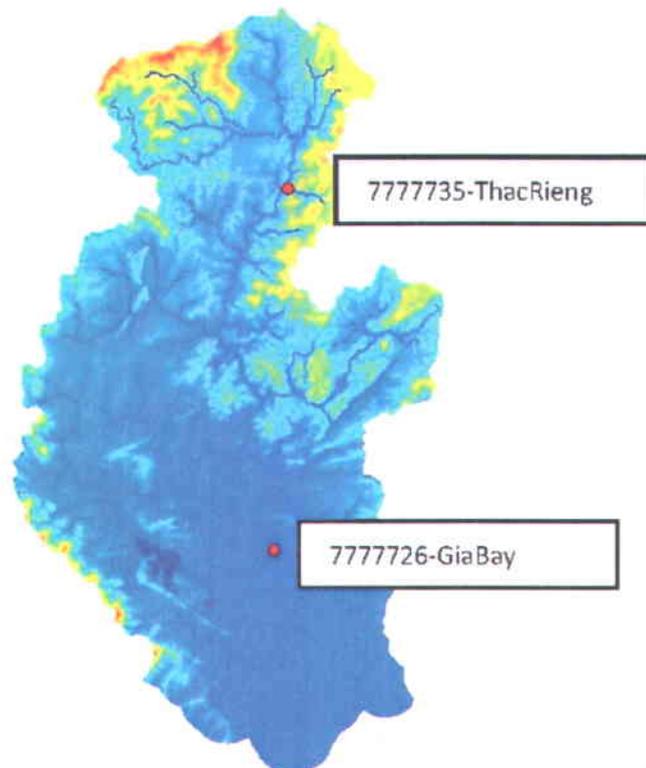


Figure 3-2 : Stations hydrométriques.

Les mesures d'une autre station de débits ont été disponibles un an après le début de l'étude. Cette station est celle de Thac Rieng, située en amont du bassin versant (identifiée par le code 777735, Figure 3-2). Les débits observés à la station Thac Rieng ont été utiles pour tester la capacité du modèle HYDROTEL à simuler le régime hydrologique dans la partie amont du bassin. Notons que les données fournies par cette station n'ont pas été utilisées pour l'étalonnage (Chapitre 7). Les détails concernant les données de ces deux stations sont résumés au tableau A-8 en annexe.

3.3.3 Données météorologiques

Dans le cadre de ce projet de recherche, les séries de données météorologiques disponibles dans le bassin versant de la rivière Cau couvrent la période de 1997-2006. Ces données proviennent de 32 stations météorologiques. Les données journalières collectées et utilisées en entrée pour les simulations d'HYDROTEL comprennent cinq variables météorologiques : les

températures minimales et maximales de l'air, les précipitations totales journalières, la vitesse moyenne du vent, l'humidité de l'air et la durée d'ensoleillement. On a deux types de stations météorologiques : des stations permettant de mesurer les cinq variables et des stations où uniquement les pluies totales journalières sont mesurées. Ces dernières stations sont des stations pluviométriques.

Parmi les 32 stations, 18 possèdent des séries complètes de données. Par conséquent, elles ont été retenues pour les simulations hydrologiques pour la période 1997-2006. Pour ces 18 stations, 12 stations sont des stations pluviométriques alors que les six autres, en plus de la pluie, fournissent des données de cinq autres variables météorologiques. Il s'agit de stations météorologiques. Cependant pour les stations météorologiques, seules les données de températures maximales et minimales sont des séries complètes. Les détails sur les données météorologiques sont présentés en annexe (Tableaux A-9 et A-10, Figures A-5 et A-6 en annexe).

3.3.4 Synthèse

Les données d'entrée du modèle HYDROTEL sont nombreuses et de natures diverses : le modèle numérique d'altitude (MNA), le réseau vectoriel imposé (RVI), l'occupation du sol, les types de sol et les données hydrométéorologiques. Les données disponibles dans le cadre de ce projet de recherche couvrent la période allant de 1997 à 2006, soit dix années consécutives. Le traitement des données d'entrée implique une lourde charge de travail. Une définition adéquate des objectifs de modélisation permet d'encadrer l'effort de traitement. Les sources de données ainsi que les hypothèses qui soutiennent le traitement sont nombreuses et font référence à différents champs d'expertise; il est donc difficile pour un seul modélisateur de maîtriser adéquatement tous les aspects.

Quant à la fiabilité des données, les travaux de Nguyen (2009) ont confirmé l'homogénéité des données de pluies enregistrées aux stations du bassin versant de la rivière Cau. Par conséquent, la base de données fournie par l'Académie des Sciences et Technologies du Vietnam (ASTV) a été considérée comme fiable pour pouvoir être utilisée dans cette étude. Les données de débits proviennent également des mêmes sources (ASTV) que les données de pluies. Il est raisonnable de supposer que ces données de débits sont également fiables pour servir de base pour les simulations hydrologiques dans le cadre de cette étude.

3.4 Application du modèle HYDROTEL

3.4.1 Choix des sous-modèles

Pour simuler chacun des processus, HYDROTEL dispose de plusieurs sous-modèles. En fonction des données disponibles et des leçons tirées de précédentes études sur l'utilisation d'HYDROTEL (Fortin *et al.*, 1995; 2001; Tremblay, 2002; Rousseau *et al.*, 2000 et 2008; Armando, 2007; Kouamé *et al.*, 2007; Ricard, 2008) la sélection des algorithmes de calcul dans le cadre de cette étude est celle présentée au tableau 3-2.

Tableau 3-2 : Algorithmes sélectionnés pour les simulations HYDROTEL.

Sous-modèle	Algorithme sélectionné
Interpolation des données météorologiques	Moyenne pondérée des trois stations les plus proches
Évapotranspiration potentielle	Hydro-Québec
Bilan d'eau vertical	BV3C
Écoulement vers le réseau hydrographique	Onde cinématique
Écoulement dans le réseau hydrographique	Onde cinématique

3.4.2 Choix des paramètres pour l'étalonnage

Les paramètres choisis pour l'étalonnage sont des paramètres ajustables ou les paramètres physiques pour lesquels les données ne sont pas disponibles. Au total, 14 paramètres ont été retenus pour l'étalonnage du modèle et il existe également différentes raisons pour lesquelles certains paramètres ne peuvent pas être retenus dans ce processus d'étalonnage dans le cas du bassin versant d'étude (Tableau 3-3). Les paramètres retenus pour l'étalonnage du modèle interviennent dans différents processus hydrologiques. Une description détaillée des processus, algorithmes et équations correspondants est présentée en annexe (Annexe B).

3.4.3 Choix des indicateurs de performance

Pour évaluer la qualité des simulations, la méthode consiste à comparer les hydrogrammes observés et simulés pour plusieurs jeux de paramètres. Dans cette étude, trois indicateurs différents de performance ont été examinés :

- Le coefficient de Nash-Sutcliffe (NS), qui reflète les grands écarts associés aux pics de crue.
- La Racine Carrée de l'Erreur Quadratique Moyenne (RCEQM), qui est utilisée comme deuxième indicateur. Il permet de départager des simulations dont l'erreur relative moyenne sur les débits et le coefficient de NS sont similaires.
- L'Erreur Relative Sur le Volume de l'Écoulement Total (ERSVET), qui indique le pourcentage de différences entre les débits mesurés et simulés sur la période de simulation.

Une synthèse des indicateurs de performance est présentée au tableau 3-4. Il faudrait préciser que ces trois indicateurs seront utilisés pour porter un jugement sur la qualité des simulations tout au long de la thèse. La procédure d'étalonnage dans HYDROTEL a été considérablement accélérée par le fait que ce modèle dispose d'un module de calcul automatique de ces trois indicateurs pour chaque simulation.

Tableau 3-3 : Paramètres d'étalonnage du modèle HYDROTEL

Processus	Paramètre	N°	Abréviation	Type	Commentaires
Interpolation des données météorologiques	Gradient vertical des précipitations				Nécessite une bonne connaissance de la variation verticale des précipitations et des effets topographiques.
	Gradient vertical des températures	1	GVT	Physique	
	Température de passage de la pluie à la neige				
Évolution du couvert nival	11 paramètres				Important uniquement pour la fonte de neige. Paramètre non nécessaire dans la zone d'étude.
Évapotranspiration potentielle	Coefficient multiplicatif d'optimisation de l'évapotranspiration potentielle	2	ETP	Ajustement	
Bilan d'eau vertical	Limite inférieure de la couche 1	3	Z1	Ajustement	La condition initiale d'humidité affecte les résultats uniquement en début de simulation, jusqu'au moment où une précipitation provoque du ruissellement.
	Limite inférieure de la couche 2	4	Z2	Ajustement	
	Limite inférieure de la couche 3	5	Z3	Ajustement	
	Humidité relative initiale de la couche 1				
	Humidité relative initiale de la couche 2				
	Humidité relative initiale de la couche 3				
	Coefficient d'extinction du rayonnement solaire	6	DES	Ajustement	

Tableau 3-3 (suite)

Processus	Paramètre	N°	Abréviation	Type	Commentaires
Bilan d'eau vertical (suite)	Coefficient de récession	7	CDR	Ajustement	
	Coefficient additif d'optimisation de la classe du sol	8	CAOC	Ajustement	
	Coefficient multiplicatif d'optimisation de l'assèchement				Paramètres permettant de prévenir les instabilités numériques.
	Variation maximale de l'humidité relative par pas de temps				
	Indice foliaire	9	IF	Physique	Données physiographiques.
	Profondeur racinaire	10	PR	Physique	
Écoulement vers le réseau hydrographique	Coefficient de rugosité de Manning des milieux forestiers	11	RMMF	Physique	
	Coefficient de rugosité de Manning de l'eau	12	RME	Physique	
	Coefficient de rugosité de Manning des autres milieux	13	RMAM	Physique	
	Lame de référence pour l'hydrogramme géomorphologique	14	LR-HGM	Ajustement	
Écoulement dans le réseau hydrographique	Coefficient d'optimisation de la rugosité				Considérer si la valeur est très différente de celle fournie par défaut.
	Coefficient d'optimisation des largeurs des rivières				Considérer si la largeur est différente de celle fournie par défaut.

Tableau 3-4 : Indicateurs de performance des simulations.

Indicateur	Équation	Remarques
NS	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2}$	Bon quand près de 1; peut varier de $-\infty$ à 1. Plus la valeur du NS s'approche de l'unité, meilleure est la simulation. Lorsque cette valeur est égale à 0, ceci signifie que le modèle réagit de manière comparable à un modèle rudimentaire qui donnerait, comme débit simulé pour chaque pas de temps, la valeur moyenne des débits observés pour la période de simulation. Dans le cas où $NS < 0$, ceci signifie que la moyenne des valeurs observées est un meilleur estimateur de débits que les résultats du modèle (Fortin <i>et al.</i> , 1995).
RCEQM (m ³ /s)	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n^2}}$	Bon quand près de 0; peut varier de 0 à l'infini. Coefficient plus sensible aux erreurs de grands débits que de faibles débits. Bon indicateur du synchronisme (Turcotte <i>et al.</i> , 2003).
ERSVET (%)	$\frac{\sum_{i=1}^n (O_i) - \sum_{i=1}^n (S_i)}{\sum_{i=1}^n (O_i)} * 100$	Bon quand près de 0.

O_i : Débits observés

S_i : Débits simulés

n : nombre total de pas de temps i : indice du pas de temps



4 ANALYSE DE SENSIBILITÉ

4.1 Introduction

En modélisation hydrologique, une analyse de sensibilité peut être réalisée pour différentes raisons. Elle peut permettre de comprendre la réponse hydrologique d'un bassin versant face à la variation des paramètres, comprendre le comportement du modèle sans qu'il y ait forcément une signification physique aux niveaux de variation des paramètres, etc. L'objectif de ce chapitre est d'effectuer une analyse de sensibilité pour comprendre le comportement du modèle face à la variation des valeurs des paramètres d'entrée en vue de l'amélioration de l'étalonnage. Par conséquent, les résultats de cette analyse aideront essentiellement à effectuer un meilleur étalonnage du modèle HYDROTEL avec différents niveaux de discrétisation spatiale en UHRH (Chapitre 6). L'un des objectifs de cette thèse est d'identifier un découpage spatial jugé suffisant pour ce bassin pour la mise en place de la GIEBV; un bon étalonnage est donc nécessaire. Par ailleurs, les résultats de l'analyse de sensibilité aideront également à mieux définir une campagne de collecte de données pour l'utilisation du modèle HYDROTEL dans des bassins versants aux conditions climatiques similaires à celles de la rivière Cau. L'analyse de sensibilité est précédée d'un étalonnage préliminaire. Cet étalonnage a permis de déterminer rapidement un premier jeu de paramètres pour permettre à HYDROTEL de représenter, avec une précision satisfaisante, le comportement « global » du bassin versant en utilisant un nombre relativement restreint d'unités hydrologiques relativement homogènes (UHRH).

4.2 Étalonnage préliminaire

4.2.1 Discrétisation du bassin versant à l'étude

En général, une subdivision du bassin versant comptant environ 150 à 300 UHRH est suffisante pour établir un premier étalonnage du modèle (Fortin, communication personnelle). Ainsi, le bassin a été divisé en 235 UHRH (Figure 4-1).

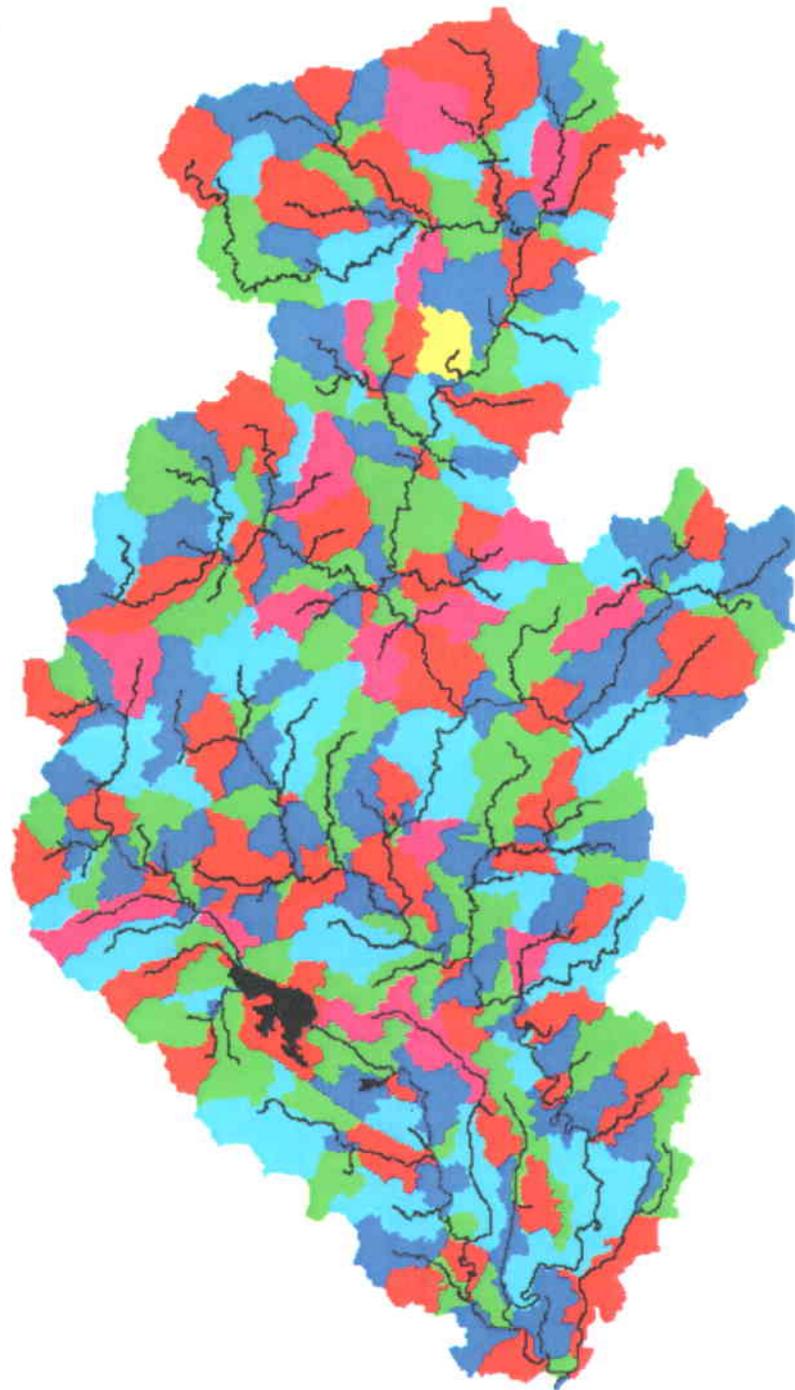


Figure 4-1 : Subdivision du bassin en 235 UHRH.

4.2.2 Périodes d'étalonnage et de validation

4.2.2.1 Étalonnage

La période d'étalonnage choisie est sélectionnée de manière à représenter le mieux possible les caractéristiques du régime hydrologique sur le bassin versant étudié, compte tenu de la période de données disponibles. Dans le cas présent, la période d'étalonnage retenue s'étend du 1^{er} janvier 1997 au 31 décembre 2001. Les années 1997 à 2000 ont des débits annuels légèrement inférieurs au débit moyen des observations des dix années de données disponibles (Figure 4-2). Le débit annuel de 1999 est le minimum sur la période d'étude. Ce débit représente 69,1 % de la moyenne des dix ans. Le débit le plus élevé, celui de 2001, correspond à 195,3 % du débit moyen. Ainsi, la période de 1997-2001 est représentative des changements de débits dont il faut tenir compte pour un bon étalonnage. La figure 4-2 illustre les débits moyens annuels au cours de ces années par rapport à la moyenne sur la période d'étude.

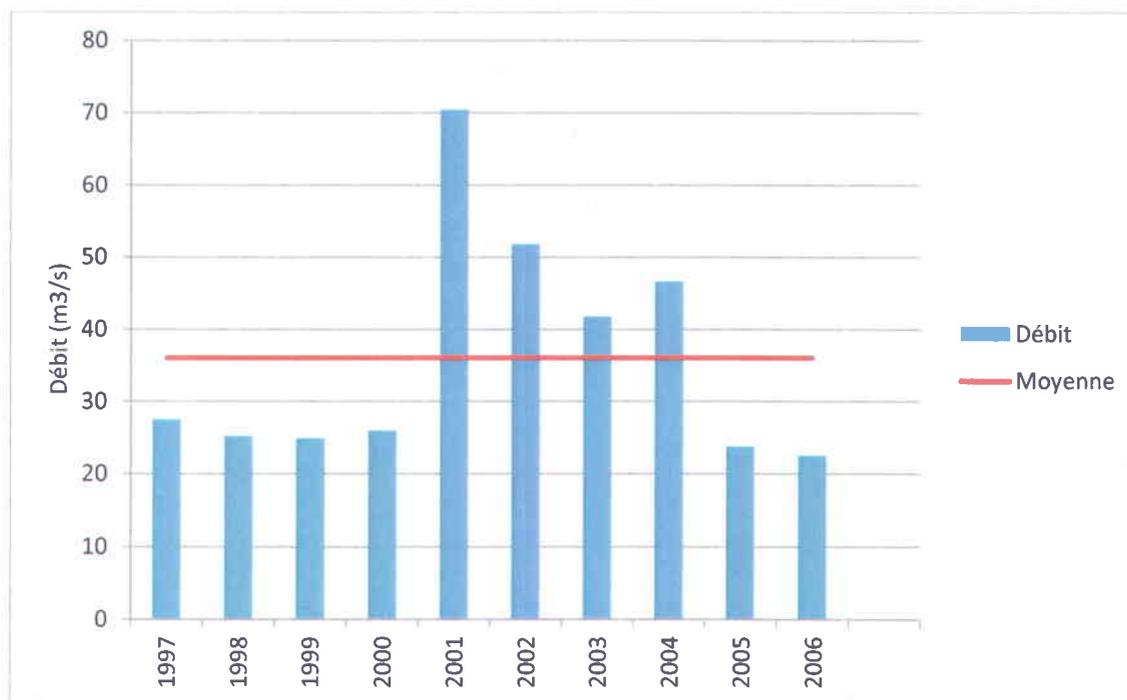


Figure 4-2 : Débits moyens annuels au cours des dix années.

4.2.2.2 Validation

La période retenue pour la validation débute le 1^{er} janvier 2002 pour se terminer le 31 décembre 2006. Les années de 2002 à 2004 ont des débits annuels plus élevés que la moyenne sur les dix ans (Figure 4-2). Ainsi, l'année 2002 a un débit annuel égal à 143,7 % de la moyenne des dix ans. Par ailleurs, les débits annuels de 2005 et 2006 sont respectivement de 66 % et de 62,5 % du débit moyen sur la période d'étude. Comme on peut le voir sur la figure 4-2, la période d'étalonnage et la période de validation n'ont pas des régimes hydrologiques tout à fait similaires. Compte tenu du faible nombre d'années de données disponibles, il n'a pas été possible de sélectionner des années ayant des régimes hydrologiques similaires pour l'étalonnage et pour la validation.

4.2.3 Résultats

4.2.3.1 Étalonnage

Dans le but de présenter plus clairement les débits observés et les résultats de débits simulés pour la période d'étalonnage préliminaire, une comparaison a été faite pour chacune des années de la période d'étalonnage. Les résultats de l'année 1997, qui correspond à la première année, sont présentés à la figure 4-3. Ceux des autres années sont, quant à eux, présentés en annexes (Figures A-7 à A-10), sauf pour la période juillet-septembre (période de fortes précipitations) où l'on constate qu'il y a de plus grands écarts entre les débits observés et simulés. On peut remarquer, de manière générale, que les résultats coïncident bien la majorité du temps.

Au-delà de l'illustration qui permet d'apprécier, dans leur globalité, les simulations par rapport aux observations, il nous paraît important de présenter les détails des résultats. Ainsi, le tableau 4-1 résume les résultats détaillés de l'étalonnage préliminaire. L'écoulement total simulé est, à toutes fins utiles, identique à l'écoulement total observé. En effet, l'erreur relative sur le volume de l'écoulement total (ERSVET) est proche de 0 %. Ceci indique un excellent étalonnage du modèle en tenant compte du réseau météorologique utilisé. De plus, l'indicateur de Nash-Sutcliffe (NS) est de 0,84 et celui de la RCEQM est relativement faible, soit 1,03 m³/s.

Comme on peut le constater, les résultats obtenus indiquent que le modèle HYDROTEL permet de réaliser des simulations qui représentent très bien le régime hydrologique du bassin à l'étude. La précision atteinte lors de l'étalonnage est confirmée au tableau 4-1. Cependant, les débits observés en période de crue sont presque toujours plus élevés que les débits simulés.

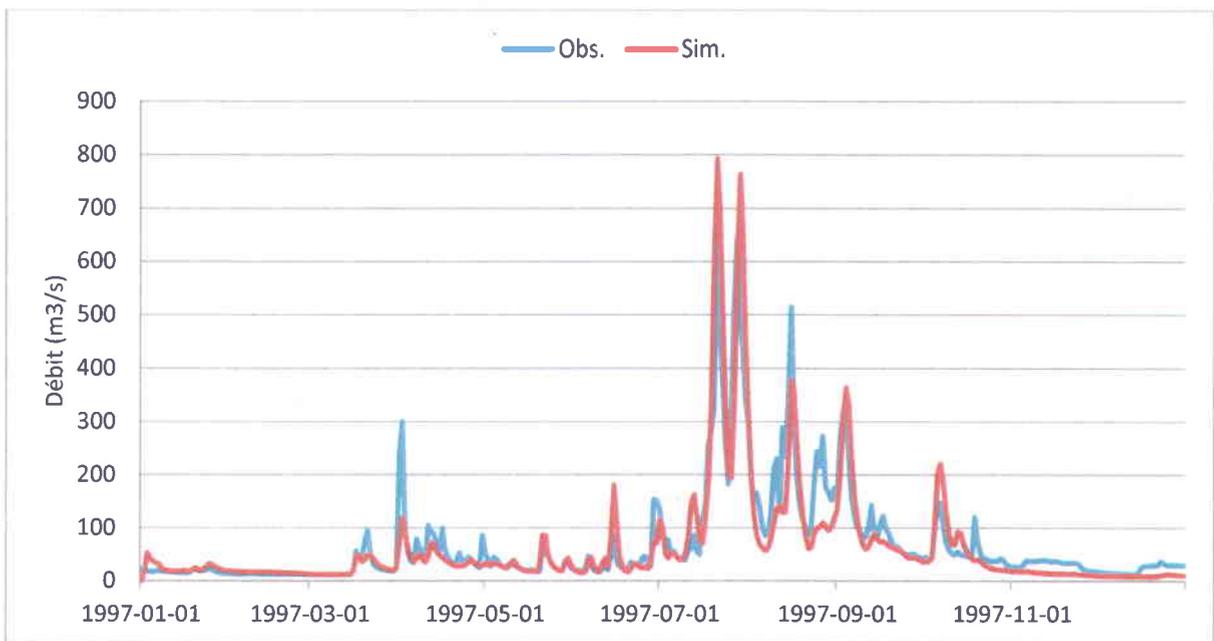


Figure 4-3 : Résultats de l'étalonnage du modèle pour l'année 1997, projet 235 UHRH.

Tableau 4-1 : Résultats de l'étalonnage préliminaire - Projet 235 UHRH.

Indicateurs	Étalonnage (1997-2001)	Validation (2002-2006)
NS	0,84	0,67
RCEQM (m ³ /s)	1,03	1,23
ERSVET (%)	-0,06	-0,18

4.2.3.2 Validation

Comme pour l'étalonnage préliminaire, la comparaison des débits observés et simulés pour la période entière de validation préliminaire, soit 2002-2006, est présentée année par année. Les résultats de l'année 2002 sont présentés à la figure 4-4 et ceux des autres années se trouvent en annexes (Figures A-11 à A-14). En général, les débits simulés et observés coïncident en période d'étiage, mais les débits simulés sont sous-estimés en juin et en juillet. Toutefois, le modèle simule bien les plus grandes crues. Sur la base de l'ensemble des résultats, il apparaît que le modèle HYDROTEL reproduit relativement bien le régime hydrologique du bassin à l'étude.

Le tableau 4-1 présente aussi les valeurs des indicateurs sur la période de validation allant de 2002 à 2006. L'indicateur d'erreur relative sur le volume de l'écoulement (ERSVET) est de -0,18 %, ce qui est une très bonne valeur. Par ailleurs, le coefficient de NS de cette période est de 0,67, et donc, moins élevé que souhaité. Les années 2004 et 2005 sont celles pendant lesquelles les simulations sont nettement les moins bonnes, les crues simulées ayant tendance à surestimer les crues observées. Ceci pourrait s'expliquer par diverses raisons :

- Les données de pluie de l'une des stations météorologiques, proche de la station de débit en amont du bassin (Thac Rieng), sont des données interpolées pour la période 2003-2004.
- Des aménagements ayant eu lieu dans le bassin n'auraient pas été répertoriés. Il s'agit en particulier de barrages mis en service, non répertoriés dans les bases de données officielles, dont les caractéristiques et règles de gestion ne sont pas connues. Par conséquent, ils n'ont pas été pris en compte dans le modèle pour les simulations.

- Des prélèvements d'eau pour divers besoins (alimentation en eau en potable, irrigation de rizières) n'ont pas été inventoriés dans les données officielles disponibles dans le cadre de ce projet.

Pour une période de cinq années de validation au cours de laquelle le régime hydrologique n'est pas similaire à celui de l'étalonnage, on peut considérer que les résultats obtenus pour la période de validation préliminaire sont acceptables.

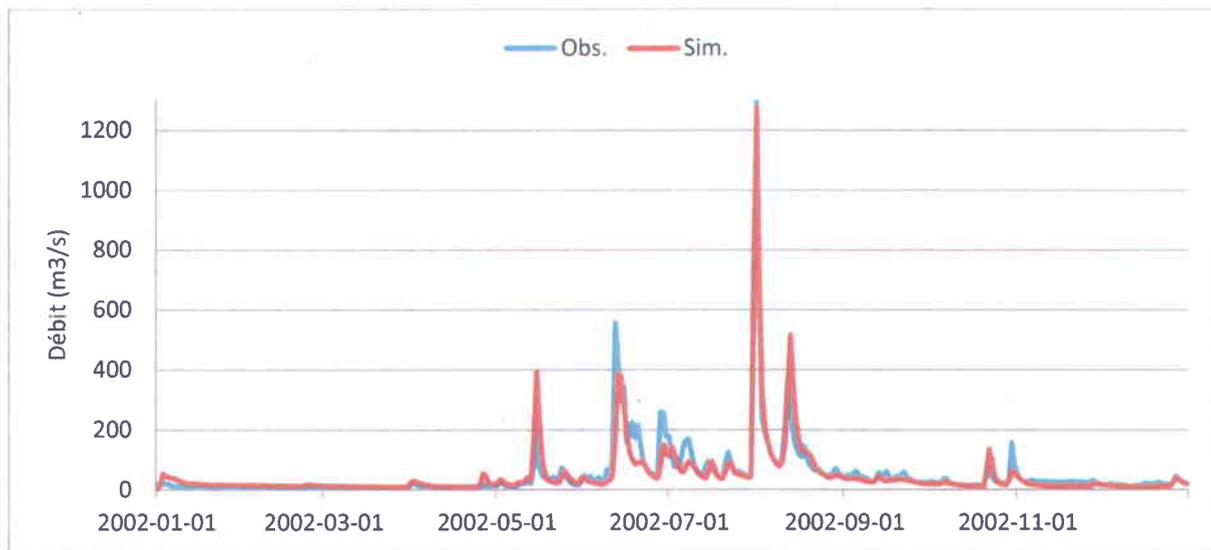


Figure 4-4 : Résultats de la validation du modèle pour l'année 2002 – Projet 235 UHRH.

4.2.4 Synthèse

Les résultats obtenus à l'étape préliminaire d'étalonnage et de validation nous permettent de considérer que le modèle HYDROTEL peut représenter adéquatement le régime hydrologique du bassin versant à l'étude. Cependant, le fait d'avoir des débits en période de crue qui soient presque toujours surestimés amènent à une hypothèse probable selon laquelle les mesures de débits, dans ces périodes de fortes précipitations, n'auraient pas été faites de manière adéquate. En effet, les mesures sont souvent manuelles et il existe une difficulté d'accès au site. Ces résultats d'étalonnage préliminaire permettent de procéder à l'analyse de sensibilité.

4.3 Méthodologie d'analyse de sensibilité

La période choisie pour réaliser l'analyse de sensibilité comporte cinq années consécutives qui vont du 1^{er} janvier 1997 au 31 décembre 2001. On peut supposer que l'influence de certains paramètres pourrait être différente si l'analyse avait été réalisée selon les périodes saisonnières. Cependant, dans ce chapitre, on ne s'intéresse pas à la sensibilité du modèle à la variation des valeurs prises par les paramètres sur les périodes saisonnières. En effet, la mise en place d'une GIEBV nécessite le suivi de la variation des paramètres et des activités sur le bassin sur une période de temps suffisamment longue. L'analyse de sensibilité a été effectuée avec 14 paramètres, qui sont des paramètres physiques ou d'ajustement (Tableau 3-3, Chapitre 3). Pour déterminer la sensibilité d'un paramètre, on modifie la valeur de référence de ce paramètre tout en gardant les valeurs de référence des autres paramètres inchangées pour faire les simulations. Il s'agit de la méthode « un paramètre à la fois » de Morris (1991). Sur la base de cette méthode, la sensibilité d'un paramètre peut être évaluée en calculant l'écart relatif annuel E de l'indicateur sélectionné selon l'expression suivante :

$$E = \frac{(I_{ref.} - I_{mod.})}{I_{ref.}} * 100\% \quad (4.1)$$

Avec :

I = indicateur sélectionné (coefficient de Nash-Sutcliffe, la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne et l'erreur relative sur le volume de l'écoulement total).

$ref.$ = valeur de l'indicateur pour la simulation de référence.

$mod.$ = valeur de l'indicateur pour la simulation après modification de la valeur du paramètre.

Les niveaux de variation des paramètres retenus pour cette analyse n'ont pas forcément une signification physique étant donné que l'idée est de comprendre, pour des niveaux identiques de variation des paramètres, quels paramètres seraient les plus influents sur la réponse du modèle. L'identification de ces paramètres permettra d'améliorer l'étalonnage du modèle. On s'intéresse alors à l'impact des mêmes niveaux de variation des paramètres sur la réponse du modèle.

Excepté pour le coefficient additif d'optimisation de la classe de type de sol, les différentes valeurs de chaque paramètre sont obtenues en appliquant -50 %, -25 %, 25 % et 50 % de

variation à la valeur de référence du paramètre. Dans le cas du paramètre CAOC, les valeurs choisies pour les différentes simulations sont des valeurs qui dépendent du type de sol et cette méthode sera exposée à la section 4.4.1. Pour chaque cas de variation de la valeur de référence, les variations résultantes des valeurs de l'indicateur de simulation seront comparées. Pour apprécier l'impact des variations des paramètres sur des valeurs annuelles d'un indicateur de simulation, une grille a été considérée (Tableau 4-2). L'interprétation des résultats sera faite en matière d'amélioration ou de détérioration des résultats de simulation, par rapport aux valeurs des indicateurs de performance dans la situation de référence.

Tableau 4-2 : Grille d'appréciation de l'impact de la variation des paramètres sur l'indicateur.

Pourcentage absolu $ p $ de l'écart relatif annuel (%)	$p=0$	$0 < p \leq 5$	$5 < p \leq 10$	$ p > 10$
Impact considéré	Aucun	Faible	Moyen	Élevé

Pour les 14 paramètres sélectionnés dans le cadre de cette analyse, trois paramètres sont considérés comme spéciaux : le coefficient additif d'optimisation de la classe du sol (CAOC), l'indice foliaire (IF) et la profondeur racinaire (PR). Les résultats pour ces paramètres seront présentés à la section 4.4 et les résultats pour les 11 autres paramètres seront exposés à la section 4.5.

4.4 Résultats d'analyse de sensibilité des paramètres spéciaux

4.4.1 Coefficient additif d'optimisation de la classe du sol (CAOC)

Dans HYDROTEL, les différents types de sol sont classés selon leurs propriétés hydrauliques, débutant par le sol à texture la plus grossière, soit le sable (classe 1), et se terminant par le sol à texture la plus fine, soit l'argile (classe 11) (Tableau A-4 en annexe). Le CAOC permet de faire varier l'ensemble des propriétés hydrauliques du sol. Lorsque les différents types de sol ne sont pas connus de façon exacte dans un bassin, on peut modifier ce paramètre pour changer toutes les caractéristiques du sol sur le bassin. La modification peut se faire en remontant dans la liste, pour une valeur négative, vers les sables et en descendant, pour une valeur positive, vers les argiles. Dans le cas du bassin d'étude, la carte des types de sol est disponible. Cependant, les

caractéristiques physiques réelles de chaque type de sol dans le bassin versant ne sont pas connues. Les valeurs par défaut proposées dans HYDROTEL ont été retenues pour l'analyse de sensibilité. Pour les besoins de l'étude, la valeur de ce paramètre a été modifiée dans le but d'évaluer la sensibilité du modèle dans le cas où les caractéristiques physiques des sols ne sont pas disponibles. Dans le bassin à l'étude, on peut déterminer à partir de la carte des types de sols qui représentent les classes majoritaires. Ainsi, la classe '*silty_clay_loam*' est la classe majoritaire, suivie de la classe '*loam*'. L'impact de ce paramètre avec des valeurs modifiées (-1; -2, -3, +1, +2, +3) correspondant à différents niveaux de variation a été évalué. Les niveaux de modification -1; -2 et -3 correspondent au passage vers des sols plus sableux tandis que les niveaux +1, +2 et +3 permettent de passer vers des sols plus argileux.

Les résultats montrent que le passage de la situation de référence vers des sols plus argileux (+1, +2, +3) change notablement la valeur des indicateurs. En effet, le Nash peut changer jusqu'à 67 %, le RCEQM jusqu'à -111 % et l'ERSVET jusqu'à -62 % (Figure 4-5). Cependant, l'utilisation de propriétés hydrauliques de sols plus sableux (-1, -2 et -3) a eu un effet moins élevé sur le Nash (maximum = 9,52 %) et sur l'ERSVET (minimum = - 13,69 %).

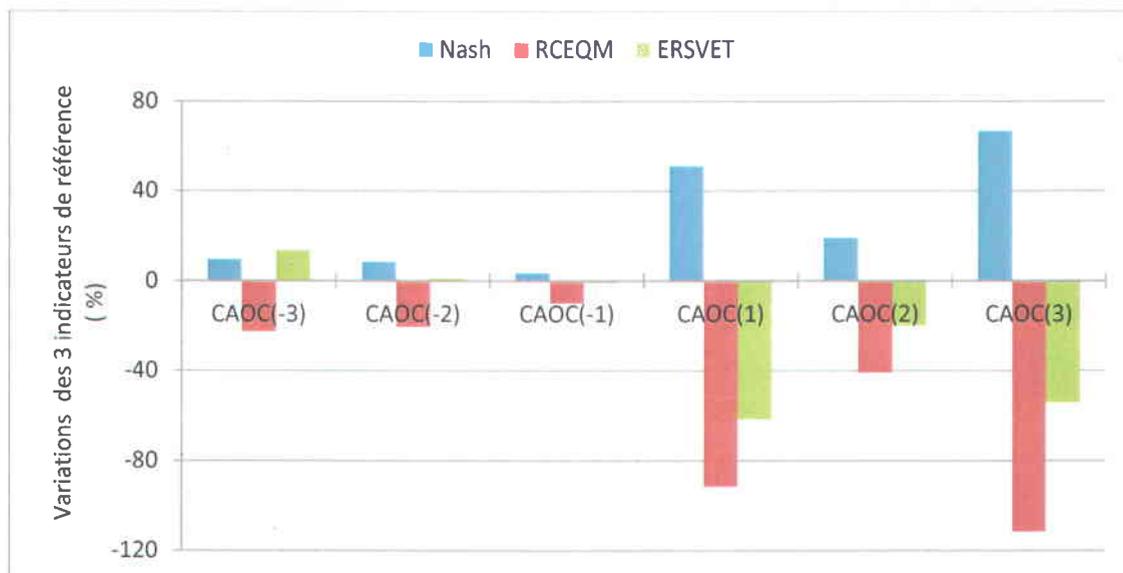


Figure 4-5 : Variation des indicateurs de performance en fonction des changements du coefficient additif d'optimisation de la classe du sol.

Le passage vers des sols sableux a permis d'améliorer les résultats d'étalonnage, puisque le Nash peut atteindre 0,92, ce qui correspond à un gain de précision dans les simulations. Par contre, le passage vers des sols plus argileux détériore les résultats de simulation, sauf pour le

cas du niveau de variation +2. Pour ce niveau de variation, le Nash devient 0,99 et le RCEQM diminue pour atteindre 0,6. Les niveaux de variation des trois indicateurs de performance du modèle, quand ce paramètre varie, peuvent être classés selon un ordre décroissant comme suit : RCEQM, NS et ERSVET. Certains niveaux de variation ont permis d'améliorer l'étalonnage du modèle tandis que d'autres contribuent à la dégradation des résultats. Cela permet de confirmer que les caractéristiques physiques proposées par HYDROTEL sont acceptables pour le bassin de la rivière Cau. Cependant, ces résultats soulignent encore une fois qu'une bonne carte de type de sol est importante et permet d'effectuer un bon étalonnage. Dans ce cas d'étude, le classement vers certains types de sols, dans l'hypothèse de la non-disponibilité d'une carte des types de sol, aurait fait perdre en précision dans le processus d'étalonnage du modèle. Il apparaît aussi un gain de précision dans l'étalonnage du modèle pour le classement vers certains types de sols.

4.4.2 Indice foliaire

Dans le cadre de cette étude, on a sept classes d'occupation du sol. Les pourcentages de chaque classe sont présentés au tableau A-3 en annexe. Trois (urbain, eau, sol nu) des sept classes d'occupation du sol prennent zéro comme valeur de référence pour l'indice foliaire. Elles n'ont pas été prises en compte dans le cadre de l'analyse. Les autres classes (agricole, mixte, forestier, arbustif) ont, quant à elles, été prises en compte dans l'analyse. Les valeurs de chacune de ces classes ont été modifiées selon la règle d' « un facteur à la fois » proposée dans le cadre de cette étude. Quatre niveaux de modifications des valeurs de référence (-50 %, -25 %, 25 % et 50 %) ont été retenus dans le cadre de cette étude pour évaluer l'impact de l'indice foliaire sur les indicateurs de performance du modèle. Les valeurs correspondant aux niveaux de variation de l'indice foliaire ayant servi aux simulations ont été résumées en annexe (Tableau A-6 en annexe).

4.4.2.1 Impacts sur le Nash-Sutcliffe

Les résultats (Figure 4-6) montrent que, sauf dans le cas de variation -50 %, les valeurs de Nash avec correspondance aux classes forestier et mixte (Agri_Hab_Plant) ont subi une variation de 2,4 % par rapport à la valeur de référence du Nash. Dans tous les autres cas, les changements du coefficient de Nash sont identiques, soit 1,19 %, ce qui constitue un impact faible. La différence, dans le cas d'un changement de -50 % des valeurs de l'indice foliaire des

classes « forestier » et « mixte », pourrait s'expliquer par le fait que ces classes couvrent presque 80 % du bassin. Cependant, cette variation de -50 % de l'indice foliaire pour ces deux classes devrait avoir un fort impact sur les capacités d'évapotranspiration. On note toutefois que les variations du Nash ne sont que de moins de 3 %, même pour un changement de -50 % de l'indice foliaire. Quoique faible comme impact, les quatre niveaux de changement de l'indice foliaire ont contribué à une augmentation du Nash, ce qui correspond à un gain en précision des résultats de simulation, étant donné que le Nash augmente en demeurant plus faible que 1.

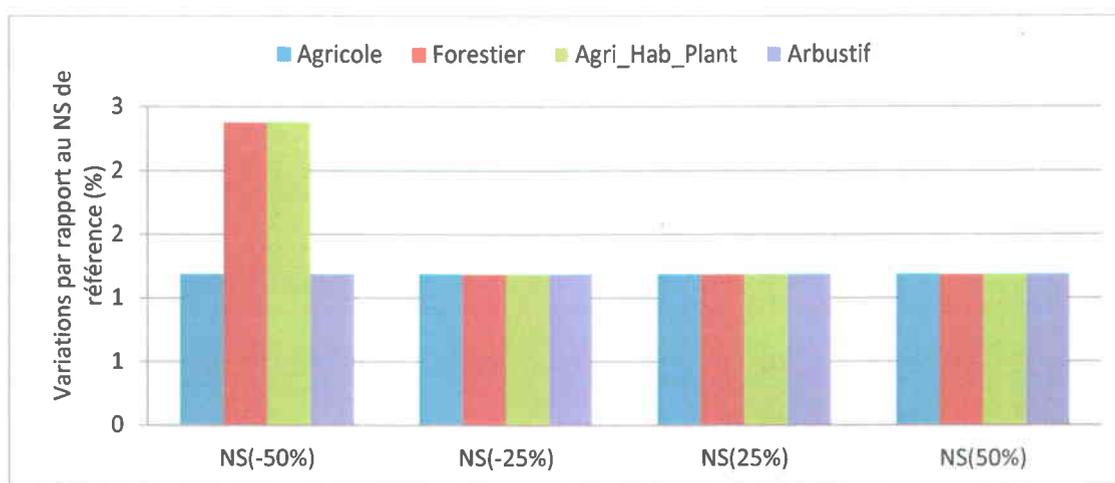


Figure 4-6 : Variation du Nash-Sutcliffe (NS) en fonction des changements de l'indice foliaire.

4.4.2.2 Impacts sur la RCEQM

Les résultats (Figure 4-7) montrent que presque toutes les classes ont des impacts négatifs faibles sur la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RCEQM), sauf la classe « forestier ». Pour cette dernière classe, on note un impact moyen. La variation de -50 % conduit aux impacts les plus élevés, suivie des impacts de -25 % de variation. Pour ces deux niveaux de variation de l'indice foliaire, les impacts sont plutôt faibles. Dans tous les cas, les classes « forestier » et « mixte » (Agri_Hab_Plant) sont plus sensibles que les deux autres classes, car elles occupent plus de 80 % du territoire du bassin. Les classes agricole et mixte produisent des impacts presque similaires dans tous les cas. Dans leur ensemble, les

quatre niveaux de variation de l'IF correspondent à une diminution de la RCEQM, soit une amélioration de l'étalonnage du modèle étant donné que cet indicateur tend vers zéro.

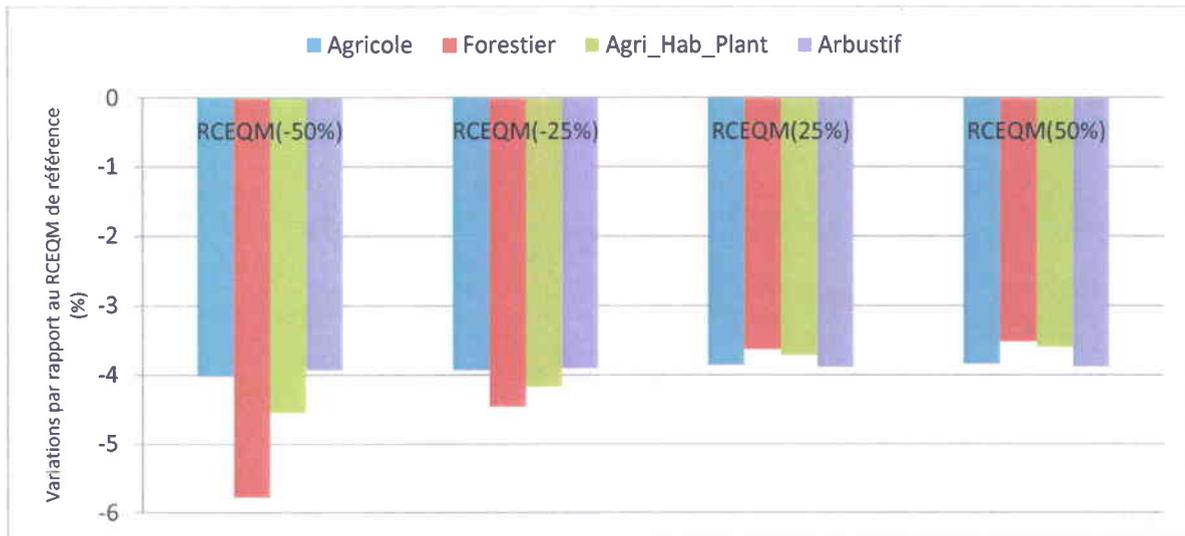


Figure 4-7 : Variation du RCEQM en fonction des changements de l'indice foliaire.

4.4.2.3 Impacts sur l'ERSVET

Toutes les variations des valeurs de l'indice foliaire pour les quatre classes donnent des impacts moyens sur l'erreur relative sur le volume de l'écoulement total (Figure 4-8). Avec les variations de -50 % et de -25 %, il apparaît un léger écart entre les impacts sur l'ERSVET. Avec les variations de 25 % et 50 %, les résultats sont identiques. Lorsqu'on modifie les valeurs de l'indice foliaire de référence pour les quatre classes d'occupation, l'impact sur l'écoulement est aussitôt noté autour de 6 % à 7 %. L'augmentation comme la diminution de l'IF des classes d'occupation affectent l'évaporation du sol nu. La diminution de l'IF devrait contribuer à l'augmentation de l'évaporation du sol nu et à l'inverse, son augmentation ferait baisser l'évaporation du sol nu. Le bilan hydrologique devrait alors en être affecté. En général, dans tous les cas, on constate une perte en précision dans l'étalonnage puisque tous les niveaux de changements contribuent à faire diminuer davantage l'ERSVET, et donc, à faire baisser le bilan hydrologique simulé.

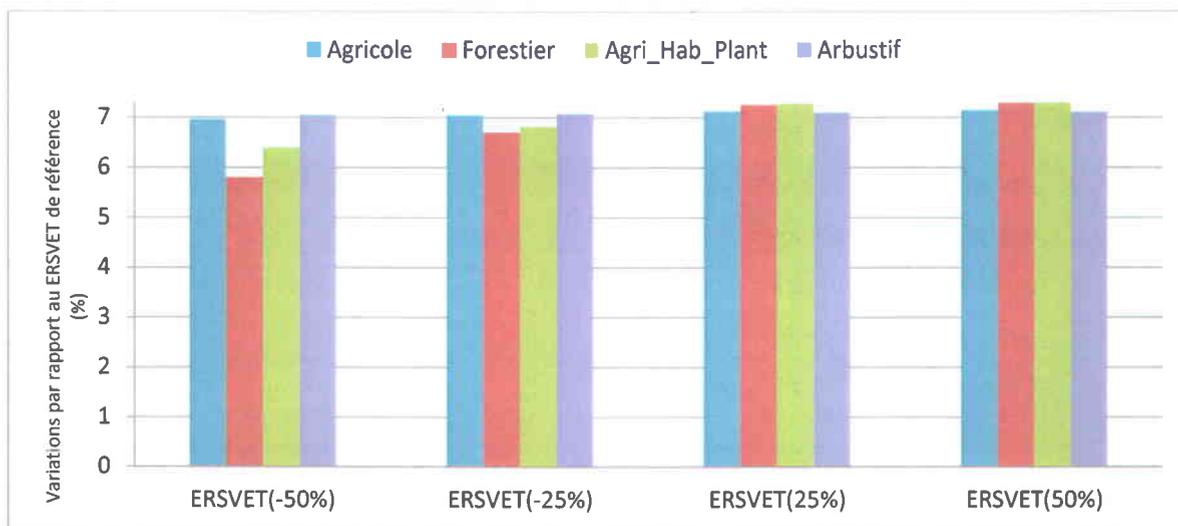


Figure 4-8 : Variation de l'ERSVET en fonction des changements de l'indice foliaire.

En somme, pour les trois indicateurs de performance du modèle, on note que les variations de l'indice foliaire ont des impacts faibles sur les deux indicateurs Nash et racine carrée de l'erreur quadratique moyenne, mais les impacts sont moyens sur l'erreur relative sur l'écoulement total. Si le changement est effectué avec toutes les classes d'occupation en même temps, l'impact pourrait être plus significatif. Au regard du niveau relativement faible de variation des indicateurs de performance, on pourrait conclure que l'indice foliaire est un paramètre qui, même si son impact demeure faible sur l'étalonnage des valeurs, devrait être estimé avec précision pour améliorer les résultats de l'étalonnage.

4.4.3 Profondeur des racines

4.4.3.1 Impacts sur le Nash

Les résultats montrent que, sauf pour la classe « forestier » qui induit des impacts de l'ordre de 5 % et 2 % sur le Nash lorsque la profondeur racinaire varie de -50 % et -25 %, pour tous les autres cas, les impacts sont minimes avec environ 1 % de variation du Nash (Figure 4-9).

La classe « forestier » a permis d'obtenir l'impact le plus élevé sur le Nash parce qu'elle occupe une grande partie du territoire du bassin d'étude (36,55 %) et sa valeur de référence est la plus élevée (1,5 m). Quoique minime comme impact dans le cas de ce bassin, la profondeur racinaire peut jouer un rôle important dans un bassin. Elle permet d'accroître

l'évapotranspiration par une augmentation du transfert d'eau des couches en profondeur vers l'atmosphère. La classe mixte « Agri_Hab_Plant » occupe la plus grande partie du territoire (43,28 %), mais son impact sur l'indicateur de Nash est le même que les impacts des classes « agricole » et « arbustif ». En effet, la valeur de référence de la profondeur racinaire pour ces classes est de 0,5 m, donc son rôle sur le transfert d'eau de la surface vers les couches en profondeur n'est pas similaire à celui de la classe « forestier ». Les classes « agricole » et « arbustif » ont des impacts minimes sur Nash à cause de la faible proportion de territoire occupée dans le bassin par ces classes et de leurs racines qui sont courtes. Pour tous les niveaux de changements de PR, et ce, pour toutes les classes d'occupation, la légère augmentation du Nash correspond à un gain en précision des résultats de simulation. En effet, le Nash augmente en demeurant inférieur à 1 (le Nash atteint 0,88 pour le maximum de variation relative de 4,7 % avec la classe forestier).

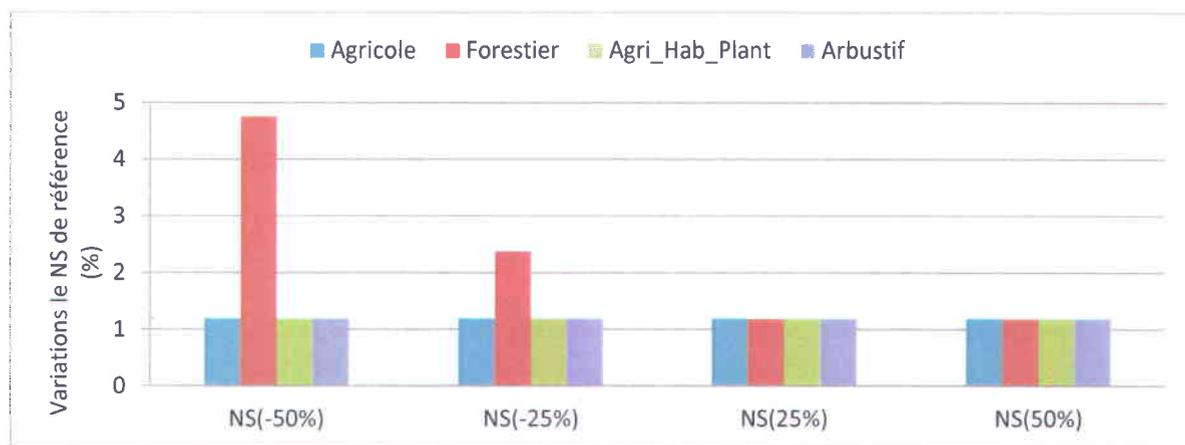


Figure 4-9 : Variation du NS en fonction des changements de la profondeur racinaire.

4.4.3.2 Impacts sur la RCEQM

Selon les résultats, pour chaque classe d'occupation du sol, plus la valeur de profondeur racinaire est élevée, plus l'impact sur la RCEQM est faible (entre -5 % et 0 %, Figure 4-10). Des impacts moyens (entre -15 % et -5 %) sont constatés seulement avec la classe « forestier » dans deux cas de diminution de la valeur de référence, soit -50 % et -25 %. Tous les autres cas donnent des impacts minimes. Les niveaux d'impacts des variations de chaque classe varient avec les taux d'occupation de cette classe sur le territoire du bassin. L'ensemble des résultats

indique que l'impact le plus important sur cet indicateur est celui de la classe « forestier », suivi de celui de la classe mixte « Agri_Hab_Plant ».

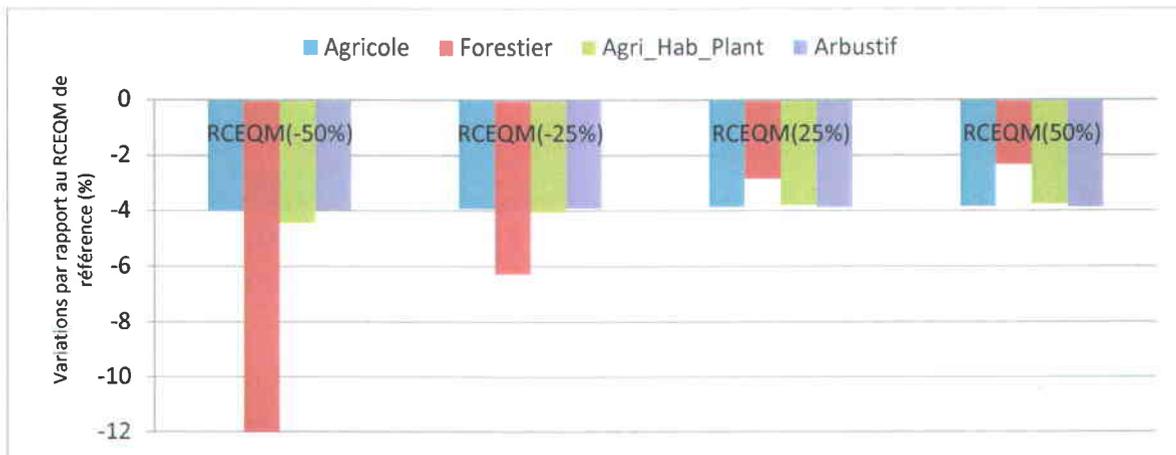


Figure 4-10 : Variations de la RCEQM en fonction des changements de la profondeur racinaire.

4.4.3.3 Impacts sur l'ERSVET

Les résultats montrent que les quatre classes d'occupation du territoire considérées ont presque les mêmes impacts sur l'écoulement total, soit un niveau moyen (entre 5 % et 10 %) avec tous les niveaux de variation, sauf -50 % de variation avec la classe « forestier » (Figure 4-11). Par ailleurs, on constate que les variations des classes « agricole » et « arbustif », dans les cas de diminution des valeurs de profondeur racinaire, ont des impacts légèrement plus élevés sur l'ERSVET par rapport aux deux autres classes. La situation est plutôt inverse dans les deux cas d'augmentation de la profondeur racinaire. Pour une augmentation des profondeurs racinaires, les classes « forestier » et mixte « Agri_Hab_Plant » facilitent davantage le transfert d'eau des couches en profondeur vers l'atmosphère. Cependant, les différences entre l'impact de chaque classe dans les deux cas d'augmentation des valeurs de profondeur racinaire sont minimes. Il faut préciser que, de manière générale, on note une perte en précision des résultats de simulation à cause de l'augmentation de l'écart relatif par rapport à la valeur de référence.

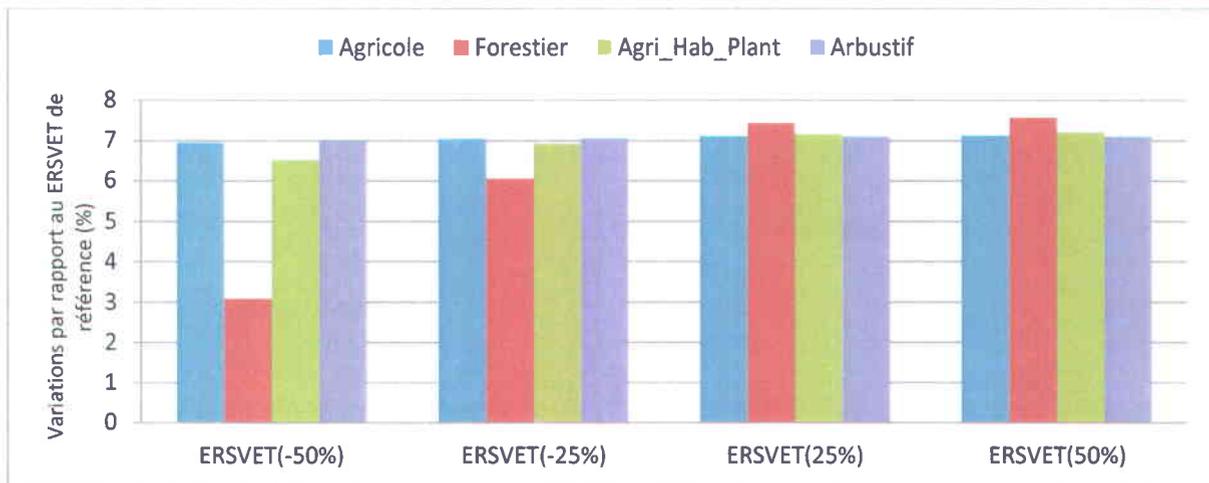


Figure 4-11 : Variations de l'ERSVET en fonction des changements de profondeur racinaire.

En somme, l'analyse a révélé que la profondeur racinaire de la classe « forestier » conserve une place relativement plus importante pour une bonne valeur de Nash quand on simule le régime hydrologique du bassin versant de la rivière Cau. Cependant, l'impact sur le Nash demeure faible. Même avec des différences de pourcentages d'occupation du sol des quatre classes, les variations de profondeur racinaire ont des impacts moyens dans presque tous les cas sur l'écoulement total. Des combinaisons de variations de profondeur racinaire des quatre classes devraient avoir des impacts plus élevés sur l'écoulement total. Au total, les profondeurs racinaires des quatre classes d'occupation apparaissent, dans le cas de ce bassin, comme un paramètre auquel les simulations sont peu sensibles. Il serait néanmoins intéressant de disposer d'informations plus précises sur les profondeurs racinaires des classes d'occupation pour la mise en place de la GIEBV.

4.5 Résultats de l'analyse de sensibilité des 11 autres paramètres

4.5.1 -50 % de variation

La figure 4-12 résume les résultats d'impact sur les trois indicateurs de simulation des 11 autres paramètres d'étalonnage considérés pour l'étude dont les définitions ont été présentées au chapitre 3 (Tableau 3-3). Les variations du coefficient d'optimisation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et de l'épaisseur de la 3^e couche du sol (Z3) ont des impacts élevés sur les trois indicateurs de performance du modèle. Ces impacts varient entre 14 % pour Z3 et -124 %

pour l'ETP. L'impact est ainsi plus significatif avec l'ETP qu'avec le Z3, et ceci, pour les trois indicateurs. En général, on note une diminution notable du Nash (NS > 1) avec ETP et Z3, ce qui correspond à une détérioration des résultats de simulation. Pour l'épaisseur de la deuxième couche du sol (Z2), le changement donne un impact moyen. Quant à l'épaisseur de la première couche du sol (Z1) et le coefficient de rugosité de Manning de l'eau (RME), leurs impacts sont plutôt minimes. Les autres paramètres produisent également des impacts minimes avec cette variation de -50 % de leur valeur de référence.

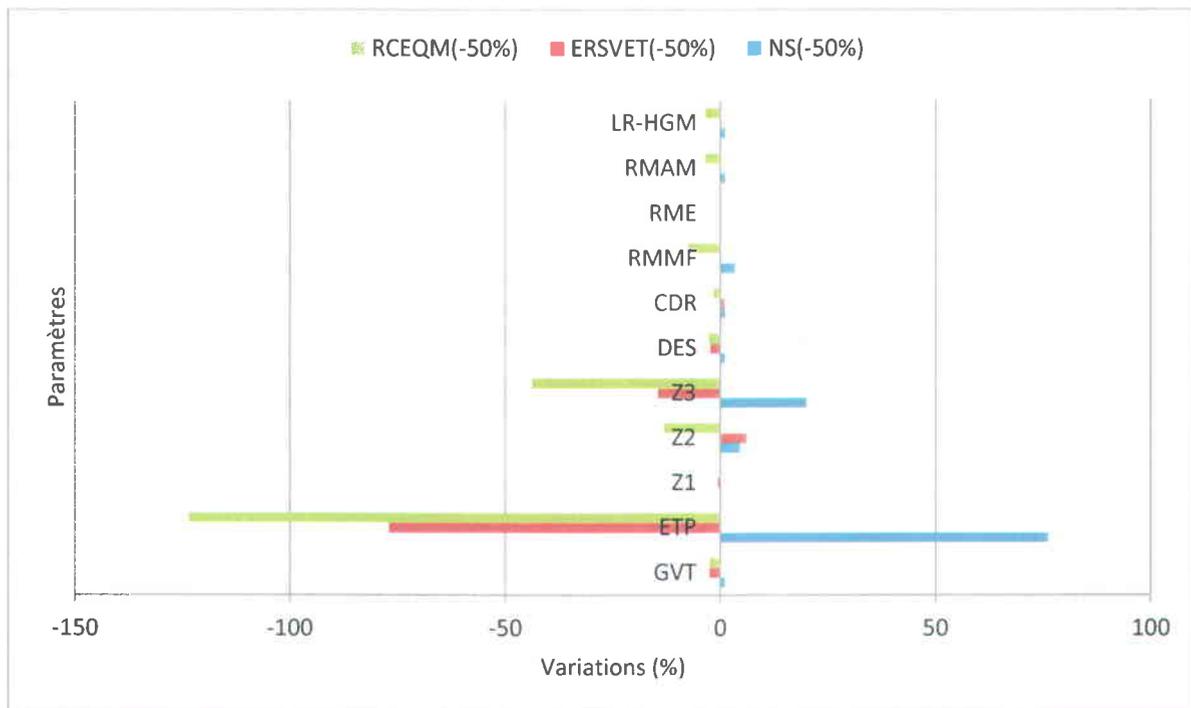


Figure 4-12 : Impact de la variation de -50 % des 11 paramètres sur les trois indicateurs de performance.

4.5.2 -25 % de variation

Selon la figure 4-13, qui résume les résultats, une variation de -25 % des valeurs de référence de l'ETP entraîne de grands impacts sur les trois indicateurs. L'impact est moyen sur l'ensemble des trois indicateurs avec la troisième couche du sol Z3. Il y a quatre paramètres qui entraînent des impacts minimes. Quant au reste des paramètres, les impacts sur les indicateurs de performance sont très minimes, voire presque nuls.

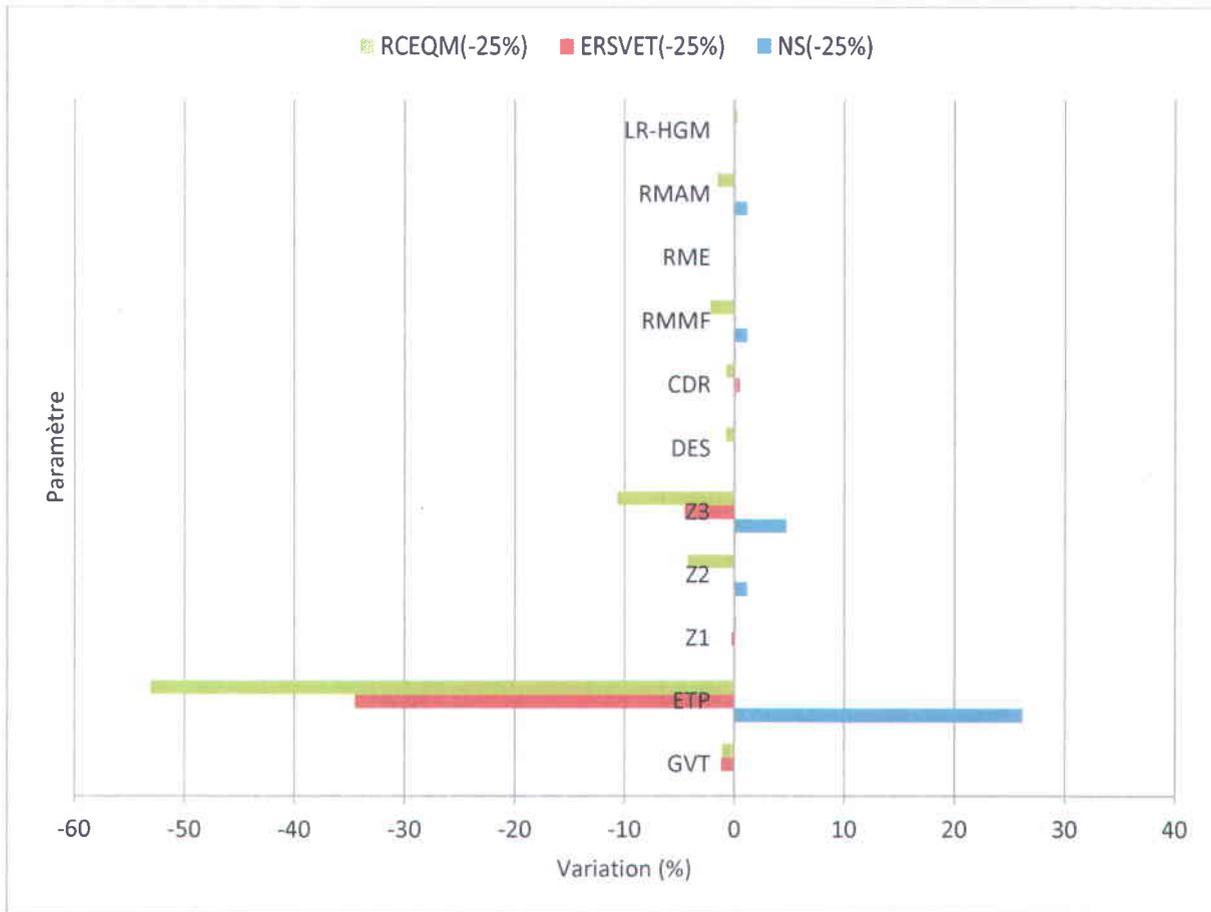


Figure 4-13 : Impact de la variation de -25 % des 11 paramètres sur les trois indicateurs de performance.

4.5.3 25 % de variation

Le paramètre évapotranspiration potentielle ETP donne des impacts moyens sur les trois indicateurs et l'épaisseur de la troisième couche du sol Z3 donne des impacts minimes (Figure 4-14). Il y a six paramètres pour lesquels les impacts sont très minimes. Par ailleurs, on peut constater qu'une variation de 25 % des valeurs de référence donne des impacts plus faibles qu'une variation de -25 %.

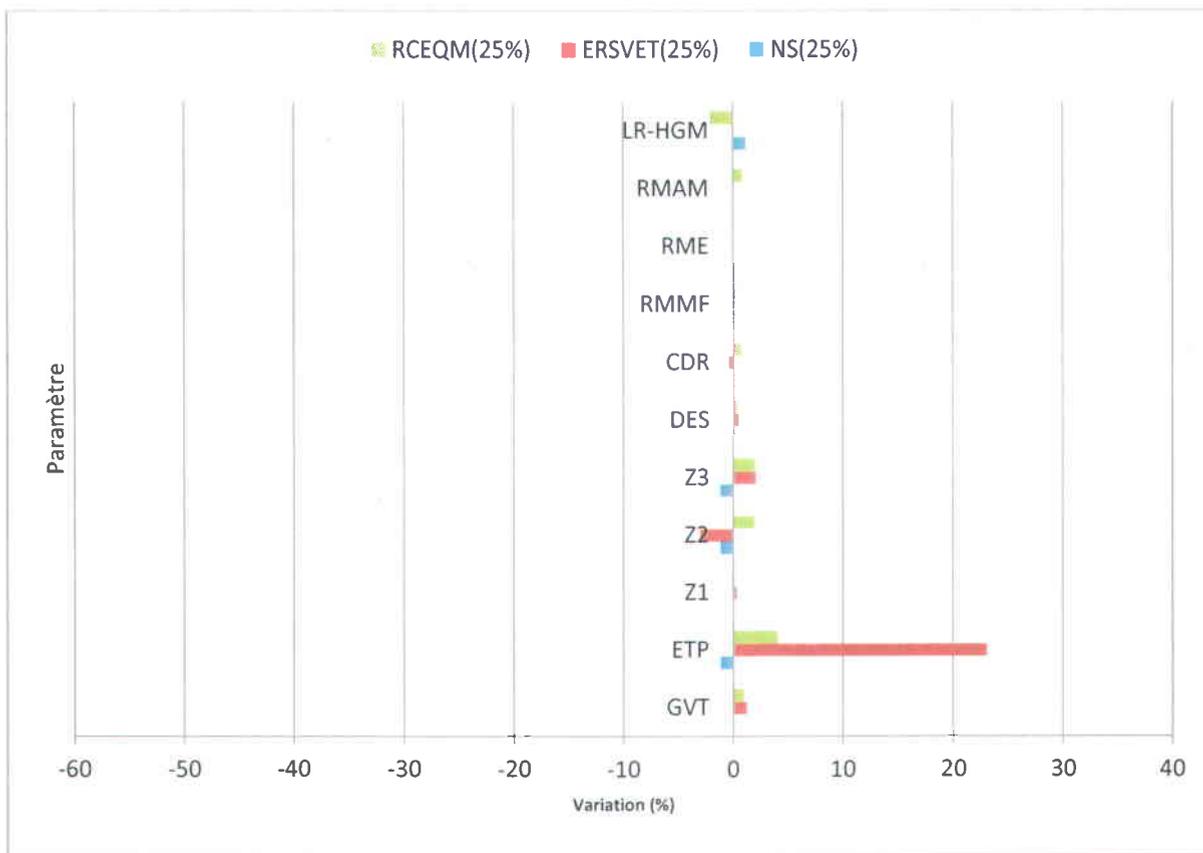


Figure 4-14 : Impact de la variation de 25 % des 11 paramètres sur les trois indicateurs de performance.

4.5.4 50 % de variation

Selon les résultats (Figure 4-15), on constate que le paramètre de l'évapotranspiration ETP a un impact moyen au total sur les trois indicateurs de performance du modèle. La troisième couche du sol Z3 a un impact minime, tout comme les paramètres suivants : la lame de référence de l'hydrogramme géomorphologique (LR-HGM), la deuxième couche du sol (Z2) et le gradient vertical des températures (GVT). Les autres paramètres ont des impacts très minimes sur les résultats de simulations.

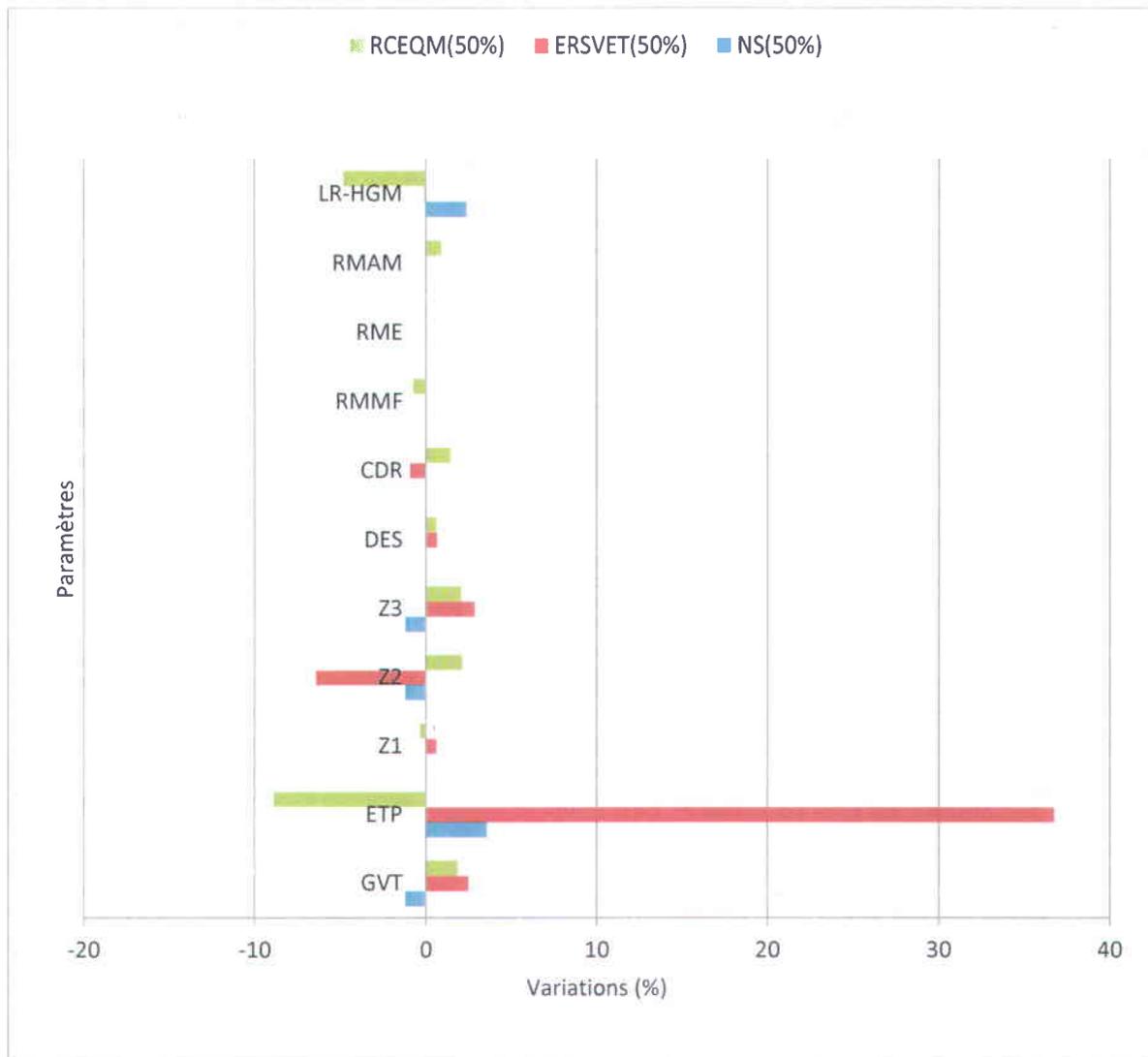


Figure 4-15 : Impact de la variation de 50 % des 11 paramètres sur les trois indicateurs de performance.

En somme, en ce qui concerne les 11 autres paramètres de l'analyse de sensibilité, les niveaux de sensibilité sont résumés au tableau 4-3, du paramètre le plus sensible au moins sensible. Dans ce tableau, la valeur moyenne des variations des trois indicateurs pour tous les cas de changement pour chaque paramètre est calculée en divisant la somme des valeurs absolues des variations résumées au tableau A-11 par 12 (trois indicateurs x quatre cas de changement). Le niveau de sensibilité des paramètres est classé en fonction de la valeur moyenne des variations des trois indicateurs.

Tableau 4-3 : Niveaux de sensibilité des 11 paramètres dans l'ordre décroissant.

Ordre	Paramètre	Abréviation	Niveau de sensibilité
1	Coefficient multiplicatif d'optimisation de l'évapotranspiration potentielle	ETP	Grand
2	Épaisseur de la couche 3 du sol	Z3	Moyen
3	Épaisseur de la couche 2 du sol	Z2	Minime
4	Gradient vertical des températures	GVT	Minime
5	Coefficient de rugosité de Manning pour les milieux forestiers	RMMF	Minime
6	Lame de référence pour l'hydrogramme géomorphologique	LR-HGM	Minime
7	Coefficient de rugosité de Manning pour les autres milieux	RMAM	Minime
8	Coefficient d'extinction	DES	Minime
9	Coefficient de récession	CDR	Minime
10	Limite inférieure de la couche 1 du sol	Z1	Minime
11	Coefficient de rugosité de Manning de l'eau	RME	Minime

Le tableau 4-3 montre que :

- Le coefficient d'optimisation de l'évapotranspiration (ETP) est le paramètre le plus sensible. La raison est que le bassin versant à l'étude se situe dans une région tropicale où l'évapotranspiration joue un rôle très important dans la perte d'eau de surface du bassin. La variation de ce paramètre, dans un sens ou dans l'autre, peut avoir un impact significatif sur les pertes en eau dans le bassin versant et, par conséquent, sur les résultats de simulation. La capacité de transfert d'eau des couches de sol vers l'atmosphère est rapidement affectée lorsqu'on modifie ce paramètre.

- L'épaisseur de la troisième couche du sol (Z3) est le deuxième paramètre le plus sensible, car il facilite le transfert d'eau de la surface vers le souterrain.
- La deuxième couche du sol (Z2) conserve la troisième place des paramètres les plus sensibles, étant donné qu'il s'agit de la zone intermédiaire de transfert d'eau entre la surface du bassin et la partie souterraine.
- La quatrième position est attribuée au gradient vertical des températures (GVT), car le bassin est situé dans une région tropicale de type mousson.
- Le coefficient de rugosité de Manning des milieux forestiers (RMMF). La classe d'occupation « forestier » représente environ 37 % du territoire du bassin. Le RMMF est alors un facteur important pour les écoulements à la surface du bassin.

4.6 Synthèse

En conclusion, avec le même pourcentage de variation des valeurs des paramètres, l'ordre du niveau de sensibilité des paramètres peut varier dépendamment du fait qu'il s'agisse d'une augmentation ou d'une diminution. On ne peut pas tirer de conclusion certaine sur la sensibilité des paramètres en se basant seulement sur l'augmentation ou la diminution. Le niveau d'impact d'un paramètre n'est pas toujours en relation avec le niveau de variation de sa valeur de référence. Pour un même changement de sa valeur de référence, un paramètre peut être très sensible avec un indicateur, mais ne pas l'être avec un autre indicateur. Il serait aussi intéressant d'utiliser, si possible, une combinaison de plusieurs paramètres à la fois pour juger de l'impact de ces paramètres sur les résultats de simulation.

Les travaux de ce chapitre ont permis de déterminer les paramètres les plus sensibles du modèle HYDROTEL lorsqu'on l'applique au bassin versant de la rivière Cau. Le paramètre de l'évapotranspiration (ETP) est le plus sensible de tous les paramètres. Suivent ensuite d'autres paramètres comme l'épaisseur de la troisième couche du sol (Z3), l'épaisseur de la couche 2 du sol et le gradient vertical des températures. Le coefficient additif d'optimisation de la classe de sol est aussi un paramètre sensible lorsqu'on ne dispose pas d'une bonne carte des types de sol pour ce bassin versant. L'indice foliaire et la profondeur racinaire n'ont presque pas d'influence sur les indicateurs.

Des travaux antérieurs effectués au Québec ont révélé l'influence de certains paramètres. Il s'agit du gradient vertical des précipitations, du coefficient d'optimisation de l'évapotranspiration

potentielle (ETP), de la variation maximale de l'humidité relative du sol par pas de temps et de la profondeur racinaire (Lavigne, 2007). Cependant, le gradient vertical des précipitations et la variation maximale de l'humidité relative du sol par pas de temps n'ont pas été pris en compte dans le cadre de l'étude dans le bassin de la rivière Cau.

Par conséquent, pour appliquer un même modèle distribué comme HYDROTEL sur des bassins versants ayant des conditions climatiques différentes, il est important d'identifier les paramètres pertinents pour un meilleur étalonnage du modèle; cela facilitera la mise en place de la gestion intégrée des eaux par bassin versant. Le niveau de sensibilité a été analysé dans ce chapitre avec le projet 235 UHRH. Étant donné que les résultats des simulations pourraient changer en fonction de la taille de discrétisation spatiale du bassin, il apparaît important de tester les niveaux de sensibilité des paramètres avec une subdivision plus fine du bassin.

5 CHOIX DU DÉCOUPAGE SPATIAL

5.1 Introduction

Le modèle HYDROTEL utilise un découpage spécifique du bassin en unités hydrologiques relativement homogènes (UHRH). Ce découpage permet d'intégrer, dans le domaine modélisé, les informations sur les caractéristiques physiques et hydrométéorologiques du bassin. En général, une résolution plus fine des données d'entrée conduit à un meilleur résultat de simulation, mais nécessite plus de temps de simulation. Cela augmente le coût d'opération de la gestion intégrée par bassin versant. Par ailleurs, plus la taille de la grille est petite, plus le volume d'informations nécessaire pour la simulation est élevé. Par conséquent, le temps requis pour la collecte et le traitement des données est aussi élevé.

La gestion intégrée par bassin versant permet de gérer l'eau dans un bassin versant en tenant compte des activités et de leurs impacts potentiels sur cette eau. L'échelle de gestion ne devrait pas être petite comme celles de prévisions météorologiques, mais ne doit pas non plus être aussi grande comme l'échelle de la gestion d'un cours d'eau. Il est par conséquent important de déterminer la taille optimale de l'unité spatiale de simulation permettant d'obtenir le meilleur compromis entre le temps des simulations et la précision des résultats. Le présent chapitre vise à identifier le meilleur choix de découpage spatial pour la gestion intégrée de l'eau dans le cas du bassin versant de la rivière Cau.

5.2 Méthodologie

Dans HYDROTEL, chaque UHRH est déterminée une fois le réseau hydrographique du bassin décrit. Dans le cadre de cette étude, six scénarios de découpage spatial du bassin versant de la rivière Cau correspondaient à des surfaces moyennes d'UHRH allant de 29,6 km² (Figure 5-1a) à 2,2 km² (Figure 5-1b). En effet, une surface moyenne d'UHRH de 2 km² est considérée comme étant très faible pour des actions dans le cadre d'une GIEBV. Pour les différents scénarios de découpage spatial, le tableau 5-1 résume le nombre d'UHRH correspondants ainsi que la surface moyenne de l'UHRH pour chaque scénario.

Tableau 5-1 : Nombre et surfaces moyennes des UHRH pour différents niveaux de découpage.

Niveau de découpage	Nombre d'UHRH	Surface moyenne d'une UHRH (km ²)	Taille relative moyenne d'UHRH par rapport à la surface du bassin (%)
1	149	29,6	0,67
2	235	18,8	0,43
3	535	8,3	0,19
4	1 015	4,4	0,10
5	1 593	2,8	0,06
6	2 052	2,2	0,05

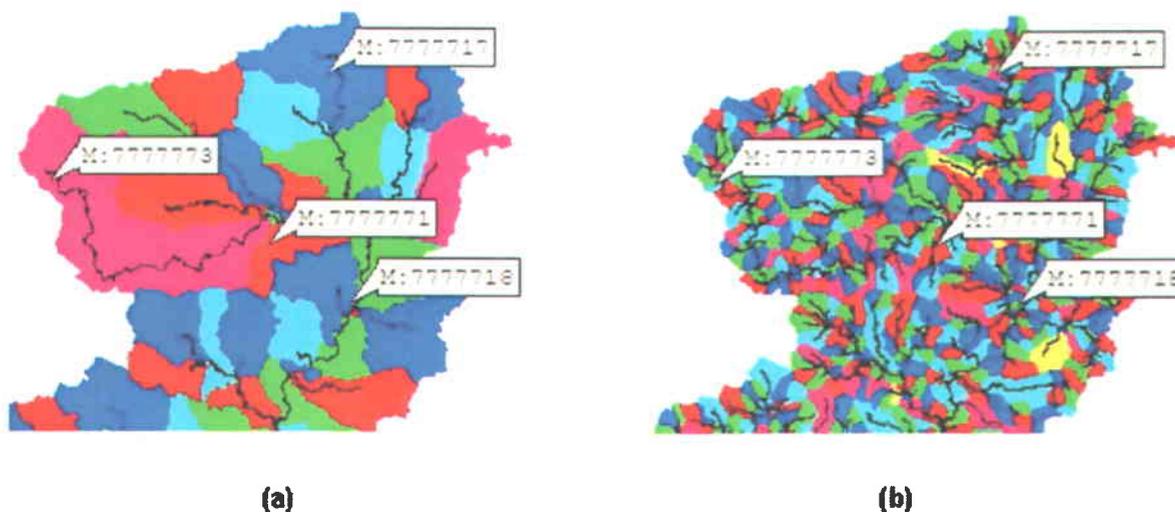


Figure 5-1 : Niveaux plus grossier (a) et moins grossier (b) de découpage en UHRH.

Dans le cadre de cette étude, le jeu de paramètres du scénario 235 UHRH a été appliqué pour les simulations pour les cinq autres scénarios. La période de simulation retenue est une période de cinq années consécutives (1997 - 2001). Pour déterminer le scénario le plus approprié pour la GIEBV, les débits simulés ont été comparés graphiquement aux débits observés. Si le meilleur scénario n'est pas identifié à cette étape, les indicateurs de Nash-Sutcliffe (NS) et

l'erreur relative sur l'écoulement (ERSVET) seront utilisés pour apprécier la qualité de la simulation.

Pour ce faire, on associe des points à chaque indicateur, 1 étant le point associé au scénario qui donnera le meilleur indicateur, 2 pour le scénario suivant, etc. On classe ainsi les scénarios suivant leur qualité en tenant compte des points accumulés. Le meilleur scénario devrait avoir le total de points ou le pointage le plus faible. Les indicateurs retenus pour l'attribution des points sont l'indicateur de Nash-Sutcliffe (NS) et l'erreur sur le volume de l'écoulement total (ERSVET). Il s'agit des deux meilleurs indicateurs de qualité de simulation.

Lorsque le critère du total des points ne permet pas de déterminer le meilleur scénario, un autre critère sera utilisé. Il s'agit des résultats de simulation dans les périodes des saisons de pluies (1^{er} mai au 31 octobre) et de la saison sèche (1^{er} novembre au 30 avril). Les résultats de simulation pour ces deux périodes seront comparés.

Dans une autre étape, un étalonnage a été réalisé pour le scénario 2 052 UHRH, dont le découpage est le plus fin. Les paramètres ainsi obtenus ont été utilisés pour déterminer le meilleur scénario. La méthode de détermination du meilleur scénario demeure similaire à celle précédemment exposée.

Cette analyse double a été réalisée puisqu'il y a une grande différence dans les tailles d'UHRH à travers les six scénarios, variant en moyenne entre 29,6 km² et 2,2 km². Il est évident que chaque scénario donnera un meilleur résultat quand on utilisera son propre jeu de paramètres. Dans la limite de cette thèse, on se basera sur deux jeux de paramètres pour déterminer une taille préférable pour la GIEBV de la rivière Cau. Le tableau A-12 en annexe résume les valeurs du jeu de paramètres étalonnés pour les deux scénarios 235 UHRH et 2 052 UHRH.

5.3 Impacts de la taille avec les paramètres du projet 235 UHRH

5.3.1 Période 1997-2001

La figure 5-2 présente les résultats de l'année 2001, qui sont similaires à ceux des autres années (Figure A-15 en annexe). Les courbes de débits simulés des six scénarios sont quasiment confondues. Seuls les pics semblent varier d'un scénario à un autre. Cependant, l'écart entre les pics n'est visible seulement qu'entre les observations (Obs.) et la courbe simulée du scénario 2 052 UHRH. Évidemment, il est difficile de porter un jugement sur la qualité des simulations uniquement à partir de ces résultats.

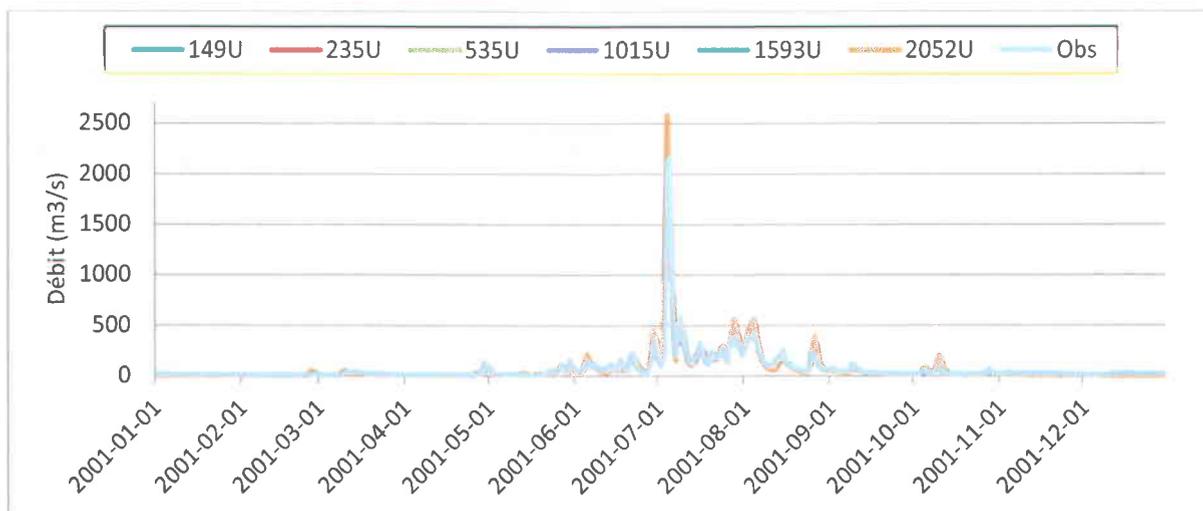


Figure 5-2 : Débits observés et simulés - Six scénarios d'UHRH - 2001 (scénario de référence 235 UHRH).

Les résultats (Tableau 5-2) montrent que le scénario 235 UHRH permet d'obtenir les meilleurs résultats, ce qui est tout à fait prévisible, car c'est le jeu de paramètres de ce scénario qui a été utilisé pour les simulations des autres scénarios. Les résultats du scénario 149 UHRH sont très proches de ceux du scénario 235 UHRH, même si la surface moyenne des UHRH passe de 29,6 km² à 18,8 km². L'indicateur de Nash-Sutcliffe (NS) du scénario 535 UHRH est très proche de celui des deux scénarios précédents, et ce, même si sa taille moyenne diminue de 11,68 km² et 21,38 km², en comparaison aux scénarios 149 UHRH et 235 UHRH. Par contre, la différence est plus prononcée en ce qui concerne l'erreur sur le volume de l'écoulement (ERSVET).

Tableau 5-2 : Indicateurs de performance pour les six scénarios d'UHRH, 1997- 2001.

Niveau	Taille du découpage		Indicateurs		
	Nombre d'UHRH	Surface moyenne d'UHRH (km ²)	NS	RCEQM (m ³ /s)	ERSVET (%)
1	149	29,6	0,84	1,03	0,06
2	235	18,8	0,84	1,03	-0,05
3	535	8,3	0,83	1,05	0,36
4	1 015	4,4	0,81	1,12	-0,28
5	1 593	2,8	0,79	1,17	-0,23
6	2 052	2,2	0,78	1,21	-0,66

Avec le scénario 1 015 UHRH, on peut constater de plus grandes différences par rapport aux trois scénarios plus grossiers de découpage spatial. Les résultats indiquent que les différences entre les volumes d'écoulement (ERSVET) sont négligeables et que les variations de NS et aussi de RCEQM sont faibles d'un scénario à l'autre. Les indicateurs des scénarios 1 593 UHRH et 2 052 UHRH sont quant à eux très proches, le NS ne variant que de 7,1 % et l'ERSVET de -0,66 %. Même si les résultats de ces deux scénarios sont très proches, le scénario 2 052 UHRH requiert plus de temps de simulation (1,5 fois plus long) que le scénario 1 593 UHRH. Par conséquent, le scénario 1 593 UHRH est préférable au projet 2 052 UHRH du point de vue de temps de calcul.

En somme, on constate que la variation de la taille des UHRH entre les deux scénarios 149 UHRH et 235 UHRH n'a presque aucun impact sur les résultats de simulation sur la période de cinqu ans. En effet, la discrétisation spatiale n'a que peu d'effets sur les résultats de simulation du régime hydrologique lorsque la période considérée est annuelle. De plus, les indicateurs de ces deux scénarios sont très proches de ceux du scénario 535 UHRH. Leur temps de simulations sont presque similaires, même si les tailles varient de 29,6 km² à 8,3 km². Par conséquent, les scénarios 149 UHRH et 235 UHRH seront éliminés de la sélection pour la GIEBV et le scénario 535 UHRH sera conservé. Les différences entre les indicateurs des

deux scénarios 1 593 UHRH et 2 052 UHRH sont négligeables, mais puisque le temps de calcul est plus long avec le projet 2 052 UHRH, celui-ci sera aussi retiré de la sélection de la taille optimale.

Il reste finalement trois scénarios de découpage spatial qui sont quasi-similaires : 535 UHRH, 1 015 UHRH et 1 593 UHRH. En se basant sur la méthode des points attribués en tenant compte de la valeur des indicateurs, on remarque qu'il est impossible d'effectuer le choix du scénario correspondant au meilleur découpage spatial. En effet, les résultats montrent que le pointage total est le même pour ces trois scénarios (Tableau 5-3). Il est alors nécessaire d'effectuer une analyse sur des périodes plus courtes, soit durant les saisons sèche et de pluie.

Tableau 5-3 : Classement des trois scénarios sur une période annuelle (scénario de référence 235 UHRH).

Scénario	Selon un indicateur		Pointage total	Rang
	NS	ERSVET		
535 UHRH	1	3	4	1
1 015 UHRH	2	2	4	1
1 593 UHRH	3	1	4	1

5.3.2 Période de pluie

La figure 5-3 présente les résultats de simulation de la saison des pluies de l'année 1999 qui sont similaires à ceux des autres années (Figures A-16 à A-19 en annexe). À travers ces figures, on peut visiblement constater que pour la période des pluies, les trois scénarios indiquent des résultats quasi similaires. Cependant, il existe de petits écarts aux plus grands pics de la saison. Ainsi, pour porter de jugement sur les différences entre les résultats des trois scénarios, il sera nécessaire de s'appuyer principalement sur les deux plus importants indicateurs de simulation : l'indicateur de Nash-Sutcliffe (NS) et l'erreur sur le volume total de l'écoulement (ERSVET).

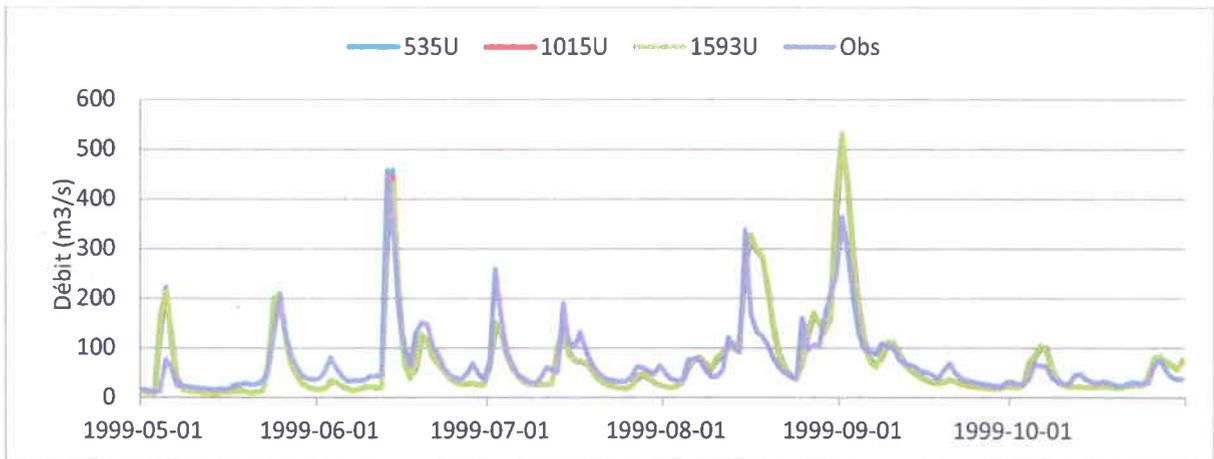


Figure 5-3 : Débits observés et simulés - trois scénarios UHRH – saison de pluie – 1999 (scénario de référence 235 UHRH).

Selon le pointage total accumulé par chacun des scénarios pour la période des pluies, le scénario 1 593 UHRH s'est avéré le meilleur. Les deux autres scénarios ont les mêmes pointages, ils sont classés au deuxième rang (Tableau A-13 en annexe).

5.3.3 Période sèche

À partir des résultats de simulation pour les périodes sèches de 2000-2001 (Figure 5-4) et des autres années (Figures A-20 à A-22 en annexe), on constate que les trois scénarios d'UHRH donnent des résultats quasi-similaires aux observations. Il y a des écarts importants en début d'année entre les courbes. Ces écarts sont faibles le reste de l'année.

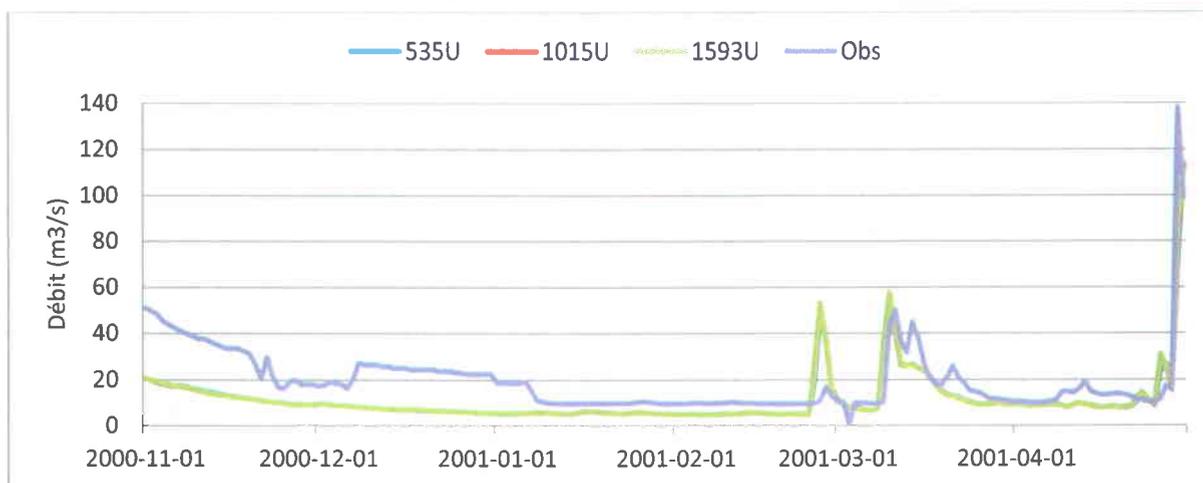


Figure 5-4 : Débits observés et simulés - trois scénarios UHRH – saison sèche 2000-2001 (scénario de référence 235 UHRH).

Ainsi, comme pour la période des pluies, afin de juger de la différence entre les résultats des trois scénarios, il faudra s'appuyer sur les deux indicateurs de simulation. Selon les points accumulés (Tableau A-15 en annexe), les projets 535 UHRH et 1 593 UHRH occupent la meilleure position, tandis que le projet 1 015 UHRH est le moins bon pour la saison sèche.

La comparaison des résultats des points accumulés par chacun des trois scénarios est donnée au tableau 5-4 pour les différentes périodes de temps. On constate que le scénario 1 593 UHRH est le meilleur pour la saison des pluies et la saison sèche ainsi que pour l'ensemble des périodes. Ce scénario est suivi de près par celui de 535 UHRH, tandis que le scénario 1 015 UHRH se situe au troisième rang pour l'ensemble des trois périodes d'études.

Tableau 5-4 : Classement des trois scénarios UHRH - scénario de référence 235 UHRH.

Scénario	Longue période	Saison des pluies	Saison sèche	Points	Rang
535 UHRH	4	4	3	11	2
1 015 UHRH	4	4	6	14	3
1 593 UHRH	4	3	3	10	1

5.4 Impacts de la taille des UHRH avec les paramètres du projet 2 052 UHRH

5.4.1 Période 1997-2001

À titre d'exemple, la figure 5-5 présente les résultats de simulation de l'année 2001 qui sont similaires à ceux des autres années (Figures A-23 à A-30 en annexe). On ne peut discriminer les courbes seulement car elles sont confondues. On peut tout juste remarquer de légers écarts aux plus grands pics entre la courbe du scénario 2 052 UHRH et les autres courbes. À ce stade, il est impossible de choisir le meilleur scénario de découpage spatial.

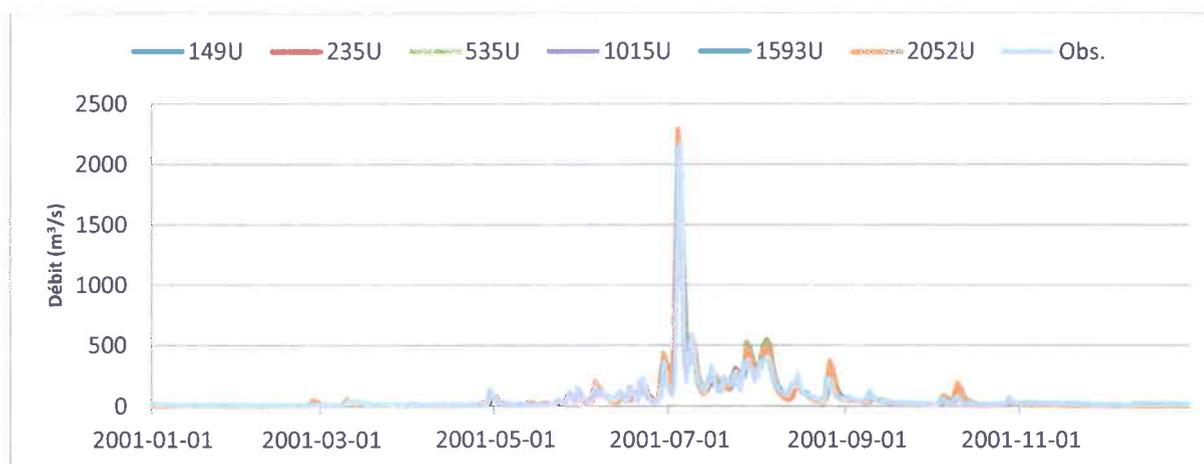


Figure 5-5 : Débits observés et simulés - six scénarios UHRH – 2001 (scénario de référence : 2 052 UHRH).

Le tableau 5-4 montre que les scénarios 149 UHRH et 235 UHRH ont des valeurs de NS identiques. Par ailleurs, le scénario 235 UHRH est le moins bon lorsqu'on se base sur les erreurs relatives sur le volume de l'écoulement (Tableau 5-5). Par conséquent, on les retire de la liste des scénarios retenus pour la GIEBV.

Le scénario 535 UHRH a un NS très proche de ceux des scénarios 1 593 UHRH et 1 015 UHRH. L'ERSVET est égal à 0,51 %, quelque peu différent des erreurs avec les deux autres scénarios, mais l'écart reste faible.

Même avec le jeu de paramètres propre au scénario 2 052 UHRH, les scénarios 1 593 UHRH et 1 015 UHRH répondent mieux pour les trois indicateurs. De plus, tel que présenté à la

figure 5-5, le temps de simulation du scénario 2 052 UHRH est près de 1,5 fois plus élevé que celui du scénario 1 593 UHRH. Pour ces deux raisons, on enlève le scénario 2 052 UHRH de la liste des scénarios retenus pour la GIEBV.

Tableau 5-5 : Comparaison des trois indicateurs de performance pour six scénarios de UHRH pour la période de cinq ans (scénario de référence 2 052 UHRH).

Taille du découpage			Indicateurs d'évaluation		
Niveau	Nombre d'UHRH	Surface moyenne UHRH (km ²)	NS	RCEQM (m ³ /s)	ERSVET (%)
1	149	29,6	0,82	0,99	0,25
2	235	18,8	0,82	1,04	7,43
3	535	8,3	0,85	0,98	0,51
4	1015	4,4	0,86	1,06	-0,03
5	1593	2,8	0,86	1,10	0,06
6	2052	2,2	0,85	1,14	-0,12

En conclusion, on sélectionne de façon préliminaire trois scénarios : 535 UHRH, 1 593 UHRH et 1 015 UHRH pour faire des analyses plus approfondies. Selon le système de points accumulés (Tableau 5-6), le scénario 1 015 UHRH a les meilleurs résultats pour les trois indicateurs dans la période de cinq ans, mais les écarts de ses deux indicateurs avec ceux des autres scénarios sont faibles.

Tableau 5-6 : Classement des trois scénarios de UHRH selon deux indicateurs de performance pour la période de cinq ans (scénario de référence 2 052 UHRH).

Scénario	Selon un indicateur		Point	Rang
	NS	ERSVET		
535 UHRH	3	3	6	3
1 015 UHRH	1	1	2	1
1 593 UHRH	1	2	3	2

5.4.2 Période de pluies

À titre d'exemple, la figure 5-6 présente les résultats de la saison des pluies de 1999. Les autres sont exposés en annexe (Figures A-24 à A-27). Une fois encore, on constate que les trois courbes de simulation sont confondues, mais avec de plus grands pics simulés en périodes de pluies. On peut apercevoir des différences beaucoup plus marquées entre les scénarios 535 UHRH et 1 593 UHRH cette fois-ci, plus qu'avec les mêmes périodes et le jeu de paramètres du scénario 235 UHRH.

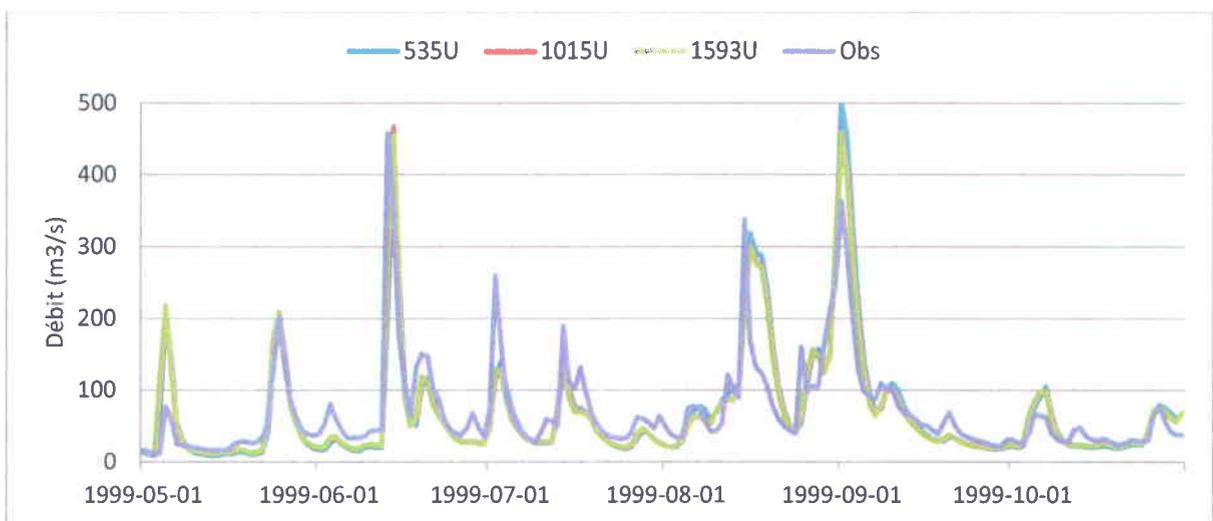


Figure 5-6 : Débits observés et simulés - trois scénarios UHRH - 1999 (scénario de référence 2 052 UHRH).

La méthode de point accumulés (Tableau A-17 en annexe) montre que le scénario 535 UHRH est le meilleur et vient ensuite le scénario 1 593 UHRH. Le scénario 1 015 UHRH garde la troisième position dans la saison des pluies.

5.4.3 Période sèche

On aperçoit à travers la figure 5-7 et celles en annexe (Figures A-28 à A-30) que les résultats sont presque similaires pour les trois scénarios pour la période sèche.

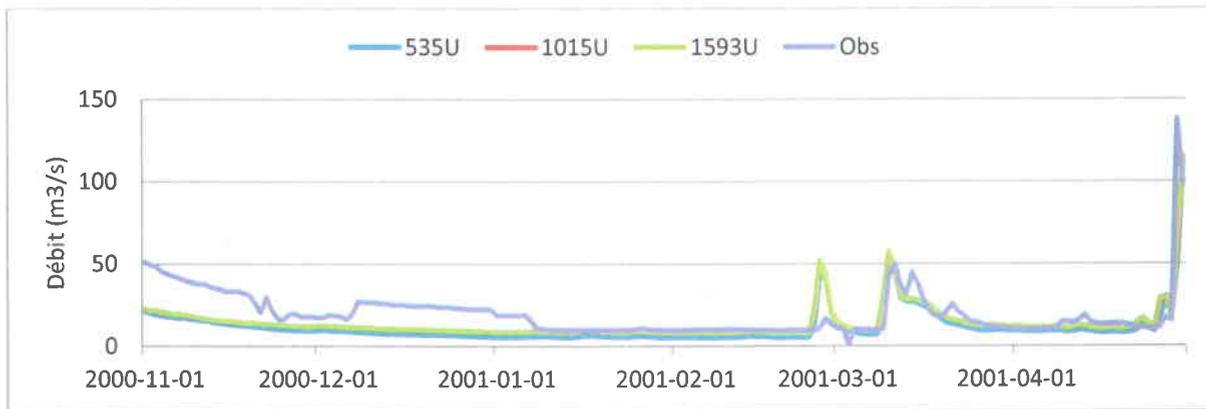


Figure 5-7 : Débits observés et simulés- trois scénarios UHRH – saison sèche : 2000-2001 (scénario de référence 2 052 UHRH).

Avec le système de points accumulés (Tableau A-18 en annexe), on remarque que dans la saison sèche, les scénarios 535 UHRH et 1 593 UHRH possèdent le même pointage. Ces scénarios gardent alors la même position pour la qualité de simulation et le scénario 1 015 UHRH est le moins bon des trois car son pointage est le plus élevé.

En somme, avec le nombre total de points des trois scénarios après trois comparaisons avec des périodes de temps différentes, on constate que le scénario 1 593 UHRH est le meilleur découpage spatial (Tableau 5-7). Le scénario 535 UHRH demeure à la deuxième position et le scénario 1 015 UHRH se situe au troisième rang dans tous les cas une fois de plus, lorsqu'on utilise les paramètres du scénario 2 052 UHRH pour juger l'effet de la variation de la taille des UHRH sur la qualité des simulations.

Tableau 5-7 : Classement trois scénarios UHRH sur les trois périodes (scénario de référence 2 052 UHRH).

Scénario	Période de cinq ans	Saison des pluies	Saison sèche	Point	Rang
523 UHRH	6	3	3	12	2
1 015 UHRH	2	6	5	13	3
1 593 UHRH	3	4	3	10	1

5.5 Synthèse

Au tableau 5-8, on présente les points totaux accumulés par les trois scénarios avec les deux jeux de paramètres des scénarios 235 UHRH et 2 052 UHRH. Le scénario 1 593 UHRH obtient 20 points, donc il montre sa capacité à représenter les meilleurs résultats du régime hydrologique à l'étude. Le scénario 535 UHRH est à la deuxième position et le scénario 1 015 UHRH est en dernière position. Notons qu'en général, les différences entre les courbes de ces trois scénarios paraissent négligeables : les différences entre leurs indicateurs sont aussi très faibles. En outre, on peut dire que les tailles de ces trois scénarios sont acceptables pour la GIEBV. Le scénario 1 593 UHRH est le meilleur scénario dans cette analyse, même si l'écart reste très faible en comparaison avec les deux autres scénarios. La comparaison des résultats des différents scénarios permet de remarquer que la diminution de la surface de l'UHRH implique un nombre plus élevé d'UHRH et, par conséquent, plus d'écoulement en rivière. Par ailleurs, étant donné que le modèle ne peut choisir qu'un type de sol par UHRH, les caractéristiques hydrauliques « moyennes » du bassin pourraient subir un changement d'un scénario à un autre. Les processus hydrologiques suivant les saisons devraient alors en être affectés.

En conclusion, le scénario 1 593 UHRH peut être choisi (superficie moyenne de l'UHRH égale à 2,8 km²) dans le cas du bassin versant de la rivière Cau. On utilisera ce scénario pour tous les travaux subséquents, car il est le scénario qui obtient le plus de succès au niveau de la variabilité des caractéristiques du bassin versant tout en réduisant le temps de simulation.

Tableau 5-3 : Classement des trois scénarios UHRH selon l'application de deux jeux de paramètres.

Scénario	235 UHRH	2 052 UHRH	Point total	Rang
535 UHRH	11	12	23	2
1 015 UHRH	14	13	27	3
1 593 UHRH	10	10	20	1



6 IMPACT DU DÉCOUPAGE SPATIAL SUR LA SENSIBILITÉ DES PARAMÈTRES

6.1 Introduction

Sur le bassin à l'étude, l'étalonnage préliminaire du modèle HYDROTEL a été effectué avec une échelle spatiale de 235 UHRH (Chapitre 4). Une analyse de sensibilité a permis, à partir de la même échelle spatiale, de déterminer le niveau de sensibilité des paramètres du modèle. Les résultats du précédent chapitre ont permis de choisir l'échelle spatiale 1 593 UHRH comme étant le meilleur scénario de discrétisation spatiale pour les simulations. Cette échelle spatiale étant très différente de celle de 235 UHRH en matière de taille de l'unité de calcul (moyenne de 18,8 km² pour le scénario 235 UHRH et de 2,8 km² pour le scénario 1 593 UHRH), quels seraient les impacts sur le niveau de sensibilité des paramètres du modèle?

L'objectif du présent chapitre est d'effectuer une analyse de sensibilité des paramètres du modèle à partir du projet 1 593 UHRH. Cette analyse permettra de détecter l'impact éventuel du changement de la taille de l'unité de calcul sur le niveau de sensibilité des paramètres. La méthodologie adoptée pour le projet 1 593 UHRH reste identique à celle du projet 235 UHRH (Chapitre 4). Elle consiste à faire varier « un paramètre à la fois », suivant plusieurs niveaux autour d'une valeur dite de « référence ». Il s'agira ensuite de déterminer les valeurs correspondantes des indicateurs de performance. Pour un paramètre, sa valeur de référence est la valeur obtenue suite à l'étalonnage du modèle. Ainsi, l'étalonnage du modèle est premièrement effectué avec le projet 1 593 UHRH dans le but de déterminer la valeur de référence de chacun des paramètres. Les paramètres sélectionnés dans le cadre de cette analyse de sensibilité sont similaires à ceux du projet 235 UHRH et ce sont des paramètres choisis pour tous les travaux de la thèse (14 paramètres, Tableau 3-3, Chapitre 3). La comparaison des niveaux de sensibilité des différents paramètres pour les deux scénarios a été effectuée sur la base des résultats obtenus. Il faudrait préciser que trois des paramètres étudiés, soit le coefficient additif d'optimisation de la classe de sol (CAOC), l'indice foliaire et la profondeur des racines, sont considérés comme des « paramètres spéciaux » et analysés séparément.

6.2 Étalonnage du modèle avec le projet 1 593 UHRH

Dans ce chapitre, la période 1999-2002 a été retenue pour l'étalonnage et la période 2003-2006 a été retenue pour la validation. Ce choix a été fait pour que chacune des périodes puisse comporter deux années avec des moyennes de débits journaliers supérieures au débit moyen annuel et deux autres années avec des débits plus faibles que la moyenne annuelle. Le jeu de paramètres obtenu après étalonnage avec le projet 1 593 UHRH est donné en annexe (Tableau A-12) où il est comparé au jeu de paramètres obtenu avec le projet 235 UHRH. La période retenue pour l'étalonnage avec le projet 1 593 UHRH est 1999-2002, tandis que celle retenue pour la validation est 2003-2006 (Tableau 6-1). Pour faciliter la comparaison des résultats, le jeu de paramètres du projet 235 UHRH sera appliqué pour les nouvelles périodes d'étalonnage et de validation retenues pour le projet 1 593 UHRH.

Tableau 6-1 : Résultats d'étalonnage et de validation du modèle avec les deux projets.

Indicateurs de performance	Étalonnage 1999-2002		Validation 2003-2006	
	235 UHRH	1 593 UHRH	235 UHRH	1 593 UHRH
NS	0,86	0,88	0,62	0,72
RCEQM (m ³ /s)	1,16	1,08	1,42	1,21
ERSVET (%)	-0,73	0,15	-13,16	-13,11

Globalement, les résultats d'étalonnage et de validation montrent que le projet 1 593 UHRH a permis d'obtenir de meilleurs résultats pour les indicateurs de performance que le projet 235 UHRH.

6.3 Paramètres spéciaux

6.3.1 Coefficient additif d'optimisation de la classe de sol (CAOC)

L'analyse est identique à celle effectuée dans le chapitre 4 pour l'analyse de sensibilité avec le projet 235 UHRH (Section 4.3). Il s'agit de déterminer, pour différents niveaux de variation du paramètre, l'impact sur les indicateurs de performance du modèle.

Les résultats montrent que pour le NS, le projet 235 UHRH paraît plus sensible que le projet 1 593 UHRH pour les niveaux de variation -3, 1 et 3 du CAOC, ce qui est le contraire pour les autres niveaux (Figure 6-1). Sauf dans le cas des niveaux de variation 3 et 2, les quatre autres valeurs de CAOC ont des impacts similaires sur les trois indicateurs de performance pour chaque projet. Par exemple, avec le niveau -3, le projet 235 UHRH est plus sensible que le celui de 1 593 UHRH pour les trois indicateurs. En outre, avec le niveau de variation -2, le projet 1 593 UHRH est plus sensible. Évidemment, on ne peut pas dire quelle échelle spatiale est plus sensible avec le paramètre CAOC. Pourtant, le changement de CAOC donne un impact très variable, de moyen à élevé, sur les indicateurs de performance. Une fois encore, on peut conclure qu'une bonne qualité de simulation ne pourra pas être obtenue sans l'utilisation d'une bonne carte des types de sol.

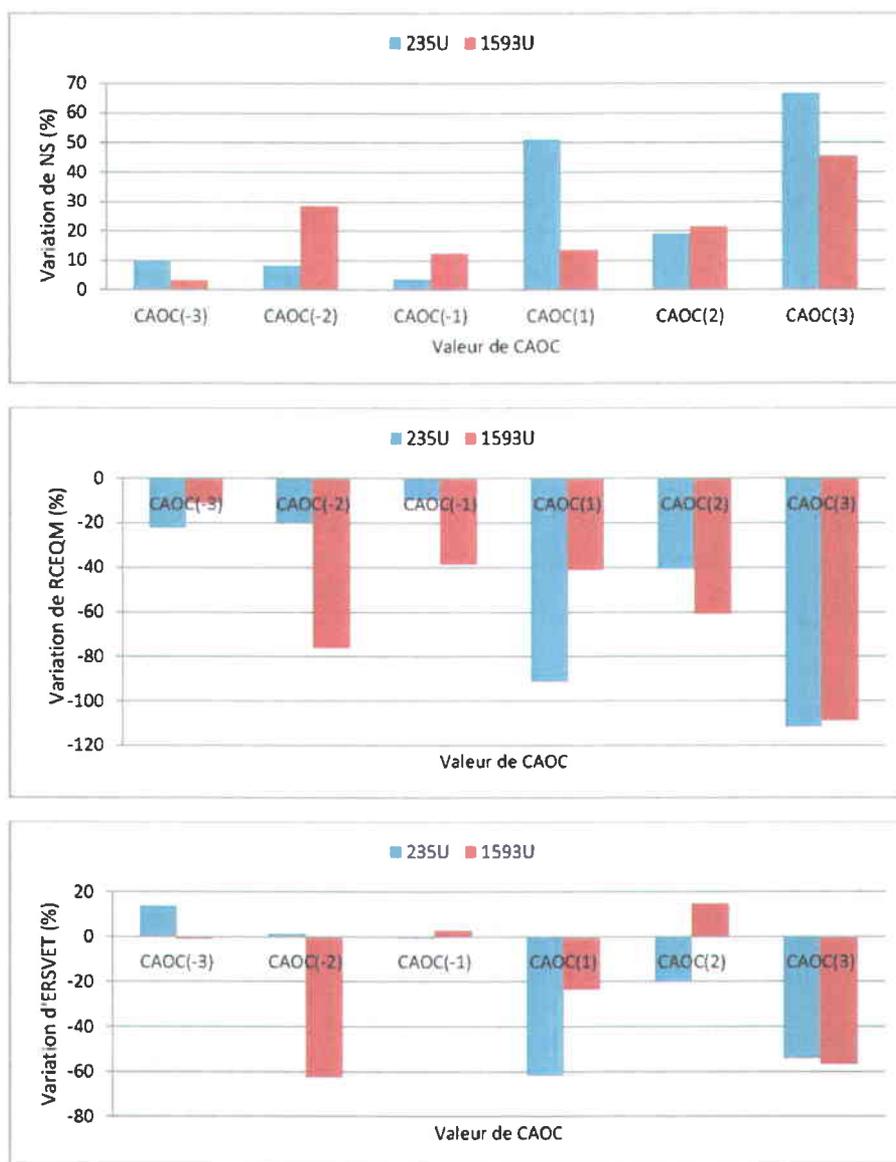


Figure 6-1 : Comparaison de la variation des indicateurs de performance pour le coefficient additif d'optimisation de la classe du sol - deux projets d'UHRH.

6.3.2 Indice foliaire

Selon la méthode adoptée pour l'analyse d'impact avec le projet 235 UHRH, seules quatre des sept classes d'occupation du sol ont été prises en compte dans l'analyse. Les résultats montrent clairement que l'impact des variations de l'indice foliaire sur les indicateurs de

Nash-Sutcliffe (NS) et sur l'erreur sur le volume de l'écoulement total (ERSVET) est beaucoup plus faible avec le projet 1 593 UHRH qu'avec celui de 235 UHRH (Figure 6-2). Il faudrait cependant préciser que l'impact de la variation de l'IF sur le NS varie entre 1 et 2,5 % avec le projet 235 UHRH. La plus petite échelle spatiale serait ainsi la moins sensible aux variations de l'indice foliaire. Dans l'ensemble, avec les deux projets, l'impact de la variation de l'indice foliaire semble faible selon ces simulations.

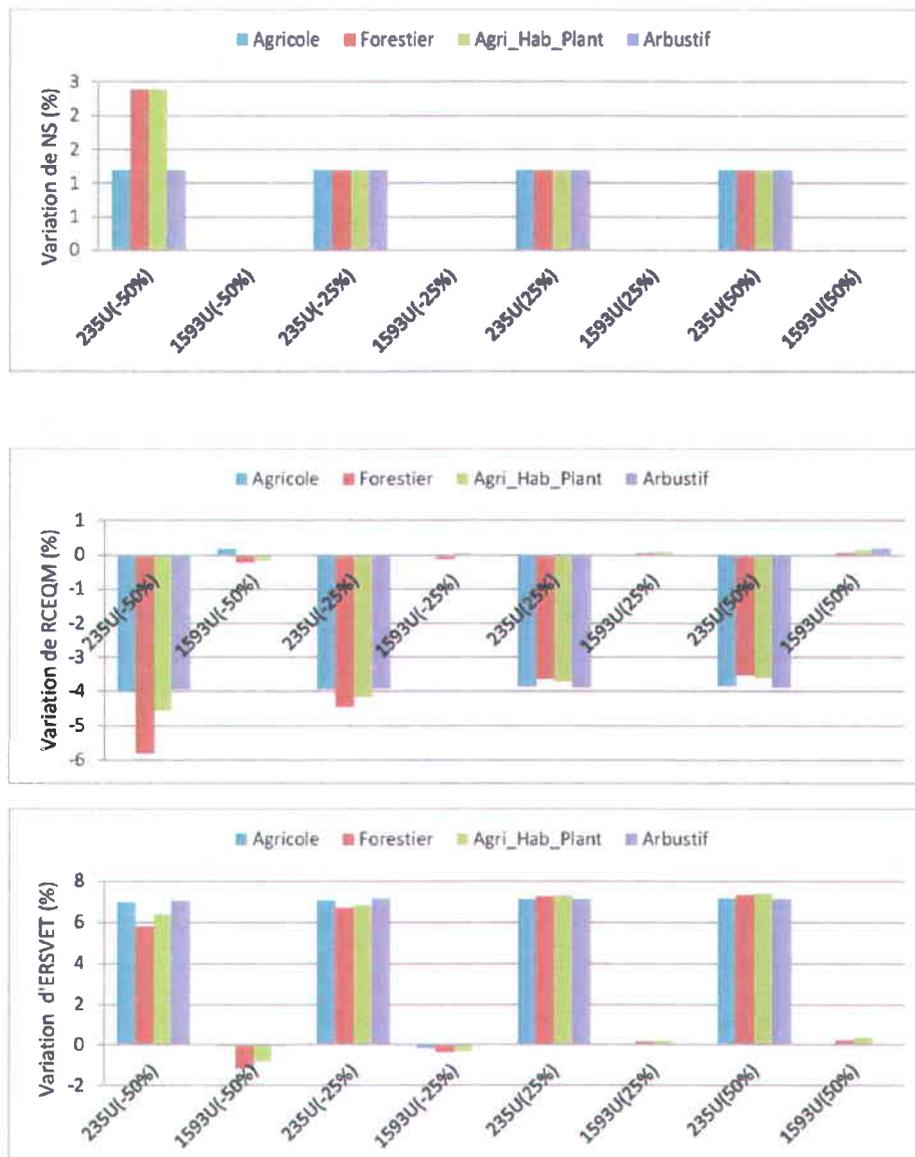


Figure 6-2 : Comparaison de la variation des indicateurs pour l'indice foliaire - deux projets d'UHRH.

6.3.3 Profondeur racinaire

Les résultats montrent globalement que, même avec de grandes variations de pourcentages pour les quatre types d'occupation du sol, les trois indicateurs de performance varient plus faiblement avec le projet 1 593 UHRH (Figures 6-3). Avec le projet 1 593 UHRH, les variations de l'ERSVET, bien que minimes, peuvent être positives ou négatives, ce qui n'est pas le cas du projet 235 UHRH. Pour le projet 235 UHRH, toutes les variations demeurent positives. L'impact de la précision de la profondeur des racines sur la qualité de simulation semble faible selon ce test.

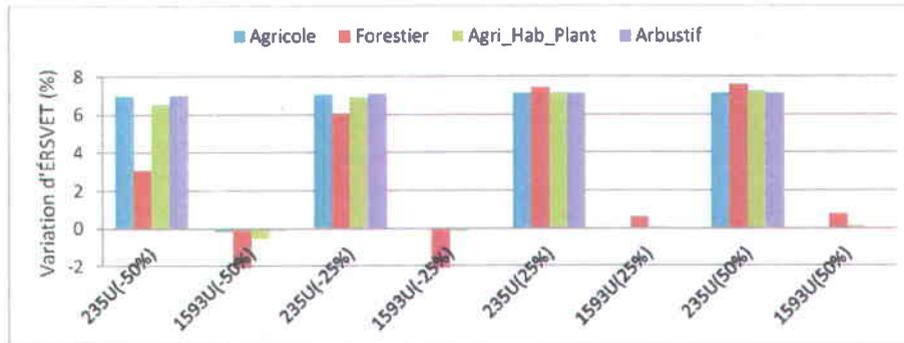
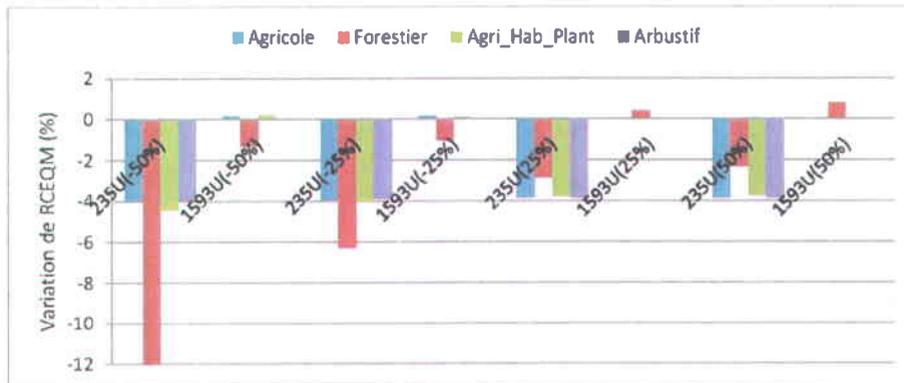
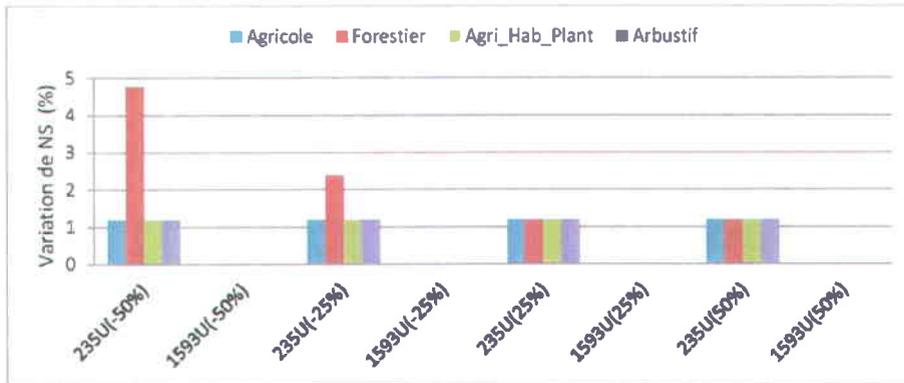


Figure 6-3 : Comparaison de la variation des indicateurs pour la profondeur racinaire- deux projets d'UHRH.

6.4 Les 11 autres paramètres

Rappelons que quatre niveaux de variation ont été appliqués aux valeurs de référence des 11 paramètres : -50 %, -25 %, 25 % et 50 %. Cependant, un seul paramètre change de valeur à chaque fois, tandis que tous les autres paramètres conservent leur valeur de référence. Les résultats sont présentés pour les différents pourcentages de variation des valeurs des paramètres.

6.4.1 Variation de -50 % des valeurs de référence

La figure 6-4 présente les résultats de simulation avec le niveau de variation de -50 % des paramètres.

Pour l'indicateur NS, les plus forts impacts ont été obtenus avec le coefficient de l'évapotranspiration (ETP) et avec l'épaisseur de la troisième couche du sol (Z3). L'épaisseur de la couche 2 du sol (Z2) et le coefficient de rugosité de Manning des milieux forestier (RMMF) donnent des impacts moyens tandis que les autres donnent des impacts faibles. Avec les coefficients de rugosité des autres milieux (RMAM) et des milieux forestiers (RMMF) du projet 1 593 UHRH, les variations sont plus importantes que celles du projet 235 UHRH. Tous les autres changements des paramètres de 1 593 UHRH donnent des impacts plus faibles que les variations des paramètres avec le projet 235 UHRH.

En ce qui concerne l'indicateur ERSVET, ETP, Z3 et Z2 donnent des impacts similaires avec cet indicateur qu'avec le NS. Tous les autres paramètres donnent des impacts minimes ou nuls. Cette fois-ci, le coefficient de récession (CDR) affiche un impact plus élevé avec le projet 1 593 UHRH qu'avec celui de 235 UHRH.

Quant à l'indicateur RCEQM, les impacts des paramètres ETP, Z3, Z2 et RMMF sur cet indicateur sont similaires aux impacts de ces paramètres sur le NS. Cependant, ces impacts sont négatifs plutôt que positifs. RMMF et la profondeur de la première couche du sol (Z1) sont plus sensibles avec 1 593 UHRH qu'avec 235 UHRH. Tous les autres donnent des impacts très minimes. À travers ces comparaisons, l'impact du changement de la valeur des paramètres sur les résultats de simulations est plus faible avec ce projet qu'avec le projet 235 UHRH. L'ETP a un impact élevé sur les trois indicateurs (entre -45 % et -124 % de variation du RCEQM).

L'impact de l'ETP sur le NS et de Z3 sur le RCEQM est presque deux fois supérieur avec le projet 235 UHRH qu'avec celui de 1 593 UHRH.

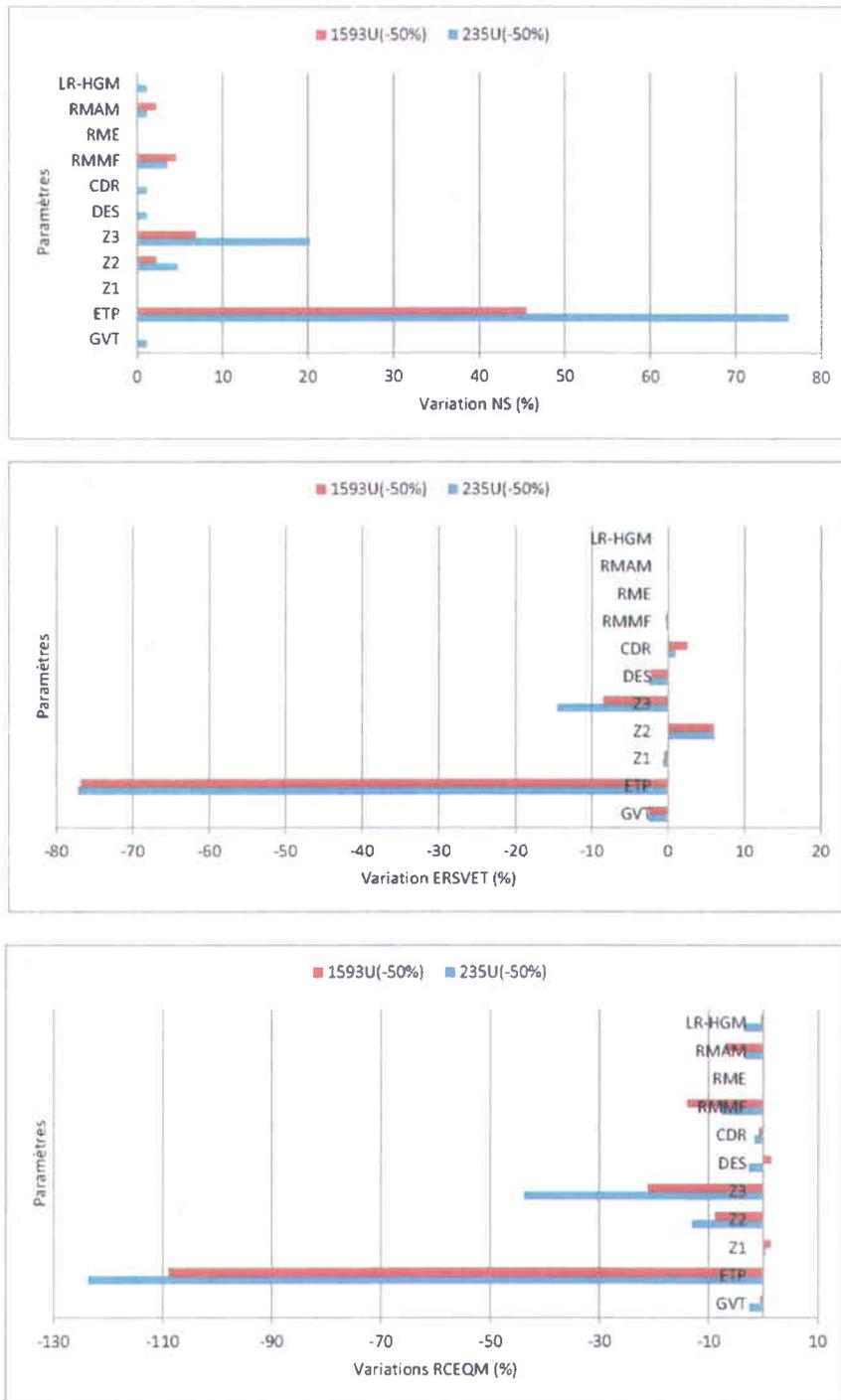


Figure 6-4 : Impacts des variations de -50 % autour des valeurs de référence de 11 paramètres sur les trois indicateurs de performance - deux projets d'UHRH.

6.4.2 Variation de -25 % des valeurs de référence

La figure 6-5 présente les résultats de simulation avec le niveau de variation de -25 % des paramètres.

Pour le NS, l'ETP et Z3 affichent deux fois plus de sensibilité avec 235 UHRH qu'avec 1 593 UHRH. L'impact est classé comme minime pour tous les autres paramètres. Avec 1 593 UHRH, la lame de référence de l'hydrogramme géomorphologique (LR-HGM) et Z1 entraînent une faible variation du NS, alors qu'on ne constatait aucun impact avec 235 UHRH. Les paramètres suivants semblent avoir peu d'impacts sur les indicateurs avec les deux projets : coefficient de rugosité de l'eau (RME), coefficient de récession (CDR), coefficient d'extinction (DES) et le gradient vertical des températures (GVT).

Pour l'ERSVET, l'ETP est le paramètre le plus sensible. Il donne un impact très élevé tandis que les autres paramètres donnent des impacts minimes ou presque nuls. ETP, Z3, Z2 et LR-HGM sont les paramètres plus sensibles pour cet indicateur.

Pour le RCEQM, l'ETP entraîne un impact plus élevé avec 1 593 UHRH qu'avec 235 UHRH. Z3 est un paramètre plus sensible avec 235 UHRH qu'avec 1 593 UHRH. Avec tous les autres paramètres, la sensibilité peut, quelques fois, être plus élevée avec 1 593 UHRH qu'avec 235 UHRH, mais elle reste très minime, voire presque nulle.

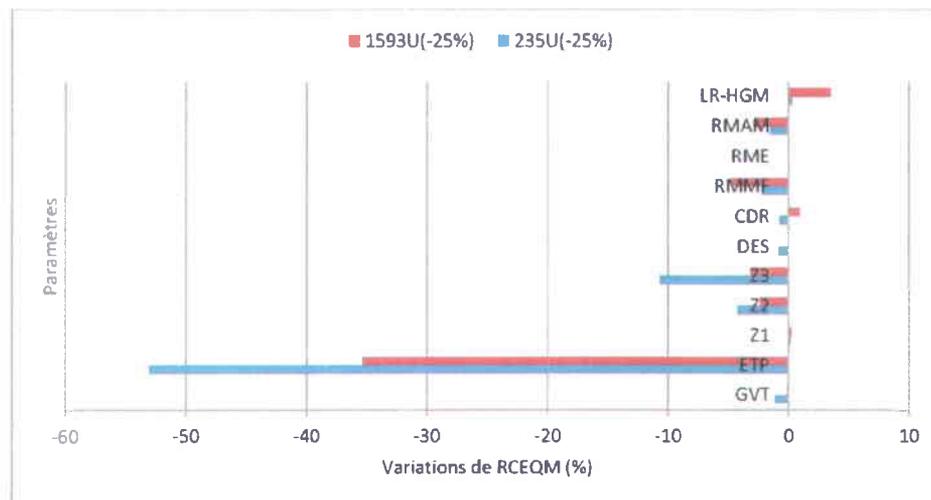
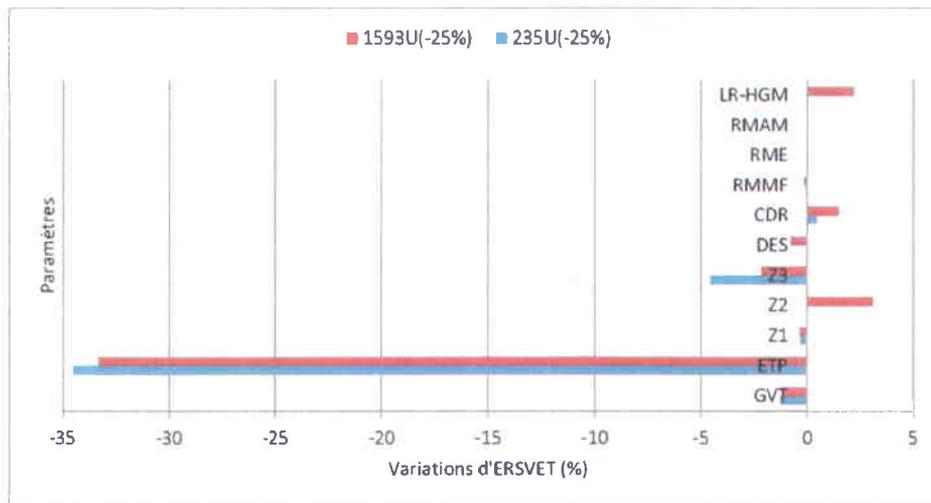
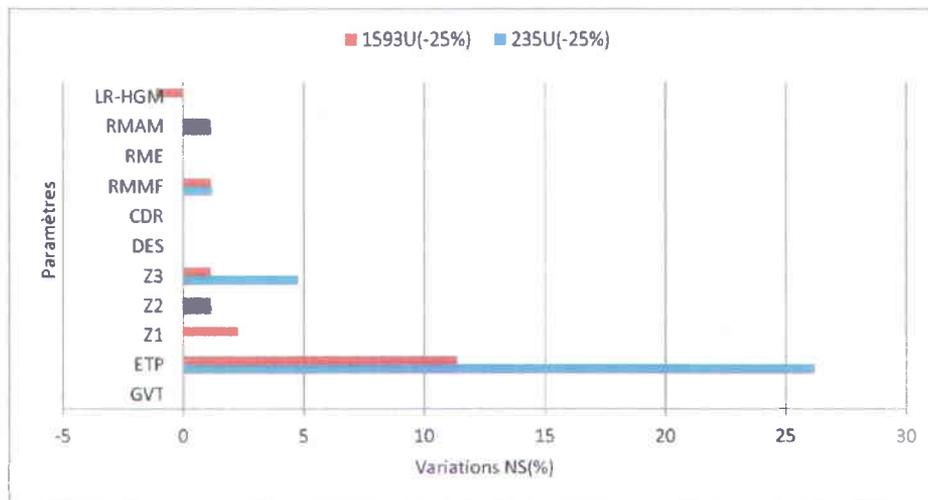


Figure 6-5 : Impacts des variations de -25 % autour des valeurs de référence des 11 paramètres sur les trois indicateurs de performance - deux projets d'UHRH.

6.4.3 Variation de 25 % des valeurs de référence

La figure 6-6 présente les résultats de simulation avec le niveau de variation de 25 % des paramètres.

Pour le NS, malgré le fait que l'ETP est généralement le plus sensible des paramètres, son impact sur le NS est, avec 25 % de variation, minime. Cependant, les impacts sont contradictoires avec les deux projets, mais NS affiche deux fois plus de variations avec 1 593 UHRH qu'avec 235 UHRH. Avec les paramètres RMAM et RMMF, le NS est sensible avec le projet 1 593 UHRH. Avec Z2 et Z3, c'est plutôt le contraire, le projet 235 UHRH entraîne des variations de NS, mais presque aucun avec le projet 1 593 UHRH. Les variations de RME, CDR, DES, Z1 et GVT n'ont aucun impact sur le NS, peu importe le projet.

Pour l'ERSVET, l'ETP est encore le plus sensible et son impact est plus élevé avec 235 UHRH qu'avec 1 593 UHRH. Tous les autres paramètres donnent des impacts minimes ou presque nuls. Z2 et CDR ont des impacts plus élevés sur l'ERSVET avec 1 593 UHRH qu'avec 235 UHRH. Z3 et GVT entraînent des variations plus élevées, mais globalement faibles, avec 235 UHRH qu'avec 1 593 UHRH.

Quant au RCEQM, l'ETP est le paramètre le plus sensible, mais son impact est moyen. Il est plus sensible avec 1 593 UHRH qu'avec 235 UHRH. Tous les autres paramètres ont des impacts minimes. LR-HGM, RMAM et RMMF entraînent au moins deux fois plus de sensibilité avec 1 593 UHRH qu'avec 235 UHRH, ce qui est l'inverse avec Z3, Z2 et GVT.

En général, sauf pour le cas de l'ETP avec l'indicateur ERSVET, qui a un impact élevé sur les résultats, toutes les autres situations entraînent des impacts minimes ou presque nuls. L'impact du changement de 25 % est généralement plus faible que celui du changement de -25 % de la valeur de référence des paramètres. Par exemple, l'impact de l'ETP sur l'indicateur ERSVET varie de 1 % à 23 % en comparaison à 11 % à 53 %, respectivement pour 25 % et -25 % de variation de l'ETP. Pour la première fois, LR-HGM devient le deuxième paramètre le plus sensible.

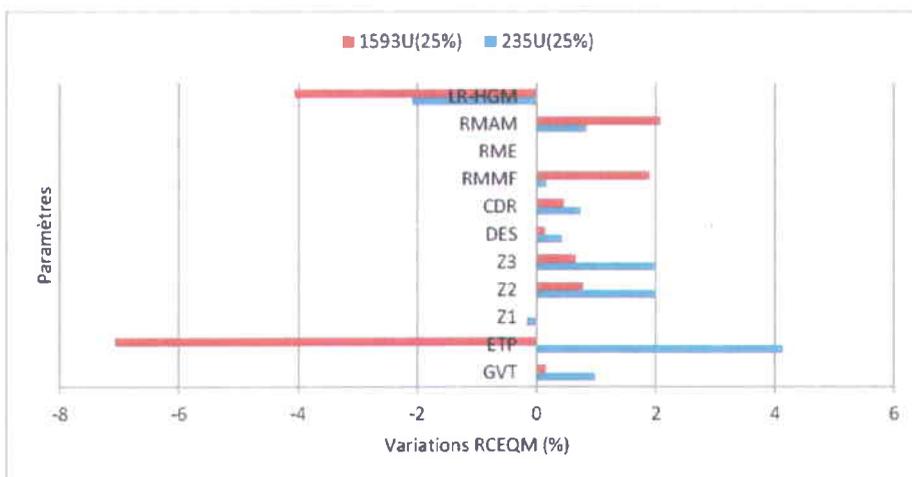
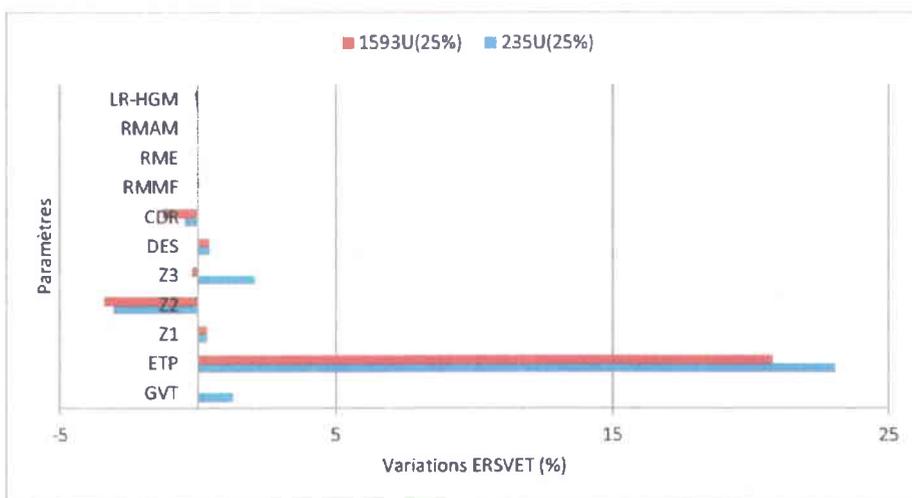
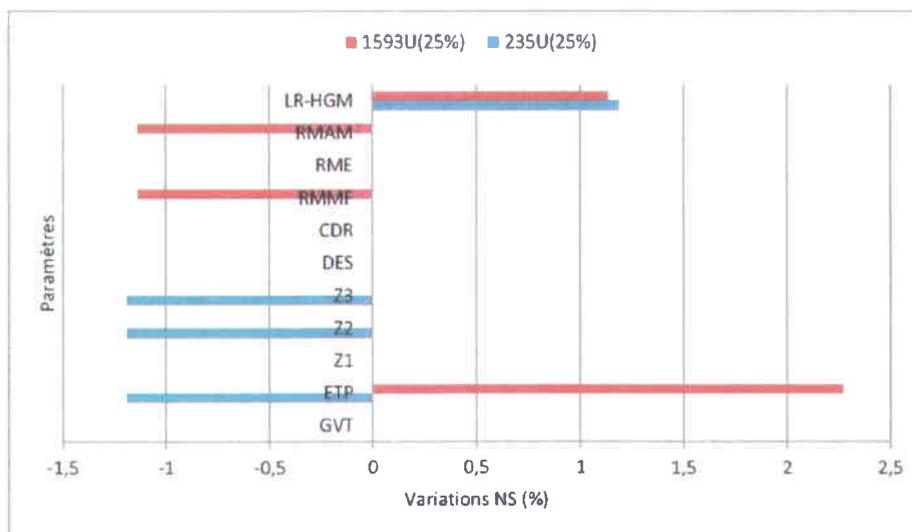


Figure 6-6 : Impacts des variations de 25 % autour des valeurs de référence des 11 paramètres sur les trois indicateurs de performance - deux projets d'UHRH.

6.4.4 Variation de 50 % des valeurs de référence

La figure 6-7 présente les résultats de simulation avec le niveau de variation de 50 % des paramètres.

Pour le NS, l'ETP a un impact plus élevé avec 1 593 UHRH qu'avec 235 UHRH, mais l'impact reste à un niveau minime ou moyen. Il y a cinq paramètres (RME, RMMF, CDR, DES et Z1) pour lesquels le niveau de changement n'entraîne aucun impact sur le NS. Pour les autres paramètres (Z3, Z2 et GVT, LR-HGM), l'impact sur NS est plus élevé avec 235 UHRH qu'avec 1 593 UHRH, même si cet impact est minime.

Pour l'ERSVET, l'ETP a un impact plus élevé avec 235 UHRH qu'avec 1 593 UHRH. La situation est identique avec Z2. Cependant, les autres paramètres ont des impacts très faibles, voire nuls sur l'ERSVET.

Pour le RCEQM, LR-HGM, RMAM, RMMF et ETP entraînent des impacts plus importants avec 1 593 UHRH qu'avec 235 UHRH, ce qui est l'inverse avec DES, Z3, Z2, Z1 et GVT. RMMF et Z1 induisent des impacts contradictoires, mais ces impacts restent minimes. LR-HGM garde la deuxième place en matière de sensibilité après l'ETP.

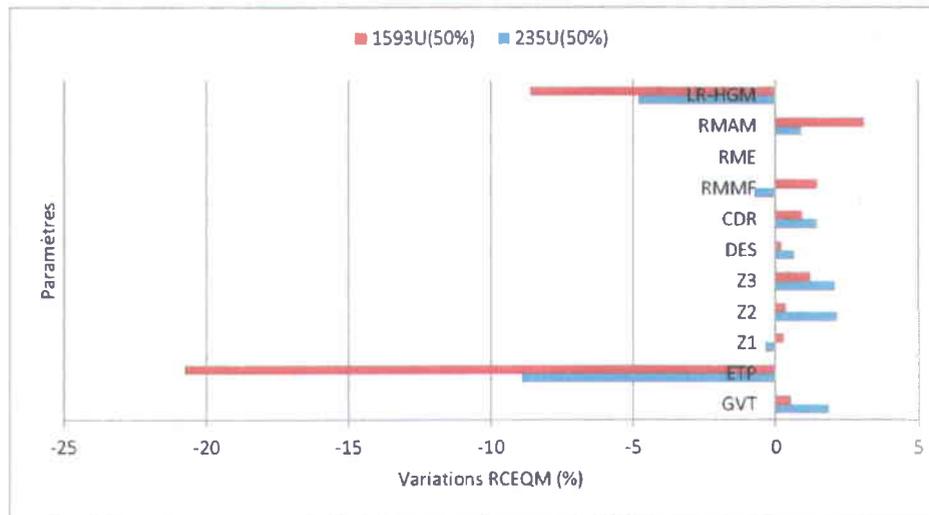
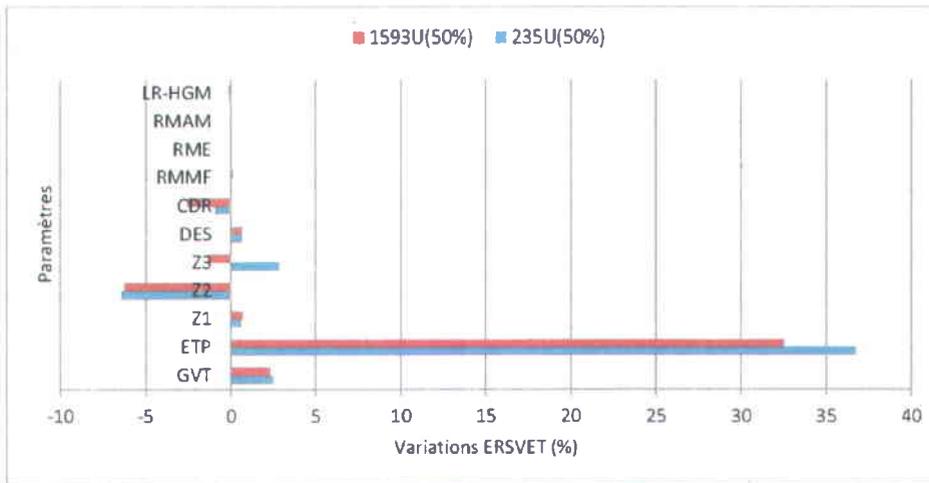
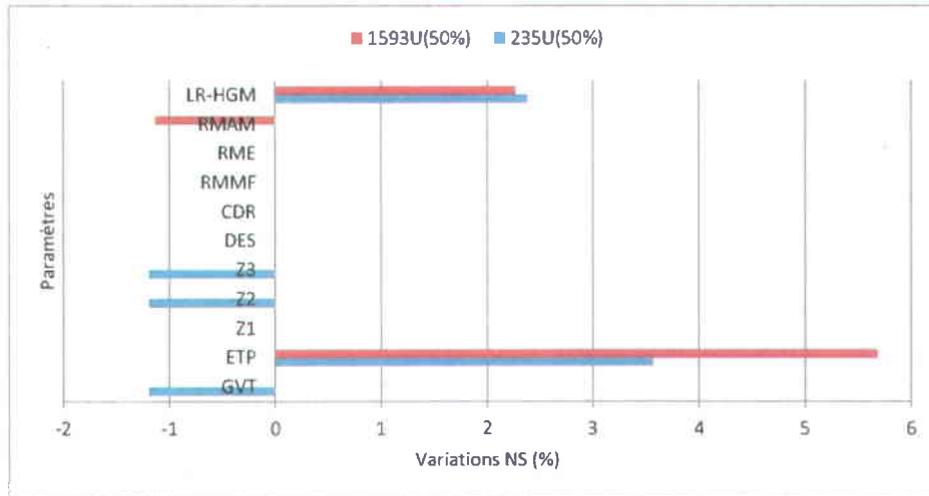


Figure 6-7 : Impacts des variations de 50 % autour des valeurs de référence des 11 paramètres sur les trois indicateurs de performance - deux projets d'UHRH.

6.5 Synthèse

Pour classer les niveaux de sensibilité des paramètres, la valeur moyenne des variations des indicateurs a été calculée pour les trois indicateurs et les quatre cas de variation (moyenne des 12 valeurs). Les résultats montrent que l'ETP est le paramètre le plus sensible (Tableau 6-2). Ce paramètre a presque toujours un impact élevé sur les résultats de simulations. Les paramètres les plus sensibles après l'ETP sont les épaisseurs des deuxième (Z2) et troisième couches du sol (Z2). Les résultats pour le projet 1 593 UHRH sont donnés au tableau 6-2, en plus du classement des paramètres pour le projet 235 UHRH.

Tableau 6-2 : Comparaison des niveaux sensibilité des 11 paramètres – deux projets d'UHRH.

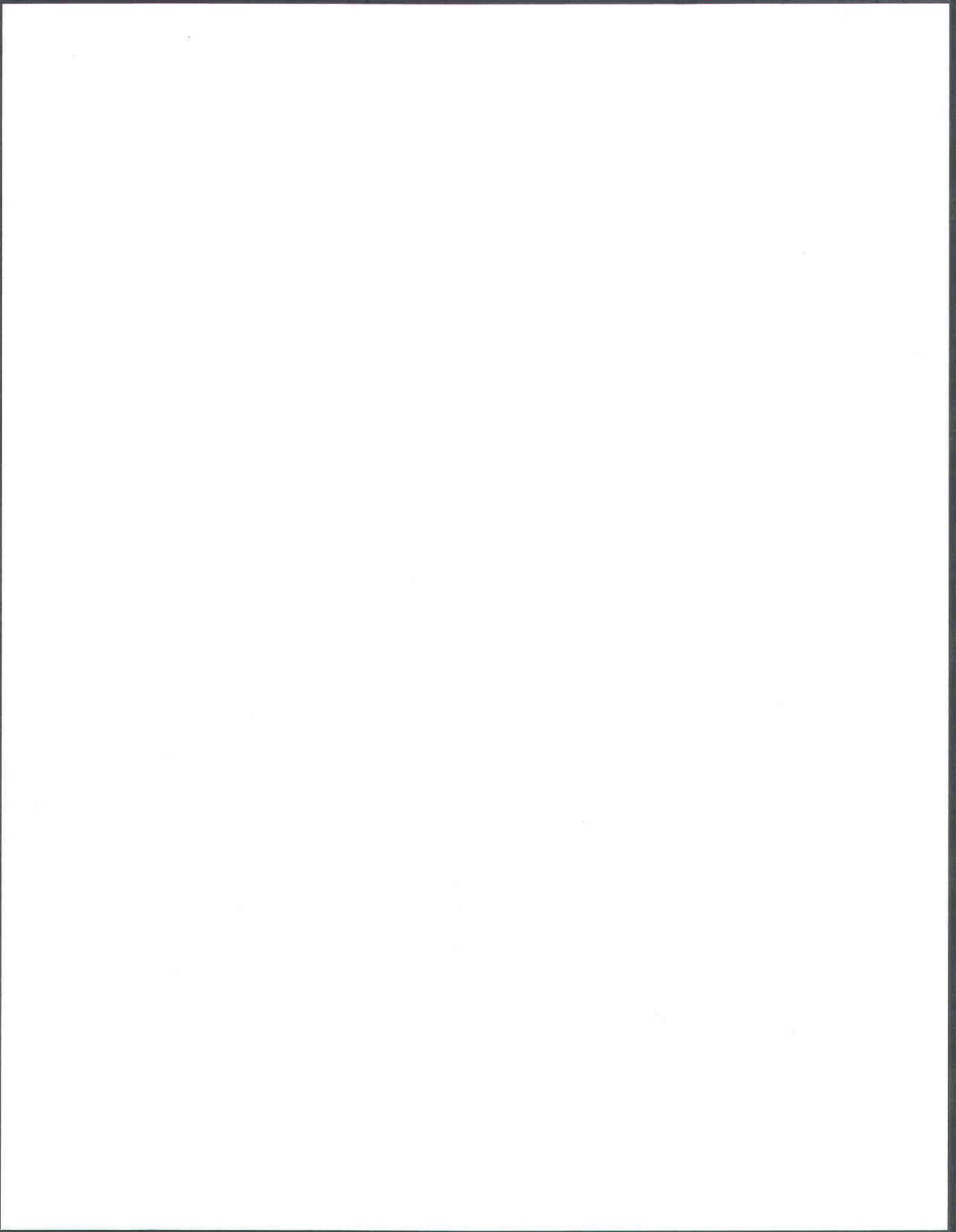
Paramètres	Moyenne de variations des trois indicateurs (1 593 UHRH) (%)	Jugement du niveau de sensibilité (1 593 UHRH)	Ordre du niveau de sensibilité	
			1 593 UHRH	235 UHRH
ETP	33,35	Grand	1	1
Z3	3,86	Minime	2	2
Z2	2,87	Minime	3	3
RMMF	2,46	Minime	4	5
LR- HGM	1,99	Minime	5	6
RMAM	1,74	Minime	6	7
CDR	0,91	Minime	7	9
GVT	0,62	Minime	8	4
DES	0,49	Minime	9	8
Z1	0,48	Minime	10	10
RME	0,00	Aucun	11	11

Cette analyse de sensibilité permet de confirmer qu'une bonne carte du type de sol a un rôle très important sur la qualité des simulations du régime hydrologique. Comparativement aux variations de l'indice foliaire et de la profondeur racinaire qui ont un impact minime sur les résultats de simulations. Ainsi, le régime hydrologique du bassin est mieux représenté à partir des caractéristiques physiques disponibles et des valeurs moyennes considérées pour l'indice foliaire et la profondeur racinaire. Lorsqu'il existe des erreurs de précision dans les classes d'occupation du sol, elles pourraient être préjudiciables aux résultats de simulation, mais moins avec des unités de calcul de faible surface qu'avec celles de surface plus élevée. L'ETP joue un rôle primordial sur la qualité des simulations. Les autres paramètres ont une faible influence.

Avec une petite unité de calcul, certains paramètres comme les coefficients de rugosité (sauf celui de l'eau) et la lame de référence de l'hydrogramme géomorphologique deviennent plus sensibles. Ce qui nécessite donc un niveau de précision plus élevé pour certains paramètres.

Pour l'utilisation du modèle HYDROTEL pour un bassin versant dans les régions tropicales de type mousson, comme celui de la rivière Cau, trois paramètres ajustables sont les plus importants pour l'étalonnage du modèle. Il s'agit du coefficient de l'ETP, de la lame de référence de l'hydrogramme géomorphologique et du coefficient de récession. Ces paramètres sont considérés comme ajustables pour le modèle. D'autres paramètres dits mesurables, mais ajustables en cas de nécessité, sont importants en matière de sensibilité pour le modèle. Ces paramètres sont : les épaisseurs des couches 2 et 3 du sol, les coefficients de rugosité sauf celui de l'eau, le gradient vertical des températures et le coefficient d'extinction.

Si la carte du type de sol est de moins bonne précision, le coefficient additif de la classe du sol (CAOC) devient un paramètre ajustable très important. Son niveau de sensibilité peut être similaire ou plus élevé que celui de l'ETP. Tous les paramètres mesurables avec un niveau de sensibilité non nul, mais ajustables en cas de nécessité, doivent faire l'objet d'une attention particulière lors de campagnes de collecte de données.



7 CAPACITÉ DE RECONSTRUCTION DU RÉGIME HYDROLOGIQUE DANS LE CAS DE DONNÉES RESTREINTES

7.1 Introduction

Le manque de données et leur piètre qualité, lorsque ces données existent, sont deux problèmes généralement répandus dans les pays en voie de développement comme le Vietnam. En effet, la collecte de données nécessaires pour divers usages (recherches, développement, services publics, etc.) n'est toujours pas faite de manière rigoureuse. Plusieurs projets ont été mis en place depuis quelques années dans ces régions et leur implantation nécessite des données en quantité suffisante et d'une bonne qualité c-à-d. des données collectées avec une certaine rigueur. Parmi ces projets, on retrouve la gestion intégrée de l'eau par bassin versant (GIEBV) dont l'implantation devient aujourd'hui urgente au Vietnam dans une perspective de protection de l'environnement et de gestion durable de l'eau.

Cependant, dans les pays en voie de développement comme le Vietnam, les données disponibles ne sont pas toujours suffisantes et de bonne qualité. Aujourd'hui, dans ce contexte de la nécessité de mise en place de la GIEBV, lorsque les données hydrométéorologiques importantes comme le débit à l'exutoire, la pluie, la température sont restreintes (quantité réduite) et/ou sont de mauvaise qualité, on se doit de se poser la question suivante : comment la quantité et la qualité des données peuvent elles influencer les résultats des simulations?

Deux objectifs sont visés dans ce chapitre. Dans un premier temps, il s'agit d'analyser la capacité du modèle HYDROTEL à reconstruire le régime hydrologique de la rivière Cau à partir des débits d'une station en amont du bassin. Le second objectif est d'analyser la capacité de reconstruction du régime hydrologique par HYDROTEL en faisant l'hypothèse que les données météorologiques sont de moins bonne qualité et en nombre réduit.

7.2 Capacité de reconstruction du régime hydrologique d'une station en amont du bassin

7.2.1 Méthodologie

Dans cette première partie, l'objectif est d'évaluer la capacité du modèle à reconstruire le régime hydrologique du bassin versant dans le cas de données hydrométriques restreintes. Il s'agit plus spécifiquement d'évaluer la qualité des résultats de validation du modèle d'une station de mesures de débits située en amont (données n'ayant pas servi à l'étalonnage du modèle). Ainsi, dans le cadre de cette étude, le jeu de paramètres obtenus après étalonnage du modèle à partir des données de la station Gia Bay (station située en aval du bassin) a été appliqué pour simuler le débit à la station Thac Rieng, située en amont du bassin.

La localisation précise d'une station de mesures de débits sur le tronçon de rivière approprié est d'une importance capitale dans le processus d'étalonnage et de validation du modèle HYDROTEL. En effet, la surface de drainage qui peut être associée à une station pourrait varier lorsqu'il existe une incertitude dans la position géographique de la station. Ainsi, il a été constaté que les coordonnées géographiques de la station amont fournies dans le cadre de cette étude sont des données peu fiables. En effet, on sait que cette station devrait se situer sur le tronçon principal de la rivière Cau. Par conséquent, il s'est posé le problème du choix de tronçon de rivière à associer à la position de cette station pour effectuer les simulations. Compte tenu des données disponibles sur la position géographique, deux possibilités s'offrent alors quant au choix du tronçon (N° 579, N° 580, Figure 7-1a) à associer à la station de débits. Cette situation entraîne une variation non négligeable de la surface du bassin de drainage (Figures 7-1b, 7-1c), soit environ 650 km² et 697 km². La méthodologie finalement adoptée, pour des raisons d'honnêteté scientifique, est d'effectuer une validation avec chacun des deux tronçons, considérant que les données sur la position géographique exacte de la station ne sont pas disponibles.

Les résultats de validation dans chacun des cas ont été évalués à partir des indicateurs de performance du modèle.

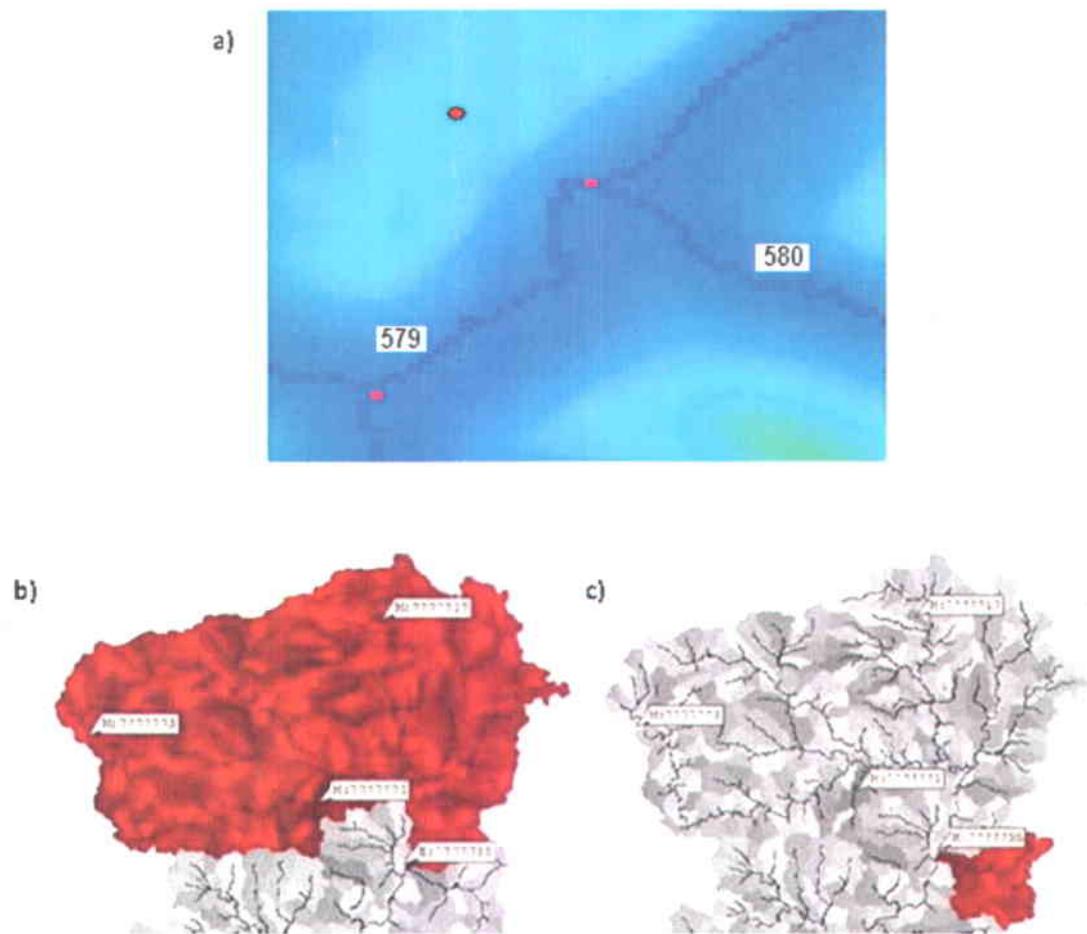


Figure 7-1 : Position et bassins de drainage de station hydrométrique Thac Rieng (en amont).

- a) Positions des tronçons associés à la station hydrométrique de Thac Rieng – point rouge- (source des données : ASVT).
- b) Bassin de drainage (en rouge) pour le tronçon N° 580. Superficie totale = 650 km².
- c) Bassin supplémentaire (en rouge) de drainage pour le tronçon N° 579. Superficie totale = 697 km².

Les données disponibles à la station amont pour la période d'étalonnage du modèle (1999-2002) sont des mesures de niveaux d'eau. Les débits ont alors été déterminés par la relation entre le débit et le niveau d'eau sur la période 1960–1981, période pour laquelle il existe des mesures de débits et de hauteurs d'eau :

$$Q (m^3/s) = 11,2h^2 + 3,82h - 3,21 \quad (7.1)$$

Avec h : hauteur (m).

Le jeu de paramètres obtenu après étalonnage du modèle avec le projet 1 593 UHRH avec les données de la station aval (Gia Bay, Chapitre 6) a été appliqué. Les résultats du tronçon qui se situe à la station Thac Rieng sont notés « T-TR-Simulé » et les données observées sont notées « T-TR-Mesuré ». Les résultats du tronçon qui se situe à la station Gia Bay sont notés « GB-Simulé », tandis que les données observées à la même station sont notées « S-GB-Mesuré ».

7.2.2 Résultats

Les résultats montrent que la simulation est de moins bonne qualité avec les deux tronçons de la station amont, soit le NS de 0,57 et 0,55, et l'ERSVET de 42,98 % et 46 % (Tableau 7-1). Comme on pouvait s'y attendre, une meilleure qualité de simulation a été obtenue au tronçon qui se situe à la station Gia Bay avec un NS de 0,88 et une ERSVET de 0,15 % (Tableau 7-1).

Tableau 7-1 : Résultats de simulation avec les deux stations hydrométriques.

Indicateurs de performance	Tronçon Gia Bay	Tronçon Thac Rieng	
		N° 579	N° 580
NS	0,88	0,57	0,55
RCEQM (m ³ /s)	1,08	0,45	0,46
ERSVET (%)	0,15	43	46

La comparaison entre les débits observés et simulés pour l'année 1999 est présentée à la figure 7-2 à titre d'exemple. Les résultats des autres années sont présentés en annexe (Figures A-31 à A-33). Les débits simulés avec le tronçon 579 ont été utilisés pour cette comparaison, car la différence reste négligeable entre les débits simulés des tronçons 579 et 580. On remarque que les régimes hydrologiques des deux tronçons où se situent les stations Thac Rieng (TR-Mesuré) et Gia Bay (GB-Mesuré) sont presque similaires, avec les pics du tronçon Gia Bay qui apparaissent un peu plus tard que ceux du tronçon Thac Rieng. Le tronçon Gia Bay est très bien simulé pour toute l'année. Par contre, le tronçon Thac Rieng est moins bien simulé. Il est particulièrement sous-estimé durant toute la période de juin à novembre. Néanmoins, la simulation du tronçon Thac Rieng suit bien la tendance de son régime hydrologique réel. Dans les périodes sèches, la différence entre les pointes observées et simulées du tronçon Thac Rieng est faible. On constate que le débit à la station Thac Rieng est généralement sous-estimé. Dans les périodes sèches, le régime est assez bien simulé, les grands écarts entre les débits simulés et observés se produisent plutôt dans les périodes de crue entre mai et septembre (Figure 7-2). En revanche, sa tendance est bien respectée dans l'ensemble.

En somme, la tendance du régime hydrique de la rivière à Thac Rieng est presque toujours respectée, même si la simulation est de moins bonne qualité à Thac Rieng qu'à Gia Bay. Le manque d'eau simulé par rapport aux observations est constant pour toutes les années à l'étude. Ces déficits pourraient aussi s'expliquer par le fait qu'il existe des aménagements hydroagricoles (rizières, irrigation, barrages) qui n'ont pas été pris en compte par le modèle, soit par manque d'informations, soit parce que le modèle ne comporte pas de sous-modèles dédiés à ces aménagements. Par ailleurs, notons que le modèle a été étalonné avec le projet 1 593 UHRH dans un contexte de manque de données associé à l'utilisation d'une carte d'occupation constante dans le temps malgré les changements d'occupation du sol dans ce bassin. Tout ceci pourrait avoir un impact sur le processus de validation.

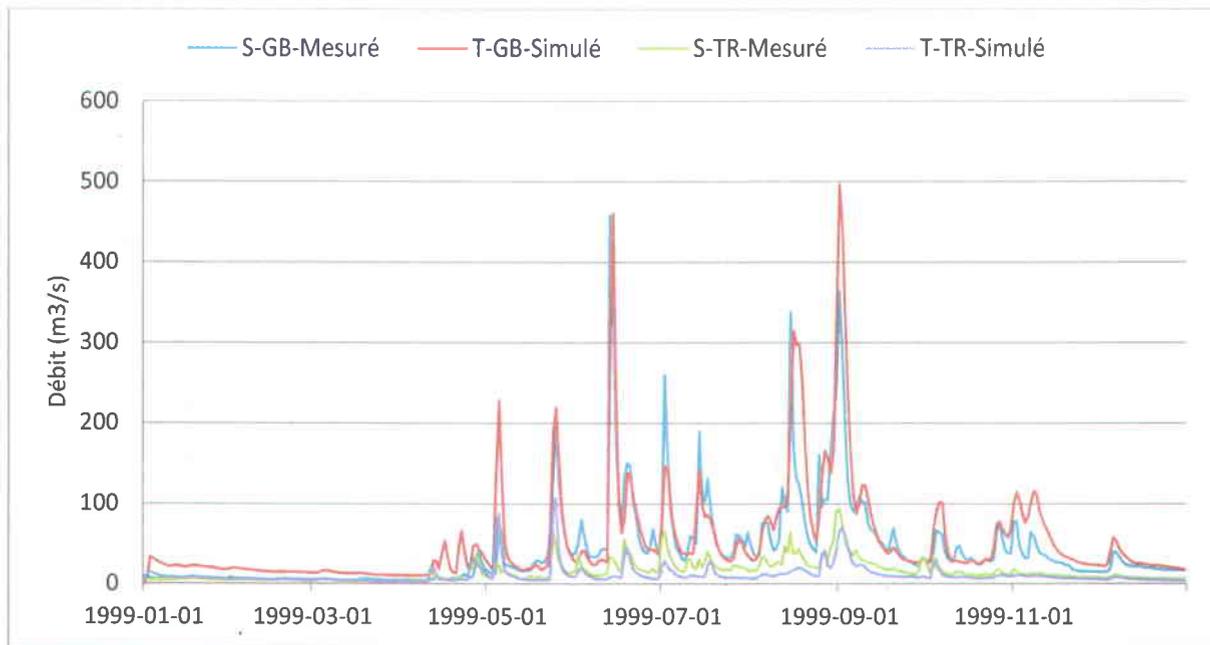


Figure 7-2 : Résultats de simulation avec deux stations de débit Gia Bay (en aval) et Thac Rieng (en amont) – année 1999.

7.3 Capacité de reconstruction du régime hydrologique à partir données météorologiques restreintes

7.3.1 Méthodologie

La méthodologie adoptée dans cette section consiste à ajouter plusieurs niveaux de bruit aux données météorologiques originales de manière aléatoire et ceci pour chaque jour de chaque année de la période d'étude. Pour la série de données journalières de chaque année, des valeurs de bruits sont ajoutées. On suppose que les bruits suivent une distribution normale de moyenne 0 et d'écart-type égal successivement à 5 %, 10 %, 15 % et 20 %. Pour chaque niveau de bruit, l'impact du bruit sur la qualité de la simulation du régime hydrologique a été évalué. Quatre niveaux de bruits ou erreurs ont été retenus : 5 %, 10 %, 15 % et 20 % de chaque valeur de la série. Les paramètres météorologiques considérés sont la pluie et la température, car ces deux paramètres météorologiques sont les plus importants pour l'ensemble des processus hydrologiques simulés.

Dans une première phase, l'impact sur la qualité de la simulation de l'ajout de bruits aux données a été déterminé dans les trois cas suivants :

- ajout de bruits aux données de température pour les six stations météorologiques dans le bassin versant;
- ajout de bruits aux données de pluie pour les six stations météorologiques et les douze stations pluviométriques;
- combinaison de l'ajout de bruits aux données de température et de pluie pour les six stations météorologiques et les douze stations pluviométriques.

L'analyse de l'impact a été effectuée à partir du projet 1 593 UHRH et la simulation sans bruit a été considérée comme situation de référence. Pour chaque niveau de bruit introduit dans les données, l'évaluation de l'impact du bruit sur les résultats a été réalisée en comparant les valeurs des trois indicateurs de simulation avec celles de la situation de référence. Ces comparaisons ont permis de déterminer les niveaux de bruit et les types de données ayant les impacts les plus élevés sur la qualité des résultats de simulation.

Dans une deuxième phase, certaines stations météorologiques et pluviométriques ont été enlevées du jeu de données d'entrées et les simulations ont été faites à partir des données des stations restantes dans le réseau d'observation. Les résultats ont permis d'évaluer l'impact du manque de stations météorologiques et/ou pluviométriques et le rôle joué par la position des stations de collecte de données sur la qualité des résultats de simulation. Les stations ont été enlevées une à la fois, puis deux à la fois, afin de connaître les conséquences d'un manque d'une ou de plusieurs stations sur la qualité des résultats de simulations. Finalement, dans une dernière phase, pour une ou deux stations météorologique à la fois, les données de température ont été enlevées tout en conservant les données de pluie. L'objectif de cette dernière phase est de déterminer l'impact du manque de données de température dans une ou deux stations météorologiques sur les résultats de simulations. Les résultats de la dernière phase permettront d'identifier, au sein des stations météorologiques, les données les plus importantes entre la température et la pluviométrie. Cela permettra de formuler des recommandations pour le réseau d'observations. Il est important de préciser que le modèle compense tout déficit de données par une interpolation.

Pour les simulations, les indicateurs de performance ont été considérés suivant un ordre de priorité. D'abord, le changement du volume d'eau a été évalué à l'aide de l'indicateur ERSVET. En effet, le volume d'eau est l'indicateur le plus important pour reconstituer le régime hydrologique d'une rivière dans le cadre de la GIEBV. Ensuite, le changement de l'indicateur NS

a été évalué, car cet indicateur est sensible aux valeurs extrêmes. Enfin, le synchronisme des hydrogrammes simulé et observé a été évalué à partir de l'indicateur RCEQM.

Pour évaluer les impacts des données sur la qualité des résultats de simulation, une grille a été établie afin de porter un jugement sur la valeur absolue du pourcentage de changement entre les résultats obtenus avec les différents niveaux de bruit et les résultats de la situation de référence (Tableau 7-2).

Tableau 7-2 : Grille de jugement des impacts du niveau du bruit.

Valeur absolue du pourcentage de changement $ p $ (%)	$p=0\%$	$0< p \leq 5\%$	Entre $5\%< p \leq 15\%$	$ p \geq 15\%$
Niveau de l'impact	Aucun	Faible	Moyen	Élevé

La période choisie pour cette étude est 1999-2002, soit quatre ans. La station de débits de Gia Bay, située à l'exutoire du bassin, a été utilisée pour juger des résultats obtenus.

7.3.2 Impacts du bruit dans les données de température et de pluie

7.3.2.1 Température

Tableau 7-3 : Impact du bruit dans les données de température sur les indicateurs.

Niveau du bruit	5 %		10 %		15 %		20 %	
	%	Niveau	%	Niveau	%	Niveau	%	Niveau
ERSVET	0,3	Minime	0,4	Minime	7	Moyen	12	Moyen
NS	0	Aucun	0	Aucun	0	Aucun	1	Minime
RCEQM	0,8	Minime	0,5	Minime	1	Minime	-3	Minime

Les résultats de l'impact du bruit dans les données de température pour les six stations météorologiques mettent en relief des impacts variables sur les indicateurs de performance en fonction du niveau du bruit (Tableau 7-3).

- ERSVET : Avec un niveau de bruit de 10 % sur la température, l'impact sur l'écoulement total est minime (moins de 5 % de variation du volume d'eau). Par contre, le niveau de variation augmente rapidement quand le bruit est supérieur à 10 %. De 0,4 % de variation relative du volume d'eau avec 10 % de bruit, on passe à 12 % d'augmentation de l'erreur avec 20 % de bruit. Autrement dit, si on double le niveau du bruit, le volume est multiplié par 26.
- NS : Cet indicateur ne change aucunement ou très peu avec la variation de la température (variation maximale de 1 % avec 20 % de bruit).
- RCEQM : La variation de cet indicateur reste également minime.

Notons ici que seulement six des 18 stations, soit le tiers, ont des données de température. Avec des bruits d'au plus 10 %, les impacts apparaissent comme minimes ou presque nuls sur tous les indicateurs, mais lorsque le bruit atteint au moins 15 %, ils affectent clairement la qualité de la simulation. De plus, avec des bruits de plus de 15 %, on constate aussi que l'impact est beaucoup plus important sur le volume d'eau que sur les autres indicateurs. Par conséquent, pour le bassin versant de la rivière Cau ou pour d'autres bassins similaires, la précision des données de température joue un rôle important dans la reconstitution du bilan d'eau, surtout pour des niveaux d'incertitudes dans les données de température d'écart-type supérieurs à 15 %.

7.3.2.2 Pluie

Les résultats de l'impact du bruit dans les données de pluie des 18 stations mettent en relief des impacts variables selon les indicateurs de simulation (Tableau 7-4) :

- ERSVET : Avec tous les niveaux de bruit, l'impact sur la variation du volume d'eau demeure presque toujours au même niveau, soit environ 10 %.
- NS : La variation de cet indicateur demeure minime pour tous les niveaux de bruit, soit -2,3 % et -3,4 %. Cette variation n'évolue pas avec le niveau de bruit.
- RCEQM : Cet indicateur apparaît comme étant le plus sensible parmi les trois indicateurs de simulation. Sa variation se situe, pour les quatre niveaux de bruit, entre 8 % et 12 %, soit un impact considéré comme moyen.

Pour la température et la pluie considérées individuellement, les résultats obtenus (Tableaux 7-3 et 7-4) démontrent que l'impact du bruit est moins élevé sur les données de pluie que sur celles de la température. Dans cette analyse, les bruits de la pluie ont été ajoutés aux 18 stations et les bruits dans les températures n'ont été ajoutés qu'au tiers de l'ensemble de ces stations. Cependant, la plus forte variation du volume d'eau avec le bruit dans les pluies (11 %, Tableau 7-4) est légèrement inférieure à la plus forte variation obtenue avec le bruit dans les températures (12 %, Tableau 7-3). Ces impacts similaires sur la qualité de simulation avec quatre niveaux de bruit pourraient venir du fait que les données de pluie sont disponibles pour les 18 stations, donc les bruits pourraient se compenser entre les stations dans le processus de l'interpolation des données météorologiques pour le bassin à l'étude.

Tableau 7-4 : Impact du bruit dans les données de pluie sur les indicateurs.

Niveau du bruit	5 %		10 %		15 %		20 %	
		Niveau		Niveau		Niveau		Niveau
Variation relative de l'indicateur (%)								
ERSVET	10	Moyen	10,5	Moyen	10,8	Moyen	9,7	Moyen
NS	-3,4	Faible	-2,3	Faible	-3,4	Faible	-2,3	Faible
RCEQM	11,7	Moyen	8,6	Moyen	11,6	Moyen	9,3	Moyen

7.3.2.3 Combinaison de bruits

Dans le cas de la combinaison, il s'agit d'ajouter quatre niveaux de bruits aux données de pluie des 18 stations ainsi qu'aux données de température des six stations météorologiques. Les résultats des simulations mettent en relief des variations plus importantes du volume d'eau que précédemment (Tableau 7-5) :

- ERSVET : La combinaison des bruits aboutit à des impacts significatifs pour cet indicateur. Avec 5 % du bruit, la variation relative de l'écoulement total est de 10 % et il

augmente de façon quasi linéaire avec le niveau du bruit, atteignant 21 % pour 20 % de bruit.

- NS : La variation de cet indicateur est située entre -4 % et 2 %, ce qui est considéré comme minime pour tous les niveaux de bruits.
- RCEQM : Cet indicateur est le deuxième plus sensible parmi les trois indicateurs de simulation. L'impact de la combinaison des bruits décroît de 12 % (impact jugé moyen) avec 5 % de bruit à un niveau de -3 % (impact jugé faible) pour un bruit d'écart-type de 20 %.

La combinaison des bruits dans les données de pluie et de température apparaît comme ayant une influence plus forte sur la qualité de la simulation que celle des bruits séparés. Avec seulement 5 % des bruits combinés, l'erreur sur l'écoulement total (ERSVET), qui est l'indicateur considéré comme prioritaire, est à un niveau jugé moyen et il augmente quasi linéairement avec le niveau du bruit. Ainsi, il apparaît que la précision des données d'entrée de pluie et de température pour tout modèle hydrologique est très importante dans la reconstitution du régime hydrologique.

Tableau 7-5 : Impact de la combinaison de bruits sur les indicateurs.

Niveau du bruit	5 %		10 %		15 %		20 %	
	%	Niveau	%	Niveau	%	Niveau	%	Niveau
Variation relative de l'indicateur								
ERSVET	10,3	Moyen	11,5	Moyen	17,8	Élevé	21,1	Élevé
NS	-3,4	Faible	-2,3	Faible	-1,1	Faible	1,1	Faible
RCEQM	11,7	Moyen	8	Moyen	4,5	Faible	-3,3	Faible

7.3.2.4 Conclusion partielle

Les analyses sur l'impact des niveaux de bruits dans les données de température et de précipitation amènent à conclure que la précision des données de pluie et de température doit

être considérée comme une priorité pour la performance d'un modèle hydrologique distribué comme HYDROTEL. Un niveau de bruit combiné d'écart-type de 5 % diminue notablement la qualité de la simulation. Pour utiliser un modèle hydrologique en appui à la GIEBV, il est non seulement important de comprendre le modèle et les processus qui le sous-tendent pour une manipulation efficace du modèle et une bonne interprétation des résultats en sortie, mais il faudrait aussi mettre en place un processus rigoureux et efficace de collecte et de traitement des données d'entrée comme la pluie et la température.

7.3.3 Impacts du manque de stations sur la qualité de la simulation

7.3.3.1 Stations météorologiques

En enlevant une à la fois chacune des stations météorologiques, les résultats montrent que l'impact sur la qualité de la simulation est variable d'une station à une autre (Tableau 7-6). Chacune des stations a un impact non négligeable sur les indicateurs de performance. On constate ainsi que le retrait d'une station produit au moins une influence moyenne (station 7777771) sur les résultats. Une classification de l'importance d'une station dans les données d'entrée a été effectuée à partir du niveau d'importance considéré pour les trois indicateurs. L'ordre d'importance a été calculé à partir des pourcentages de variation des indicateurs de performance en comparant les valeurs de référence (aucune station manquante) aux résultats obtenus lorsque la station est retirée.

La comparaison de l'influence des différents niveaux d'influence des stations montre que la position géographique d'une station par rapport à la distribution spatiale d'un réseau météorologique joue un rôle important. Par exemple, le retrait de la station 7777771 du réseau produit l'influence la plus faible sur la qualité de simulation, car son absence pourrait être compensée par les stations les plus proches géographiquement du bassin (Figures A-5 et A-6 en annexe). Dans le cas du bassin d'étude, les données de trois stations, en l'occurrence les stations 7777775, 7777712, 7777778, couvrant la région d'observation de la station 7777771, pourraient permettre d'interpoler les données de cette station. Cependant, le manque des deux premières stations (7777778 et 7777723) apparaît comme réellement préjudiciable pour la reconstitution du régime hydrologique de la rivière Cau. En effet, les résultats d'impacts révèlent que les autres stations ne permettent pas d'interpoler, de manière au moins acceptable, ces données météorologiques manquantes par la méthode des « trois stations les plus proches ».

Tableau 7-6 : Impact d'une station météorologique manquante sur les indicateurs de référence.

Numéro de station	Variation relative des indicateurs de performance						Jugement de l'ensemble des impacts	Ordre d'importance
	ERSVET		NS		RCEQM			
	%	Niveau	%	Niveau	%	Niveau		
7777778	18,70	Élevé	18,1	Élevé	-54,2	Élevé	Élevé	1
7777723	16,91	Élevé	15,9	Élevé	-48,7	Élevé	Élevé	2
7777775	12,18	Moyen	12,5	Moyen	-48,3	Élevé	Moyen	3
7777712	11,84	Moyen	12,5	Moyen	-39,8	Élevé	Moyen	4
7777730	12,80	Moyen	12,5	Moyen	-38,3	Élevé	Moyen	5
7777771	-12,52	Moyen	2,2	Faible	-7,1	Moyen	Moyen	6

7.3.3.2 Stations pluviométriques

Les résultats de simulation, lorsqu'on enlève une à la fois chacune des 12 stations pluviométriques, montrent que chaque station a un impact jugé comme relativement élevé sur la qualité de la simulation, sauf la station 7777735 (Tableau 7-7). Pour cette station, l'impact est jugé comme faible.

Comme dans le cas des stations météorologiques, l'influence d'une station pluviométrique manquante sur la qualité de la simulation dépend fortement de la distribution spatiale du réseau observé. La station pluviométrique 7777735 apparaît à l'issue des simulations comme la station la moins importante. En effet, son retrait du réseau d'observation pourrait être aisément compensé par les stations météorologiques et pluviométriques 7777716 et 7777713 qui sont les plus proches (Figures A-5 et A-6). Les stations 7777716 et 7777713, étant géographiquement très proches de cette station, joueraient aussi des rôles relativement faibles dans la reconstitution du régime hydrologique. Par contre, les stations 7777777 et 7777774 sont parmi les stations les plus importantes pour la qualité des résultats de simulation, car elles sont situées dans des endroits qui ne pourraient pas être couverts par l'interpolation par d'autres stations.

Tableau 7-7 : Impact d'une station pluviométrique manquante sur les indicateurs de référence.

Numéro de station	Variation relative des indicateurs de performance						Jugement de l'ensemble des impacts	Niveau d'impact
	ERSVET		NS		RCEQM			
	%	Niveau	%	Niveau	%	Niveau		
7777777	22,7	Élevé	14,7	Moyen	-45,2	Élevé	Élevé	1
7777774	8,9	Moyen	17	Élevé	-50,9	Élevé	Élevé	2
7777720	11,5	Moyen	15,9	Élevé	-47,6	Élevé	Élevé	3
7777776	15,3	Élevé	12,5	Moyen	-39,4	Élevé	Élevé	4
7777721	14,1	Moyen	12,5	Moyen	-40	Élevé	Moyen	5
7777772	12,3	Moyen	12,5	Moyen	-38,4	Élevé	Moyen	6
7777773	12,5	Moyen	12,5	Moyen	-38	Élevé	Moyen	7
7777710	12,3	Moyen	12,5	Moyen	-38	Élevé	Moyen	8
7777717	14,3	Moyen	11,3	Moyen	-36,3	Élevé	Moyen	9
7777716	12,7	Moyen	10,2	Moyen	-31,1	Élevé	Moyen	10
7777713	11,2	Moyen	7,9	Moyen	-27,1	Élevé	Moyen	11
7777735	-5	Moyen	1,1	Faible	-3,1	Faible	Faible	12

Enfin, précisons qu'il y a 18 stations qui mesurent la pluie, trois fois plus que celles qui mesurent la température, mais le retrait d'une station pluviométrique du réseau produit tout de même un impact jugé élevé sur les résultats de la simulation, excepté la station 7777735. On pourrait alors conclure que pour le bassin versant de la rivière Cau, le rôle d'une station pluviométrique n'est pas moins important que celui d'une station météorologique.

7.3.3.3 Stations météorologiques et/ou pluviométriques

Dans cette partie, deux stations ont été enlevées à la fois. Sur la base des résultats des précédentes analyses (Tableaux 7-6 et 7-7), deux types de combinaison ont été considérés : le

retrait du réseau de deux stations de plus faible importance et celui de deux stations de plus fort impact.

Dans le premier cas, celui des stations de plus faible importance, trois possibilités de combinaison de stations manquantes ont été testées :

- Deux stations pluviométriques de plus faible importance.
- Une station météorologique et une station pluviométrique de plus faible importance.
- Deux stations météorologiques de plus faible importance.

Les résultats montrent que la combinaison de deux stations pluviométriques de plus faible importance produit le plus fort impact sur les résultats de simulation, suivi de la combinaison d'une station météorologique et d'une station pluviométrique (Tableau 7-8). Enfin, la combinaison de stations météorologiques de plus faible importance apparaît comme ayant un impact moins grand sur le régime hydrologique (niveau moyen, Tableau 7-8). Au regard de ces résultats, le retrait de deux stations du réseau, même si elles apparaissent comme les stations les moins importantes, pourrait avoir un impact au moins moyen, et donc non négligeable, sur la reconstitution du régime hydrologique de la rivière Cau.

Tableau 7-8 : Impacts du manque de deux stations de plus faible importance sur les indicateurs de référence.

Type de combinaison de stations	Numéro des stations combinées	Variation relative des indicateurs de performance						Impact total
		ERSVET		NS		RCEQM		
		%	Niveau	%	Niveau	%	Niveau	
Pluviométrique	7777713 7777735	7,9	Moyen	19,32	Élevé	-57	Élevé	Élevé
Météorologique et pluviométrique	7777771 7777735	-18,6	Élevé	4,55	Faible	-16	Élevé	Moyen
Météorologiques	7777730 7777771	-12,5	Moyen	2,27	Faible	-7,1	Moyen	Moyen

Dans le deuxième cas, celui des stations de plus forte importance, trois possibilités de combinaison de stations manquantes ont été analysées :

- Deux stations pluviométriques de plus forte importance.
- Une station météorologique et une station de pluie de plus forte importance.
- Deux stations météorologiques de plus forte importance.

Les résultats de l'analyse permettent de conclure que le retrait du réseau de deux stations de forte importance nuit gravement à la qualité des résultats de simulation, et ce, peu importe le type de station (Tableau 7-9).

Tableau 7-9 : Impacts du manque de deux stations plus fortes en importance sur trois indicateurs de référence.

Stations	ERSVET		NS		RCEQM		Impact total	Numéro de la station
	%	Niveau	%	Niveau	%	Niveau		
Météorologiques	18,4	Élevé	34	Élevé	-87,4	Élevé	Élevé	7777778 7777723
Pluviométriques	18,3	Élevé	31,8	Élevé	8,9	Élevé	Élevé	7777777 7777774
Météorologique et pluviométrique	19,7	Élevé	22,7	Élevé	-63,9	Élevé	Élevé	7777778 7777777

7.3.3.4 Températures et pluies au sein des stations météorologiques

Pour comparer le niveau d'importance entre la température et la pluie au sein des stations météorologiques, les données de température ont été enlevées au sein d'une station météorologique, puis de deux stations à la fois, et les simulations ont été faites à partir des données restantes. Les résultats montrent qu'en cas de déficit de données de températures au sein d'une station météorologique, l'impact sur les indicateurs de performance est généralement négligeable et atteint 7 % à 9 % (niveau moyen) dans le cas de deux stations et pour l'erreur relative sur le volume de l'écoulement total ERSVET (Tableau 7-10). Dans le cas d'une station météorologique, le manque de données de températures a un effet négligeable sur les indicateurs de performance. Dans le cas du manque de données en deux stations, toutes combinaisons confondues, les résultats demeurent similaires en matière d'impact sur les indicateurs de performance.

La comparaison de ces résultats avec ceux obtenus lorsqu'on enlève une ou deux stations météorologiques (Tableau 7-6) ou de pluie (Tableau 7-7) permet de conclure que le manque de données de pluie a une influence plus importante sur les résultats de simulation que le manque de données de température selon le réseau d'observation dans ce bassin versant. Le modèle se

base sur des interpolations pour déterminer la pluie et la température pour chaque unité de simulation (UHRH) lors des simulations. On pourrait déduire de ces résultats que le manque de données de pluies paraît préjudiciable aux résultats d'interpolation et, par conséquent, à la qualité de la simulation, comparativement au manque de données de températures. Cela permet de conclure que pour améliorer le réseau de collecte de données météorologiques dans le bassin versant de la rivière Cau, la priorité devrait être accordée aux données de pluie en cas de limitation des ressources.

Tableau 7-10 : Impact de manque de la température au sein d'une station météorologique.

Numéro de station	Variation relative des indicateurs de performance						Impact total
	ERSVET		NS		RCEQM		
	%	Niveau	%	Niveau	%	Niveau	
7777778	0	Aucun	0	Aucun	0	Aucun	Aucun
7777712	0	Faible	0	Aucun	0	Aucun	Aucun
7777775	0,1	Faible	0	Aucun	0	Aucun	Aucun
7777723	8,3	Moyen	0	Aucun	0,1	Aucun	Faible
7777771	7	Moyen	0	Aucun	0	Aucun	Faible
7777730	0	Aucun	0	Aucun	0	Aucun	Aucun
7777771 7777730	7	Moyen	0	Aucun	0	Aucun	Faible
7777778 7777712	0	Faible	0	Aucun	0	Aucun	Aucun
7777775 7777723	8,3	Moyen	0	Aucun	0,1	Aucun	Faible

7.4 Synthèse

En somme, il faudrait rappeler que dans le cadre de cette thèse, six stations météorologiques et 12 stations pluviométriques ont servi à simuler le régime hydrologique du bassin versant de la rivière Cau d'une superficie de 2 760 km². Excepté les stations 7777735 et 7777771, respectivement pluviométriques et météorologiques, l'absence de l'une de ces stations conduirait sans doute à une diminution importante des résultats de simulation. Par ailleurs, malgré qu'elles soient de faible importance individuellement, la combinaison de ces deux stations pourrait produire un impact tout de même significatif sur la qualité des simulations. En considérant que le nombre de stations est suffisant pour ce bassin, une diminution du nombre de celles-ci nuirait à la performance du modèle. Pour les bassins ayant des conditions météorologiques similaires, ce nombre de stations pourrait servir de référence.

La position des stations de collecte de données apparaît également comme ayant une influence certaine sur la qualité des simulations. Idéalement, la collecte doit se faire au plus grand nombre de stations disponibles. Dans le cas où, pour des raisons économiques, techniques ou autres, on doit se restreindre dans la collecte, il faut s'assurer de collecter les données ou installer des stations qui pourraient être représentatives de la variabilité des conditions météorologiques du bassin versant. Il faudrait aussi accorder une priorité aux données des pluies par rapport aux données des températures. En effet, le manque de données de températures au sein de stations météorologiques a un effet négligeable, ou à peine visible, sur la qualité des résultats de simulations. Cependant, le manque de pluies au sein des stations météorologiques a un impact significatif sur les résultats de simulation. Il est aussi remarqué que les stations doivent être situées aux endroits appropriés, facilitant ainsi l'étalonnage d'un modèle hydrologique pour la mise en place de la GIEBV. Il s'agit d'un point important à prendre en compte, particulièrement lorsque de nouvelles stations de surveillance des conditions météorologiques doivent être installées sur un bassin. Au-delà des considérations sur l'accessibilité (par un réseau routier approprié), la contribution de toutes les stations dans le réseau de suivi des conditions météorologiques et de gestion des ressources en eau doit être prise en compte.

Ces points importants doivent davantage être soulignés dans les pays en voie de développement comme le Vietnam. Dans ces pays, le réseau de stations météorologiques et pluviométriques est, depuis ces dernières années, mis à contribution dans la mise en place de la GIEBV. Pour ce faire, il est nécessaire de mettre en place une collaboration étroite entre différents services en charge de la gestion des bassins versants, de l'environnement, des

infrastructures et les hydrologues qui sont ceux qui utilisent ces données en entrée aux modèles hydrologiques. Ces différents services et organismes travaillent généralement de manière séparée dans la plupart des pays en voie de développement.

Cas de données hydrométriques restreintes

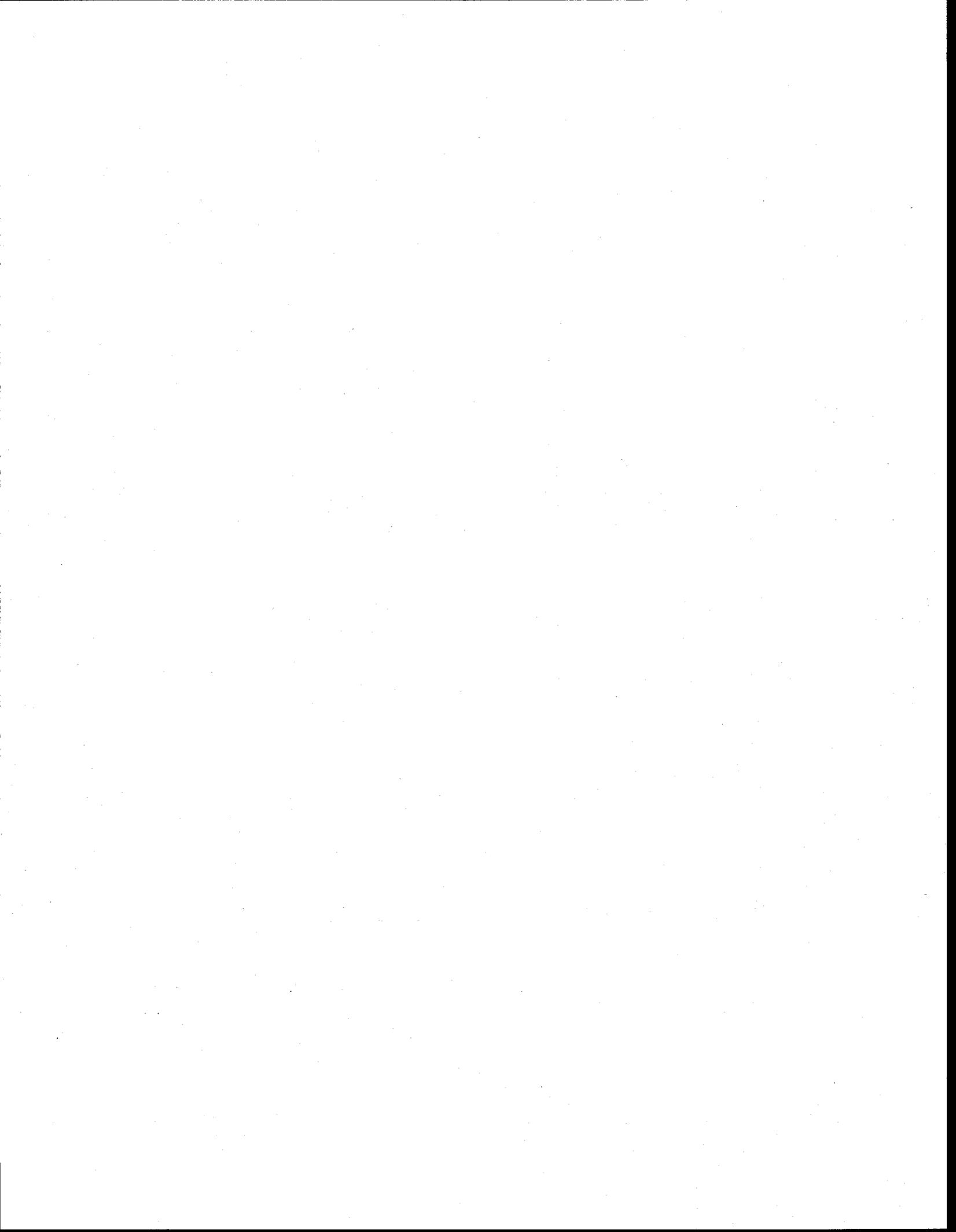
Le modèle HYDROTEL a assez bien représenté la tendance du régime hydrologique de la station Thac Rieng (en amont) malgré le manque d'eau remarqué pour toutes les années et la qualité de simulation moins bonne qu'à la station Gia Bay (en aval). La qualité des simulations pourrait être considérée comme acceptable étant donné que d'autres raisons (ex. : le manque d'informations sur les aménagements dans la partie amont du bassin) pourraient aussi expliquer cette situation. Notons également que le modèle HYDROTEL a été étalonné avec seulement un groupe d'UHRH pour tout le bassin versant. Cela permet d'avoir, pour un étalonnage, un seul jeu de paramètres pour l'ensemble du bassin. Étant donné la diversité des types de sol, des classes d'occupation du sol et de la topographie dans le bassin versant de la rivière Cau, il serait possible d'améliorer les résultats en utilisant des sous-groupes d'UHRH pour l'étalonnage et les simulations. Ces regroupements devraient s'appuyer sur l'un des indicateurs suivants : classes d'occupation de sol, topographie et surtout la disponibilité des données pour l'étalonnage. En outre, il existe aussi la possibilité que le lit de la rivière ait changé au cours de la trentaine d'années d'analyse; la relation entre le débit et la hauteur d'eau serait alors moins valable pour la période d'étude (1999-2002).

Dans le cas de données météorologiques restreintes

Les analyses précédentes nous permettent de conclure que l'application avec succès d'un modèle hydrologique ne dépend pas seulement de la capacité du modèle ou du niveau de compréhension des processus par les personnes qui le manipulent. La qualité des données à l'entrée occupe également une place très importante, comme le démontre le manque de stations météorologique ou pluviométrique dans ce bassin versant. Cependant, le manque de données de température au sein d'une station a un impact négligeable par rapport au manque de données de pluie.

Ces résultats peuvent servir d'exemples pour d'autres indices météorologiques. La qualité du travail à toutes les étapes, telles que l'installation des stations, la prise de mesures et de notes, et la transmission et le traitement des données, influence de façon significative la performance du modèle hydrologique ainsi que le succès de la GIEBV. C'est un point souvent mal compris par les personnes impliquées dans la GIEBV dans les pays en voie de développement. Les

personnes qui collectent les données ne sont pas bien renseignées sur l'importance de leurs travaux. Par ailleurs, les gestionnaires portent plus d'attention à la capacité du modèle et des modélisateurs qu'au processus d'acquisition des données fiables qui alimentent le modèle.



8 CONCLUSION

Dans cette thèse, la performance du modèle hydrologique distribué HYDROTEL (Fortin *et al.*, 1995) appliqué dans une région tropicale de type mousson et dans un contexte de données restreintes est étudiée. Ce modèle a été développé dans un contexte de climat tempéré et un réseau abondant de stations pour la région de Québec. Il a été appliqué sur le bassin versant de la rivière Cau au Vietnam d'une superficie de 2 760 km², avec une station de débit en aval. Les données météorologiques disponibles sont limitées (883 km²/station de température et 368 km²/station de pluie). La carte d'occupation du sol est grossière. D'autres données d'entrée pour ce modèle hydrologique, comme l'épaisseur des couches du sol, l'indice foliaire, la profondeur racinaire et les coefficients de rugosité font défaut. Malgré ces conditions pouvant être considérées comme restreintes, le modèle HYDROTEL a relativement bien simulé, dans l'ensemble, le régime hydrologique du bassin versant de la rivière Cau.

Une analyse qualitative de l'ensemble de la performance du modèle montre qu'il possède plusieurs points forts pour cette région d'étude. En effet, le régime hydrologique est très bien simulé sur l'ensemble de la période d'étude. Pour la période 1999-2002, période d'étalonnage, l'indicateur Nash-Sutcliffe reste très élevé (0,88) et l'erreur relative sur écoulement total est aussi très bonne (0,15 %) avec le découpage spatial de 1 593 UHRH. Malgré le problème de surestimation des volumes d'eau en 2005 et 2006 lié au manque d'informations sur les aménagements dans le bassin, la validation du modèle sur la deuxième période d'étude 2003-2006 à l'exutoire du bassin est considéré comme un succès. En effet, l'indicateur Nash-Sutcliffe est de 0,72 et l'erreur relative sur écoulement total est de 13 % (Chapitre 6). Le modèle a permis d'avoir une bonne synchronisation entre la simulation et les observations. Les pointes de crues sont bien reproduites dans les saisons de pluie ainsi que dans les saisons sèches. Ces résultats fort satisfaisants démontrent que le modèle HYDROTEL est un très bon outil pour la modélisation hydrologique en appui à la mise en place de la GIEBV dans le bassin versant de la rivière Cau ainsi que pour d'autres bassins avec des conditions similaires (climat, données limitées).

Il subsiste néanmoins quelques points faibles essentiellement reliés au problème de déficit de données d'entrée. En effet, le modèle surestime l'écoulement en période de pluie; la tendance du régime n'est pas très bien simulée dans les périodes les plus sèches. La valeur la plus élevée du coefficient de Nash est de 0,71 (1 593 UHRH) en saison sèche contre 0,84 durant la période des pluies. Les résultats de la reconstruction du régime hydrologique à partir des

données de la station en amont sont apparus comme moins bons que ceux obtenus avec la station en aval du bassin. Ceci s'explique par plusieurs raisons comme le manque d'informations sur les aménagements hydroagricoles entrepris dans cette partie du bassin, les erreurs possibles pouvant exister dans les calculs de débits à partir des courbes d'étalonnage et des niveaux d'eau, etc. En effet, les niveaux d'eau ayant servi à calculer les débits sont mesurés par des marches d'escalier en béton marquées au pas de 20 cm. La précision de ces marches d'escalier est faible (Figures A-34 et A-35 en annexe). Les lectures ne sont pas faites de manière systématique durant toute l'année et surtout en période d'inondation, etc.

De façon générale, le modèle se comporte très bien sur une période de simulation de plusieurs années. Cette conclusion est similaire à celle des travaux portant sur l'application du modèle HYDROTEL dans d'autres pays sous conditions climatiques tropicales comme le Mexique) et la Côte d'Ivoire (Kouamé, 2007).

Éléments de modélisation hydrologique pour la mise en place de la GIEBV en Asie du Sud-Est

La sensibilité des paramètres : Ce travail a permis d'identifier les paramètres les plus pertinents parmi les 14 paramètres choisis pour l'étalonnage du modèle. Ce sont : le coefficient multiplicatif d'optimisation de l'évapotranspiration potentielle, la lame de référence pour l'hydrogramme géomorphologique, le coefficient de récession et les limites inférieures des couches 3 et 2. Une étude sur le bassin versant d'Ord en France (Indarto, 2002) a également mis l'accent sur la lame de référence et le coefficient multiplicatif d'optimisation de l'évapotranspiration potentielle comme les paramètres principaux parmi ceux non mesurés. Avec une carte des types de sol moins précise, le coefficient additif d'optimisation de la classe du sol devient un paramètre ajustable très important. En effet, son niveau de sensibilité peut être aussi élevé que celui du coefficient multiplicatif d'optimisation de l'évapotranspiration potentielle. L'ordre décroissant des paramètres mesurables pour cibler les campagnes de collecte des données est : la limite inférieure de la couche 3 du sol, la limite inférieure de la couche 2 du sol, l'indice foliaire, la profondeur des racines, le coefficient de rugosité de Manning des milieux forestiers et le coefficient de rugosité de Manning des autres milieux. Ces travaux ont également souligné que sur un même bassin, la différence dans la taille de l'unité de calcul (UHRH) peut amener à des niveaux de sensibilité différents des paramètres d'étalonnage.

Échelle spatiale : La prise en compte de l'occupation du sol mixte qu'on trouve dans la plupart des bassins tropicaux nécessite une unité spatiale de calcul dont la surface est la plus petite

possible. Cependant, avec de telles unités, il se pose généralement un problème : la durée de la collecte et du traitement des données ainsi que de la simulation. Cette étude a permis de trouver un compromis pour la taille de l'unité de calcul pour le bassin d'étude. Une échelle spatiale moyenne égale à $2,8 \text{ km}^2$ est choisie comme meilleure taille de discrétisation dans cette thèse. L'application en Côte d'Ivoire (Kouamé, 2007) a montré qu'avec une moyenne de $4,3 \text{ km}^2/\text{UHRH}$, HYDROTEL permet de bien simuler le régime du fleuve N'zo (superficie du bassin de drainage de $7\,350 \text{ km}^2$). Au Mexique, le modèle a bien reconstruit le régime des cours d'eau de trois bassins avec une moyenne de $6,5 \text{ km}^2/\text{UHRH}$. Ce travail pourrait finalement suggérer des échelles entre 10 km^2 et 2 km^2 pour la GIEBV dans une région similaire à celle du bassin versant de la rivière Cau.

Données météorologiques : L'application avec succès d'un modèle hydrologique ne dépend pas seulement de la capacité du modèle. La qualité des données d'entrée occupe également une place très importante dans l'ensemble du processus de simulation. Les analyses sur les bruits dans les données nous amènent à conclure que la précision des données de pluie et de température doit être considérée comme une priorité pour la performance d'un modèle hydrologique distribué comme HYDROTEL. Un niveau de bruit combiné d'écart-type de 5 % (pluie et température) diminue considérablement la qualité de la simulation (variation du volume d'eau de plus de 10 %). Pour établir une bonne base de connaissances en hydrologie en appui à la GIEBV, la qualité du travail à toutes les étapes de la collecte de données, telles l'installation des stations, la prise de mesures, la transmission et le traitement des données, doivent être prises en compte pour améliorer la qualité des résultats de la modélisation.

Système d'observation : L'analyse de l'impact du nombre de stations a montré que les densités de $883 \text{ km}^2/\text{station}$ de température et $368 \text{ km}^2/\text{station}$ de pluie sont à la limite pour une bonne performance du modèle hydrologique distribué comme HYDROTEL. Des densités plus faibles que celles-ci ne sont pas suggérées. Ces suggestions coïncident avec l'idée de Shaw (1994) qui a recommandé que la densité de mesure de pluie pour les secteurs relativement plats devrait être d'une station par superficie de 600 à 900 km^2 . Pour les secteurs montagneux, cette valeur devra être autour d'une station par superficie 100 à 250 km^2 . Cela permet de diminuer les erreurs d'interpolation des données de pluie. Au-delà de la densité, l'importance de la répartition des stations est soulignée. Indarto (2002) a montré qu'avec une densité de plus de $166 \text{ km}^2/\text{station}$ pluviométrique, la densité n'influence pas de façon significative les résultats. Par contre, la position des stations influence aussi les résultats de simulation. Le retrait d'une station du réseau influence fortement les résultats de simulation (variation de plus de 10 % du bilan

d'eau pour le réseau à l'étude). Ainsi, il faut installer des stations qui représentent adéquatement la variabilité des conditions météorologiques et aux endroits appropriés favorisant l'étalonnage du modèle hydrologique. En effet, pour mettre en place une nouvelle station, au-delà des considérations sur l'accessibilité (routes), la contribution de chaque station dans le réseau de collecte de données doit être considérée. Par ailleurs, il a été remarqué que le manque de données de température au sein d'une station météorologique a une influence plus faible que le manque de données de pluie. La pluie est apparue comme une variable d'entrée importante pour les processus hydrologiques. Même si la température n'est pas une donnée à négliger, en cas de déficit de ressources (humaines, financières), une attention particulière doit être accordée aux données de pluie.

Mode de collecte : L'utilisation du mode de mesure sporadique (au temps fixe) des variables météorologiques et de débit apportent inévitablement des erreurs sur les données brutes. Ainsi, les débits en période de forte pluie ou d'inondation restent peu fiables pour des raisons de difficulté d'accès aux sites. Les erreurs dans les données brutes sont alors significatives et ceci pourrait en partie expliquer le fait que la simulation des plus grandes crues dépasse toujours les données mesurées, même s'il existe une bonne synchronisation entre les courbes simulées et observées. L'utilisation d'équipements automatiques avec un mode de mesure continue des données devrait être envisagée dans le cadre de la mise en place de la GIEBV.

Archivage des données : Il est important, dans la mise en place d'une démarche de GIEBV, de disposer de données non seulement bien collectées et traitées, mais elles doivent aussi être continues et bien archivées pour de futurs travaux. La problématique d'archivage des données est courante dans certains pays du SEA comme le Vietnam et dans d'autres pays en voie de développement. Pour la modélisation hydrologique en appui à la GIEBV, il est important que les séries de données soient continues, bien archivées et suivant un format standard préalablement convenu par les différents services techniques impliqués dans la gestion des bassins. De plus, il est important de rendre accessibles les données de manière à réduire les délais d'obtention de celles-ci dans le cadre de travaux de recherche pour la GIEBV.

9 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. et Rasmussen, J. (1986). An Introduction to the European Hydrological System – Système Hydrologique Européen, « SHE », 2 : History and Philosophy of a Physically-based, Distributed Modelling System. *Journal of Hydrology*. 87, 61-77.
- ADB (Asian Development Bank) (2006 b). Helping to introduce IWRM in 25 River Basins in the Asia-Pacific Region.
- ADB (Asian Development Bank) (2006 c). Component 1: « IWRM in the Cau Basin ». Project 3892 - VIE2006: 2nd Red River Basin Sector project - Part A: Water Resources Management - Final Report - Phase 2.
- ADB (Asian Development Bank) (2006). Integrated Water Resource Management.
- Ambroise, B., Perrein, J.L. et Reutenauer, D. (1995). Multicriterion validation of a semidistributed conceptual modeling of the water cycle in the Fecht catchment. *Water Resource Researches*. American Geophysical Union Publisher. 31(6), 1467-1481.
- Ancil, F., Lauzon, N., Andreassian, V., Oudin, L. et Perrin, C. (2006). Improvement of rainfall-runoff forecasts through mean areal rainfall optimization. *J. Hydrol.*, 328, 717-725.
- Anderson, M.P. et Woessner, W.W. (1990). *Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport*. Harcourt Brace & Company.
- Armando, T.J. (2007). Evaluation of small hydro power potential in three river basins of Mexico.
- Bergström, S. (1995). The HBV model. In: Singh, V.P. (Ed.) *Computer models of watershed hydrology*. USA.
- Beven, K., Lamb J., Quinn, R., Romanowicz, P.F. et Freer, J. (1995). TOPMODEL in V. P. Singh (Edition). *Computer Models of Watershed Hydrology*. USA, 627-668.
- Blöschl G. et Sivapalan, M. (1995). Scale issue in hydrological modelling: A review. *Hydrological Process*. 9, 251-290.

- Bormann, H. (2006). Impact of spatial data resolution on simulated catchment water balances and model performance of the multi-scale TOPLATS model. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 10, 165–179.
- Braga, B.P.F. (2001). *Integrated Urban Water Resources Management: A Challenge into the 21st Century*. Water Resources Development. American Geophysical Union Publisher. 17(4), 581-599.
- Burnash, R.J.C. (1995). The NWS river forecast system—catchment modeling. *Computer Models of Watershed Hydrology*. USA. 311–366.
- Burton J. (2003). *Integrated Water Resources Management on a Basin Level: A Training Manual*. Éditions MultiMondes.
- Cai X. et Maidment D.R. (1996). Hydrologic Response Unit – The concept in implementation.
- Canadell, J., Jackson, R.B., Ehleringer, J.R., Mooney, H.A., Sala, O.E. et Schulze E.D. (1996). Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale, *Oecologia* 108, 583-595.
- Chaubey, I., Haan C.T., Salisbury J.M. et Grunwald S. (1999b). Uncertainty in the model parameters due to spatial variability of rainfall. *J. Hydrology*. 220, 48–61.
- Chaubey, I., Cotter, A.S., Cosello, A. et Soerens, T.S., (2005). Effect of DEM data resolution on SWAT output uncertainty *Hydrological Processes*, 19(2005), pp. 621-628.
- Crow, P. (2005). The influence of soils and species on tree root depth. In *formation Note FCINO78*. Forestry Commission Edinburgh 8 pp.
- Darcy, H., (1856). *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*, V. Dalmont, Paris.
- Ewen, J., Parkin G. et O'Connell, P.E. (2000). SHETRAN: a coupled surface/subsurface modelling system for 3D water flow and sediment and solute transport in river basins. *J. of Hydrologic Engineering*. American Society of Civil Engineering. 5, 250–258.
- Fenicia, F., Savenije, H.H.G., Matgen, P. et Pfister L. (2007). A comparison of alternative multiobjective calibration strategies for hydrological modeling. *Water Resources Research*. American Geophysical Union Publisher. 43.

- Fortin, J.-P., Villeneuve, J.-P., et Bocquillon, C. (1990). Hydrotel, Physitel and Imatel : an integrated application of remote sensing and GIS to hydrological modelling on microcomputer. P. 793-804, *in* Koelen M. (réd.) Proc. of the International Symposium of Remote sensing and Water Resources, Enschede, Hollande, 20-24 Août, 793-804.
- Fortin, J.-P., Moussa, R., Bocquillon, C. et Villeneuve, J.-P. (1995). " Hydrotel, un modèle hydrologique distribué pouvant bénéficier des données fournies par la télédétection et les systèmes d'information géographique." *Revue des Sciences de l'eau*, 8, 97-124.
- Fortin, J.-P., Turcotte, R., Massicotte, S., Moussa, R., Fitzback, J. et Villeneuve, J.-P. (2001). "Distributed Watershed Model Compatible with Remote Sensing and GIS Data. I: Description of the Model." *J. of Hydrologic Engineering*. 6(2), 91-99.
- Fortin, J.-P., Duchesne, S., Hoang, K.H. et Villeneuve, J.-P. (2007). HYDROTEL, un modèle hydrologique distribué pouvant générer des informations spatialisées détaillées très utiles pour la gestion de bassins versants de tailles diverses. Séminaire « Actes des JSIRAUF », Hanoi, Vietnam.
- Fortin, J.-P., Royer, A. (2004). Le modèle hydrologique HYDROTEL, bases théoriques, version 3.0. Rapport INRS-ETE, 104 p
- Fortin, J.-P., Turcotte, R., Massicotte, S., Moussa, R., Fitzback, J. et Villeneuve, J.-P. (2001). Distributed Watershed Model Compatible with Remote Sensing and GIS Data, Part 1: Description of the Model. *J. Hyd. Eng.* 6(2), 91-99.
- Fortin, J.-P., Moussa, R., Bocquillon, C. et Villeneuve, J.-P. (1995). HYDROTEL, un modèle hydrologique distribué pouvant bénéficier des données fournies par la télédétection et les systèmes d'information géographique. *Revue des Sciences de l'Eau*. 8(1), 97-124.
- Grayson, R. B. (2000). Spatial Patterns in catchment Hydrology: Observations and Modelling. International glossary of hydrology. UNESCO.
- Grayson, R.B., Moore, I.D. et McMahon, T.A. (1992b). Physically Based Hydrologic Modeling 2. Is the Concept Realistic. *Water Resources Research*. American Geophysical Union Publisher. 28(10), 2659-2666.

- Grayson, R.B. et Chiew, F.H.S. (1994). An approach to model selection. *Water Down Under 94 Symposium*. Institution of Engineers, Australia, 507–512.
- Grigg, N.S. (1999). Integrated Water Resources Management: Who should lead, who should pay? *J. of American Water Resources Association*. 35(3), 527-534.
- Güntner, A., Uhlenbrook, S., Seibert, J. et Leibundgut, Ch. (1999). Multicriterial validation of TOPMODEL in a mountainous catchment. *Hydrological Processes*. 13, 1603–1620.
- Gupta, H.V. et Sorooshian, S. (1985). The Relationship between Data and the Precision of Parameter Estimates of Hydrologic-Models. *J. of Hydrology*. 81(1-2), 57-77.
- Gupta, V.K., Rodriguez-Iturbe, I. et Wood, E.F. (Eds) 1986a. *Scale Problems in Hydrology*. D. Reidel, Dordrecht. 246 pp.
- Gupta, H.V., Sorooshian, S. et Yapo, P.O. (1998). Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and noncommensurable measures of information. *Water Resource Researches*. American Geophysical Union Publisher. 34, 751-763.
- GWP/TAC (Global Water Partnership/Technical Advisory Committee) (2003). *Sharing Knowledge for Equitable, Efficient and Sustainable Water Resources Management*. GWP Publisher, Stockholm, Sweden.
- GWP/TAC (Global Water Partnership/Technical Advisory Committee) (2000). *Integrated Water Resources Management*. TAC Background Paper N° 4. GWP Publisher, Stockholm, Sweden.
- Hoang, K.H. (2007). *Le changement de l'occupation du sol et ses impacts sur les eaux de surface du bassin. Le cas du bassin versant de la rivière Cau du Vietnam*. Mémoire. Université du Québec, INRS-ETE.
- Indarto, K. (2002). *Découpages spatiaux et conséquences sur le bilan hydrologique – Application au bassin de l'Orb à travers une démarche de modélisation hydrologique distribuée*. Thèse de doctorat. École nationale du génie rural, des eaux et des forêts, Montpellier, France.
- Jeffrey, P., Geary, M. (2004). Integrated water resources management: lost on the road from ambition to realization? In: *WATERMAX Conference*, Beijing, November 2004.

- Jonker, L. (2002). Integrated water resources management: Theory, practice, cases. *Physics and Chemistry of the Earth*. 27, 719-720.
- Jorgensen, S.E. et Rast, W. (2007). The use of models for synthesizing knowledge for integrated lake basin management, and facilitating implementation of the World Lake Vision Lakes and Reservoirs. *Research and Management*. Blackwell Synergy Publisher. 12 (1), 3–13.
- Kennedy, K., Simonovic, S., Tejada-Guibert, A., França-Doria, M. et José-Luis, M. (2009). IWRM implementation in Basins, Sub-basins and Aquifers: State of the Art Review. *International Hydrological Programme*. UNESCO.
- Kite, G.W. (1997). *Manual for the SLURP hydrological model*. National Hydrology Research Centre. Saskatchewan, Canada.
- Klemes, V. (1983). Conceptualisation and scale in hydrology. *J. of Hydrology*. 65(1-3), 1-23.
- Kouamé K.F., Bernier M., Goné D.L., Saley M.B., Lefèbvre R., Soro N. et Koudou A. (2007). Intégration de données géospatiales dans un modèle hydrologique distribué pour la simulation des écoulements des eaux en milieu tropical humide de Côte d'Ivoire.
- Kouwen, N., Soulis, E.D., Pietronico, A., Donald, J. et Harrington, R. A. (1993). Grouped Response Units for Distributed Hydrologic Modelling. *J. Water Resources Planning and Management, ASCE*, 119(3), 289-305.
- Lavigne, M.P. (2007). Modélisation du régime hydrologique et de l'impact des coupes forestières sur l'écoulement du ruisseau des eaux-volées à l'aide d'Hydrotel. Mémoire de maîtrise Science de l'eau, 155 p. + Annexes. Université du Québec, INRS-ETE.
- Leavesley, G., Lichty, R.W., Troutman, B.M. et Saindon, L.G. (1983). *Precipitation-runoff modeling system: User's manual*. US Geol. Survey Wat. Resour. Investigations Report S.
- Lee, J., D., Dinar, A., (1995). *Review of Integrated Approaches to River Basin Planning Development and Management*, World Bank Report N°. WPS 1446.
- Levine, J. (2004). Adaptive management in river restoration: Theory vs. practice in Western North America. *Water Resources Center Archives*. University of California, Multi-Campus Research Unit, Riverside, USA.

- Ma, J.Z., Wang, X.S. et Edmunds, W.M. (2005). The characteristics of groundwater resources and their changes under the impacts of human activity in the arid Northwest China — a case study of the Shiyang River Basin. *J. of Arid Environments*. 61, 277–295.
- Madsen, H. (2000). Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives. *J. of Hydrology*. 235, 276-288.
- Mahe, G., Girard, S., New, M., Paturel, J.-E., Cres, A., Dezetter, A., Dieulin, C., Boyer, J.-F., Rouche, N. et Servat, E. (2008). Comparing available rainfall gridded datasets for West Africa and the impact on rainfall-runoff modelling results, the case of Burkina-Faso. *Water SA*. 34.
- McCuen, R. (1973). The role of sensitivity analysis in hydrologic modelling. *J of Hydrology*. 18, 37–53.
- McGregor, G.R. et Nieuwolt, S. (1998). *Tropical climatology. An introduction to the climates of the low latitudes (2nd Ed)*. John Wiley & Sons Inc. Publisher, USA.
- Moore, I.D., Norton, T.W. et Williams, J.E. (1993). Modelling environmental heterogeneity in forested landscapes, *J. of Hydrology*.
- Morin, G., Fortin, J.-P., Lardeau, J.-P., Sochanska, W. et Paquette, S. (1981). *Modèle CEQUEAU : manuel d'utilisation*. INRS-Eau, QC, Canada, Rapport scientifique 93.
- Morris, M.D. (1991). Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments. *Technometrics*. 33(2), 161–174.
- Nguyen, P.D. (2009). Vérification de la qualité des données de précipitation du bassin versant de la rivière Cau, Vietnam. Travail dirigé. Université du Québec, INRS-ETE.
- Oudin, L., Perrin, C., Mathevet, T., Andréassian, V. et Michel, C. (2006). Impact of biased and randomly corrupted inputs on the efficiency and the parameters of watershed models. *J. of Hydrology*. 320, 62-83.
- Peters-Lidard, C.D., Wood, E.F., 1994. Estimating storm areal average rainfall intensity in field experiments. *Water Resources Research*, 30 (7), pp. 2119-2131.

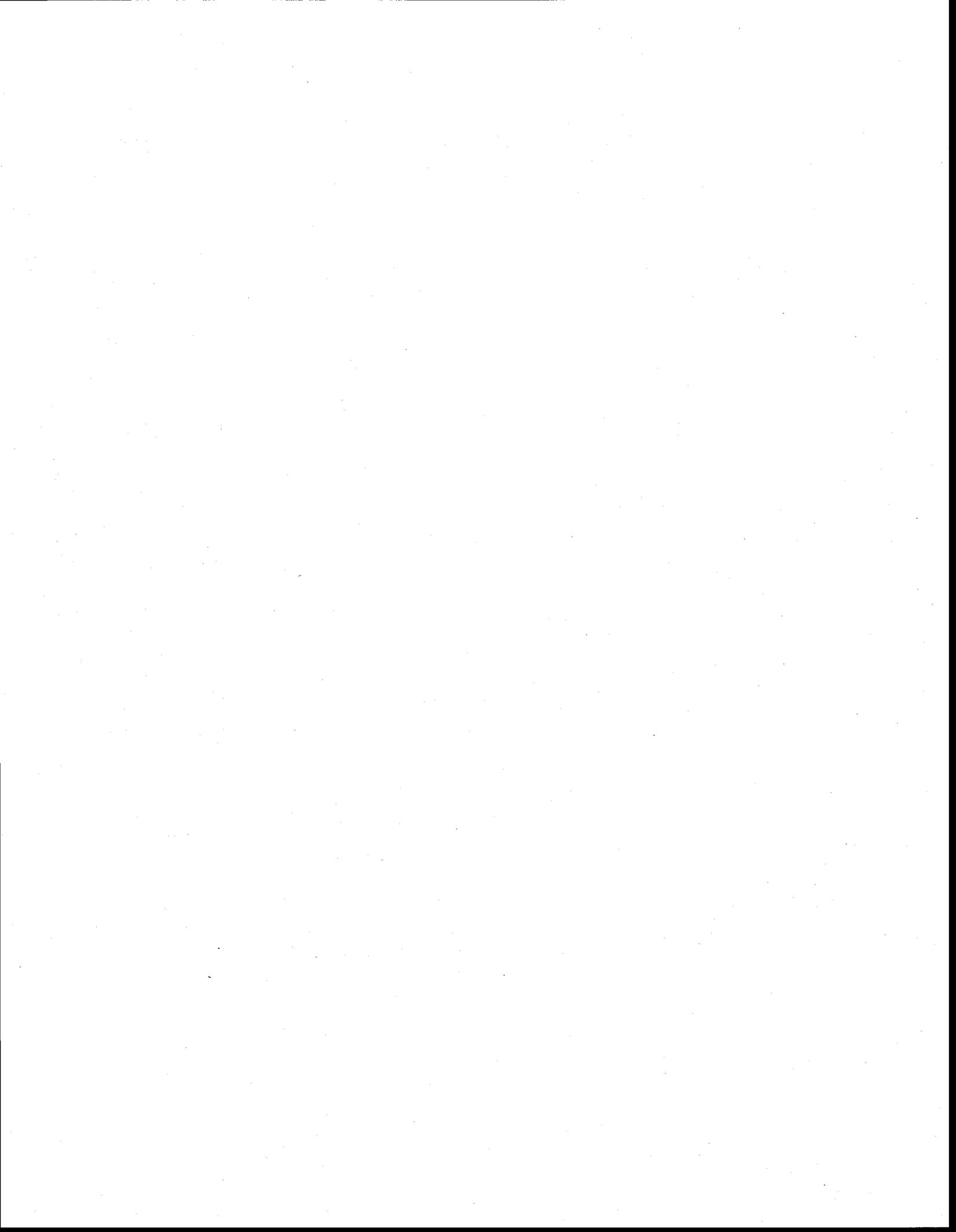
- Quinn, P.F., Beven, K., Chevallier, P et Planchon, O. (1991). The Prediction of Hillslope Flow Paths for Distributed Hydrological Modelling Using Digital Terrain Models. *Hydrological Processes*. 5, 59-79.
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., 1989. Estimation of soil water retention and hydraulic properties. In *Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling Theory and Practice*, ed. H.J. Morel-Seytoux, 275-300. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Refsgaard, J.C. (1997). Parameterization, calibration and validation of distributed hydrological models. *J. of Hydrology*. 198, 69-97.
- Ricard, S. (2008). Caractérisation de la recharge potentielle du bassin versant de la rivière Châteauguay à l'aide du modèle HYDROTEL. Mémoire. Université du Québec, INRS-ETE.
- Rockwood, D.M. et Nelson, M.L. (1966). Computer application to streamflow synthesis and reservoir regulation. IV International Conference on Irrigation and Drainage.
- Rousseau A.N., Lafrance P., Lavigne M.P., Savary S., Konan, S. et Quilbé, R. (2008). Development of Achievable Agri-Environmental Performance Standards (APS) in Five Canadian Watersheds National Agri-Environment Standards Initiative Technical Series. Report N° 4-30. 343 p.
- Rousseau A.N., De Sloover, M., Duchemin M., Turcotte R. et Fortin, M. (2000). Projet AGRORIESQA, application du système de modélisation intégré GIBSI. Rapport de recherche, INRS-Eau Ste-Foy, 54 p.
- Saltelli, A., Tarantola, S. et Campolongo, F. (2000). Sensitivity analysis as an ingredient of modelling. *American Statistical Science*. 15(4), 377-395.
- Schultz, G. A. (1994). Meso-scale modelling of runoff and water balances using remote sensing and other GIS data. *Hydrological Sciences – J. des Sciences Hydrologiques*. 39.
- Shaw, E.M. (1994). *Hydrology in practice* (3rd Edition). Chapman & Hall, London. ISBN 042482908.
- Silberstein, R.P., Sivapalan, M. et Wyllie, A. (1999). On the validation of a coupled water and energy balance model at small catchment scales. *J. of Hydrology*. 220, 149-168.

- Singh, V.P. et Woolhiser, D.A. (2002). Mathematical modelling of watershed hydrology. *J. Hydrology*. 7(4), 270-292.
- Singh, V.P. (1995). *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications. Highlands Ranch, Colorado, USA.
- St-Hilaire, A., Ouarda, T.B., Lachance, M., Bobée, B., Gaudet, J. et Gignac, C. (2003). Assessment of the impact of meteorological network density on the estimation of basin precipitation and runoff: a case study. *Hydrological Process*. 17 (18), 3561–3580.
- Sun, G., McNulty, S.G., Amatya, D.M., Skaggs, R.W., Swift, L.W. Jr., Shepard, J.P. et Riekerk, H. (2002). A comparison of the watershed hydrology of coastal forested wetlands and the mountainous uplands in the Southern U.S., *J. of Hydrology*. 263(1-4), 92-104.
- Thomas, J. et Durham, B. (2003). Integrated Water Resource Management: looking at the whole picture. *Desalination J*. 156(1-3), 21-28.
- Tremblay, D. (2002). Document préliminaire du Système de Gestion Prévisionnelle (Sections HYDROTEL ESP). Rapport d'Hydro-Québec, Prévision et Ressources hydriques, 15 p.
- Turcotte, R., Fortin, J.-P., Rousseau, A.N., Massicotte, S. et Villeneuve, J.-P. (2001). Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network. *J. Hydrology*. 240, pp. 225-242.
- Turcotte, R., Rousseau, A.N., Fortin J.-P. et Villeneuve, J.-P. (2003). Development of a process-oriented, multiple-objective, hydrological calibration strategy accounting for model structure. In: Duan, Q., Sorooshian, S., Gupta, H., Rousseau, A.N., et Turcotte, R., « Advances in Calibration of Watershed Models », *Water Science and Application* 6, American Geophysical Union, pp. 153-163.
- UNESCO (2002). The concluded Sixth Phase of UNESCO's International Hydrological Programme 2002-2007. IHP/IC-XV/Inf.29.
- UNESCO, (2009). *IWRM Guidelines at River Basin Level. Part I. Principles*
- UN-Water (2008). *Status report on Integrated Water Resources Management and Water Efficiency Plans for CSD16*.

- USACE (United State Army Corps of Engineers) (1981). HEC1 - The Hydrologic Engineering Center. Flood hydrograph package users manual. California, USA.
- Villeneuve, J.-P., Duchesne, S., Fortin, J.-P. et Rousseau, A.N. (2008). De l'hydrologie du bassin à la gestion intégrée par bassin versant. Dans : Tchiguirinskaia, I., Demuth, S. et Huber, P. (Eds.) River Basins From Hydrological Science to Water Management. Williford, UK: IAHS Press. 1-39.
- Westen, S., Fortune, D. et Gregersen, J. (2004). Open MI – New Opportunities for Model Developers. In: 6th International Conference on Hydroinformatics, Singapore, 46(4).
- Western, A.W., Zhou, S.L., Grayson, R.B., McMahon, T.A., Blöschl, G. et Wilson D.J. (2004). Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes. *J. of Hydrology*. **286** (1–4), 113–134.
- Wood, E.F., Sivapalan, M., Beven, K. et Band, L. (1988). Effects of spatial variability and scale with implication to hydrologic modeling. *J. Hydrology*. **102**, 29–47..



10 ANNEXES



ANNEXE A : FIGURES ET TABLEAUX

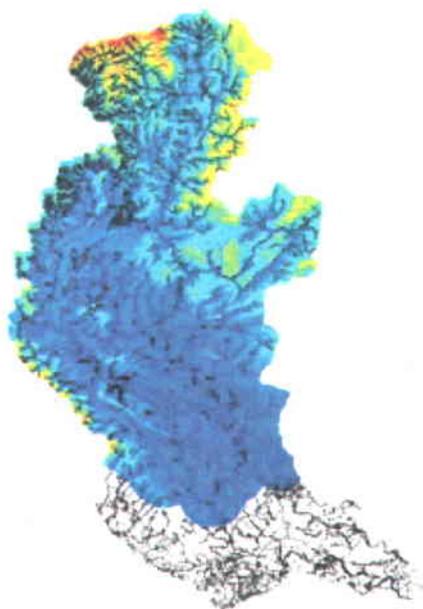


Figure A-1 : Réseau vectoriel original en noir (sur fond de carte topographique).

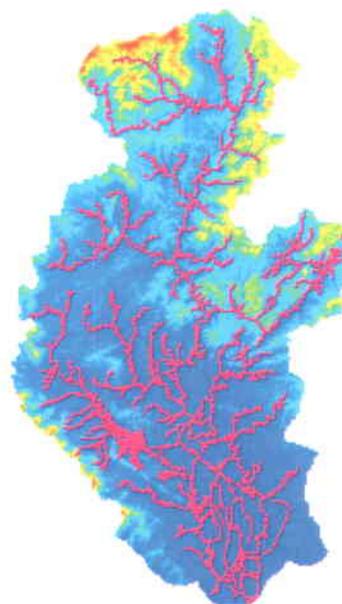


Figure A-2 : Réseau vectoriel corrigé et imposé en rouge (sur fond de carte topographique).

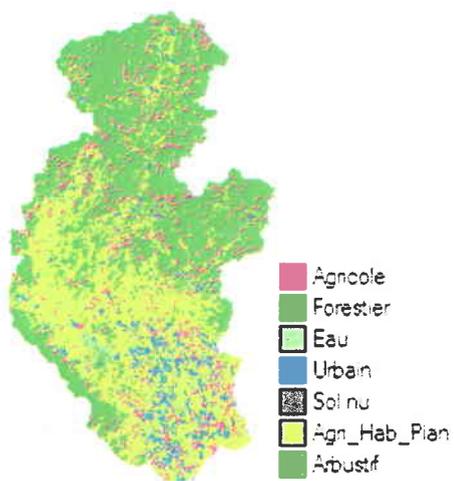


Figure A-3 : Carte d'occupation du sol.

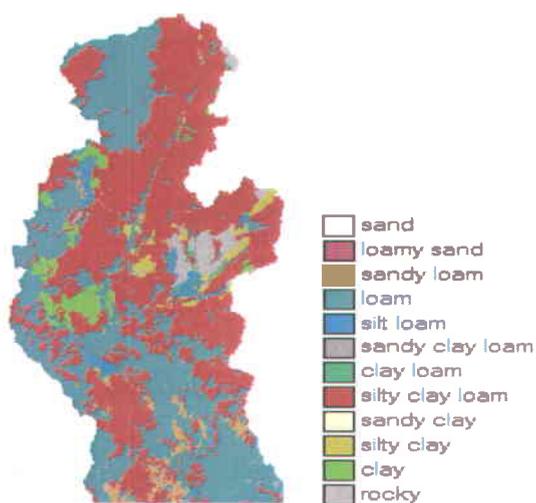


Figure A-4 : Carte des types de sol.

Le réseau vectoriel corrigé est obtenu par simplification du réseau original (Tableau A-2 en annexe).

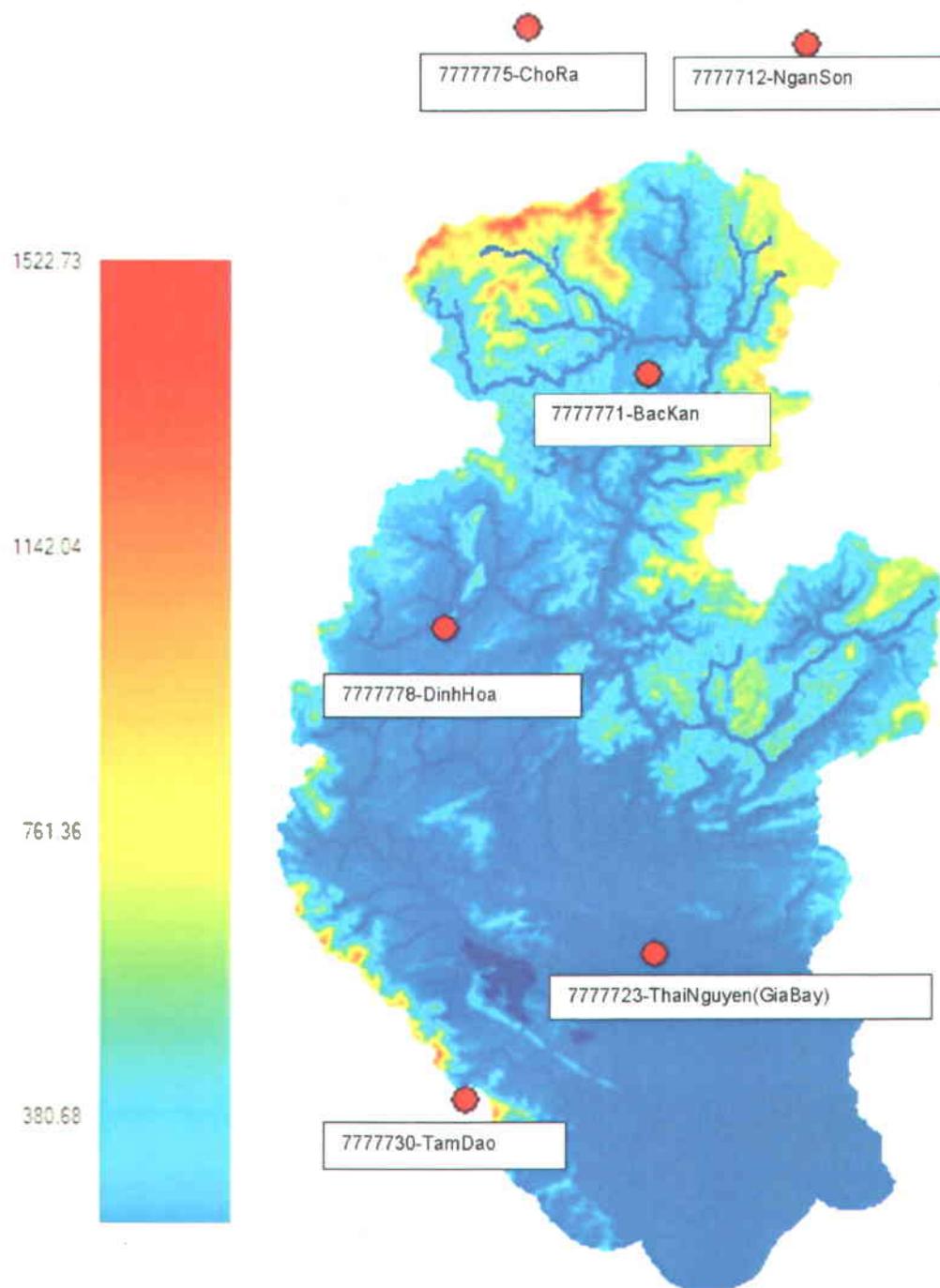


Figure A-5 : Stations météorologiques sélectionnées (altitudes en mètres).

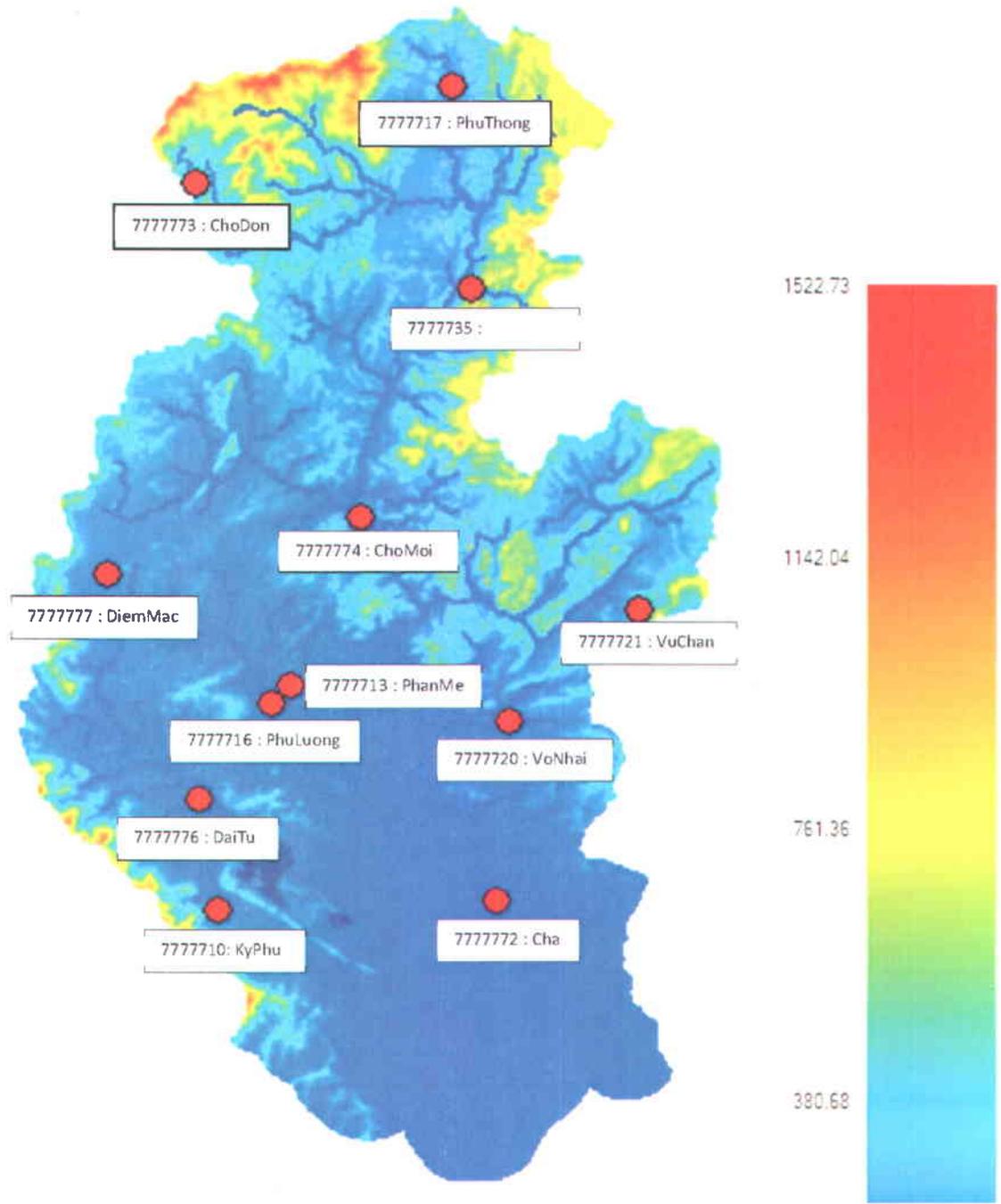


Figure A-6 : Stations de pluies sélectionnées (altitudes en mètres).

Résultats de simulation du chapitre 4 : Analyse de sensibilité – Étalonnage préliminaire

Pour l'année 1998, les deux traits coïncident très bien la majorité du temps. Le plus grand écart ($\sim 450 \text{ m}^3/\text{s}$) arrive dans le mois juillet avec la plus grande crue. Les trois autres grands écarts sont de moins de $100 \text{ m}^3/\text{s}$.

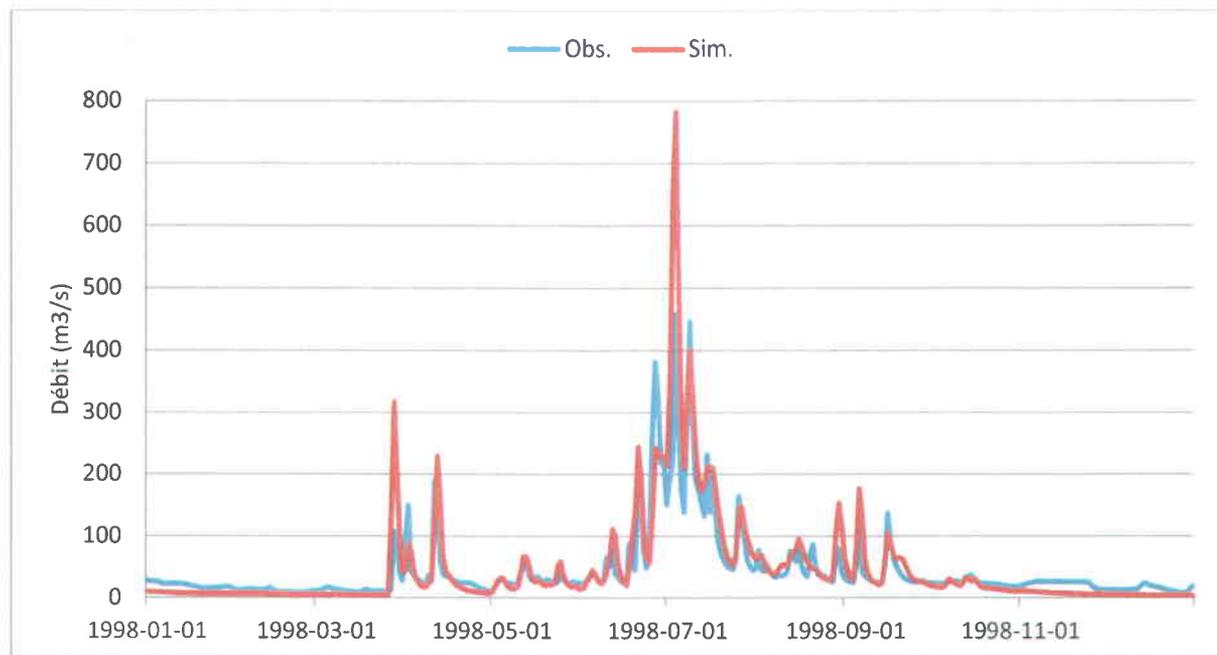


Figure A-7 : Étalonnage préliminaire, projet 235 UHRH, année 1998.

Pour l'année 1999, les deux traits coïncident très bien la majorité du temps. Le plus grand écart ($\sim 150 \text{ m}^3/\text{s}$) arrive dans le mois de septembre. Notons que la plus grande crue qui se produit en juillet est bien représentée (écart $\sim 50 \text{ m}^3/\text{s}$). Le régime hydrologique de l'année 1999 présente plus de variation que les deux années précédentes, mais le débit est néanmoins bien simulé.

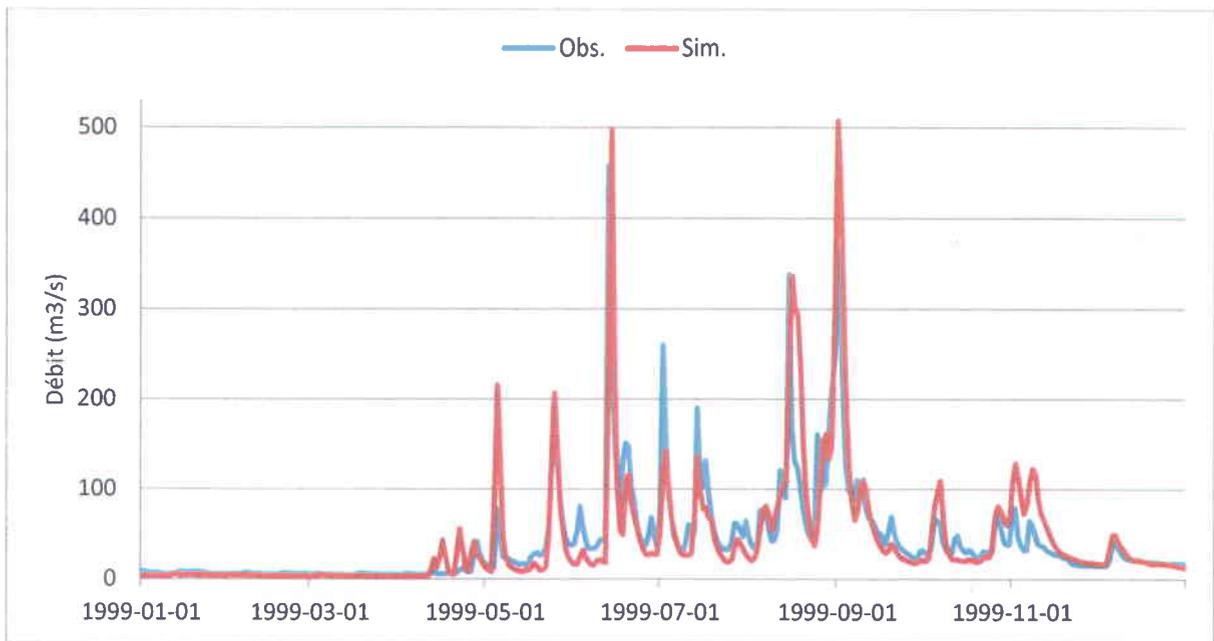


Figure A-8 : Étalonnage préliminaire, projet 235 UHRH, année 1999.

Pour l'année 2000, les deux traits coïncident très bien la majorité du temps. De plus, la plus grande pointe de crue de l'année est parfaitement simulée. Notons, qu'il est normal que les débits simulés soient tantôt plus élevés, tantôt plus faibles que les débits observés compte tenu des imprécisions provenant du réseau météorologique utilisé.

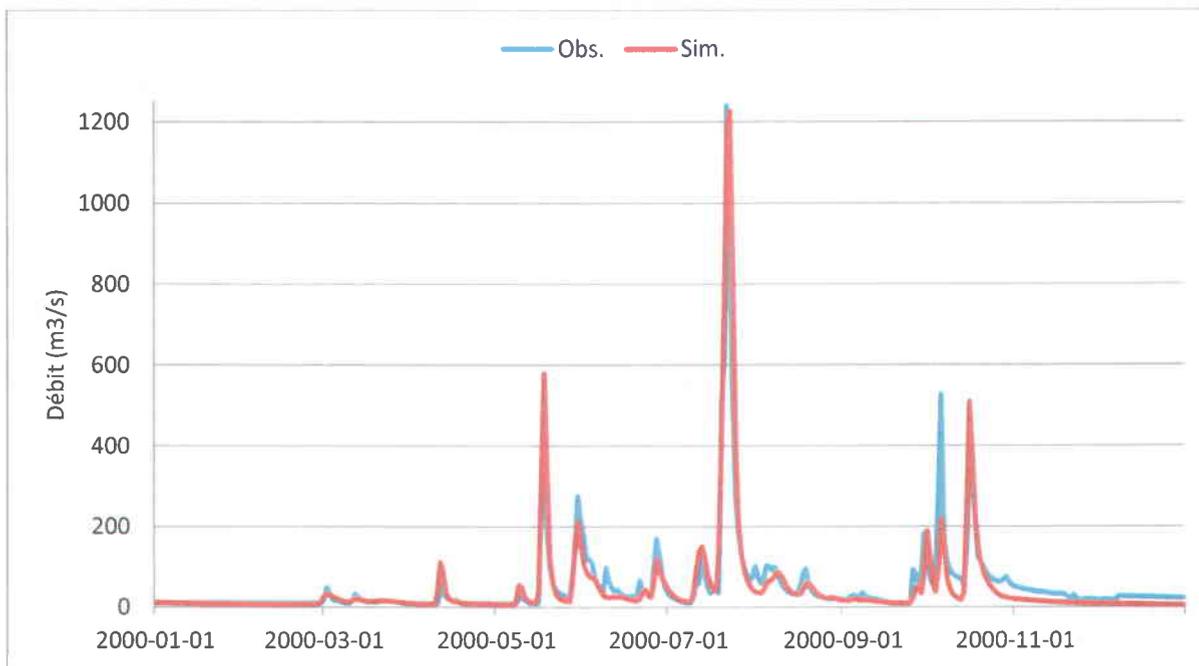


Figure A-9 : Étalonnage préliminaire, projet 235 UHRH, année 2000.

Pour l'année 2001, les deux traits coïncidents très bien en période sèche et moins bien en temps de crues, mais la plus forte crue de la période étalonnage est très bien simulée.

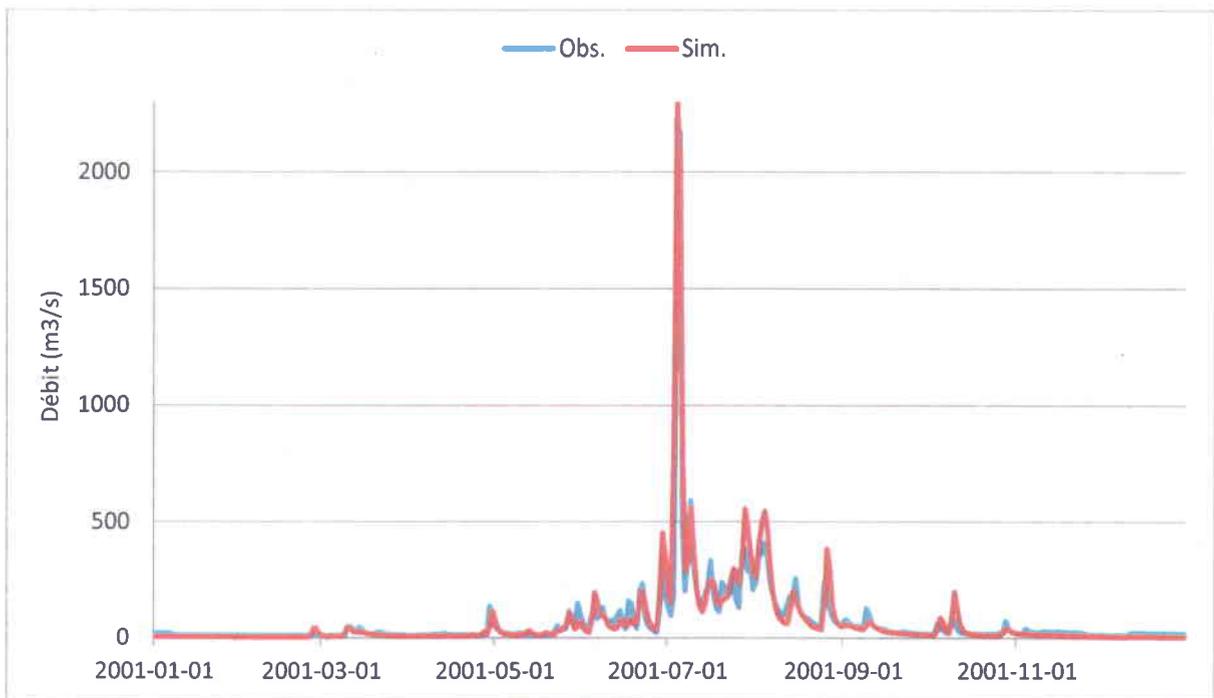


Figure A-10 : Étalonnage préliminaire, projet 235 UHRH, année 2001.

Résultats du chapitre 4 : Analyse de sensibilité – Validation

Pour l'année 2003, le modèle simule bien la réponse hydrologique du bassin aux précipitations fournies par le réseau météorologique. Toutefois, au cours de cette année, les pointes de crue simulées ont tendance à être trop élevées.

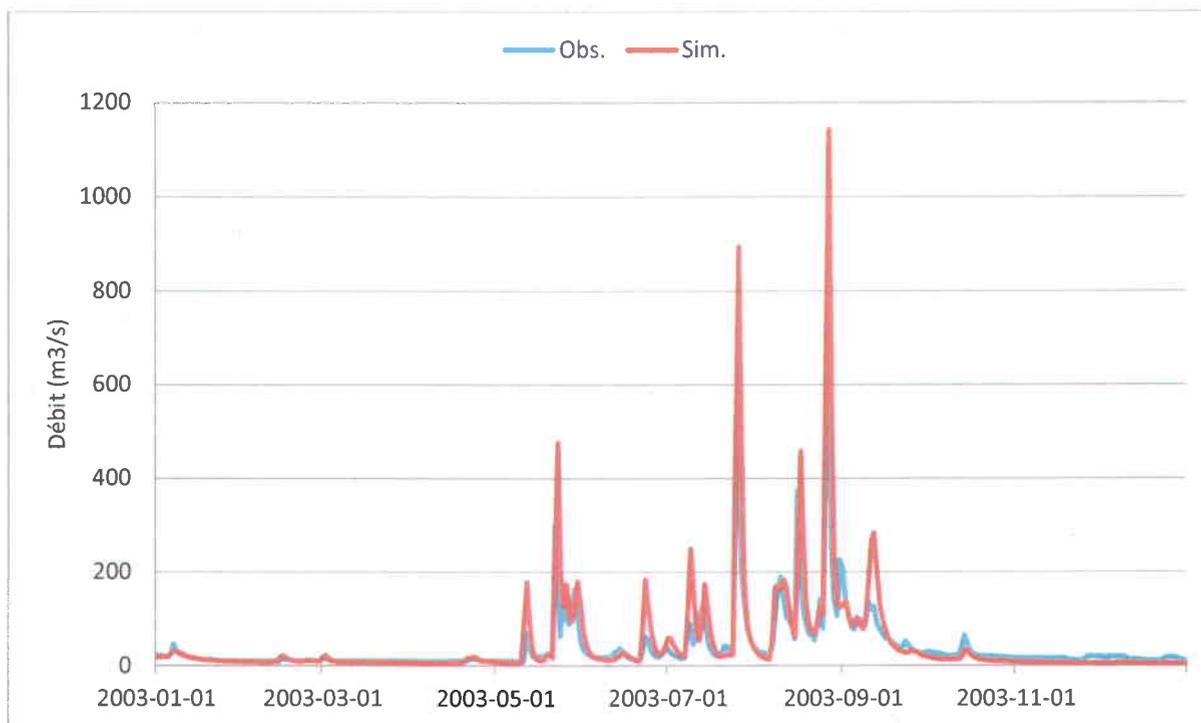


Figure A-11 : Validation préliminaire, projet 235 UHRH, année 2003.

Pour l'année 2004, la tendance du régime est bien représentée. Il faut noter que la pointe de crue la plus élevée est surestimée de 150 m³/s, la deuxième crue plus élevée est surestimée de 400 m³/s, tandis que les autres crues sont généralement très bien simulées.

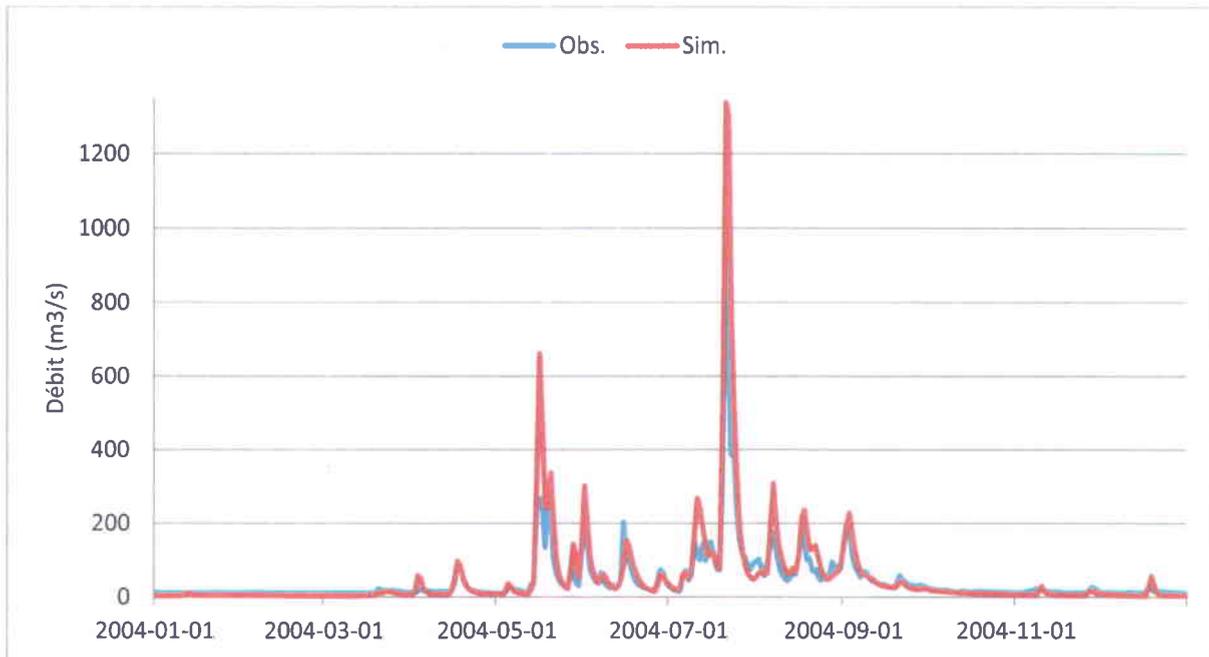


Figure A-12 : Validation préliminaire, projet 235 UHRH, année 2004.

Pour l'année 2005, les résultats sont les pires de la période de validation. En période de crue, les pics de simulation sont toujours nettement plus élevés que les pics observés, mais les débits simulés ont tendance à sous-estimer les débits observés entre les crues. Il faut noter toutefois que les montées et les descentes de crues sont généralement bien simulées.

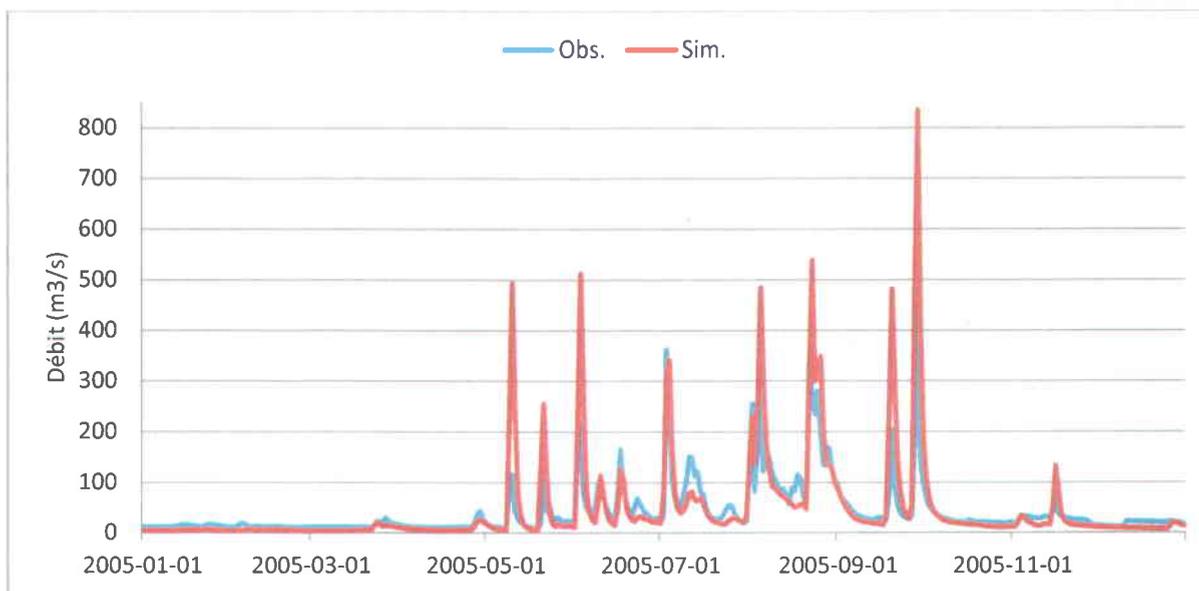


Figure A-13 : Validation préliminaire, projet 235 UHRH, année 2005.

Pour l'année 2006, les pointes de crues observées sont tantôt surestimées et tantôt sous-estimées tout au long de l'année.

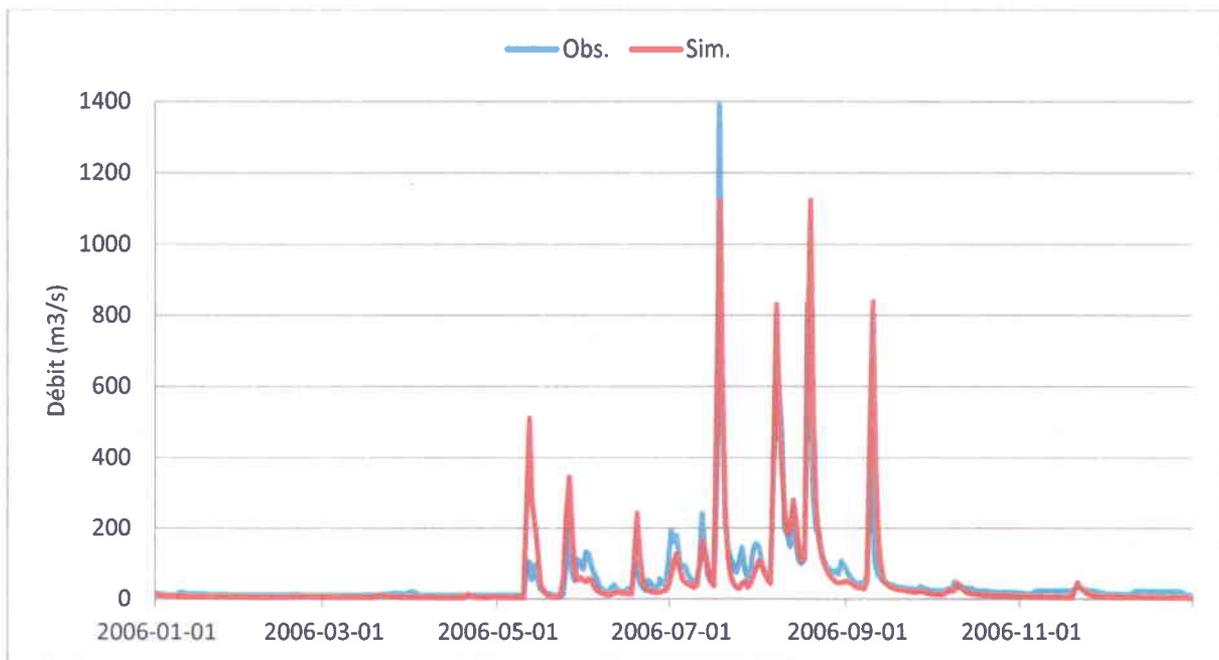


Figure A-14 : Validation préliminaire, projet 235 UHRH, année 2006.

Résultats de simulation du chapitre 5 : Scénarios de discrétisation spatiale

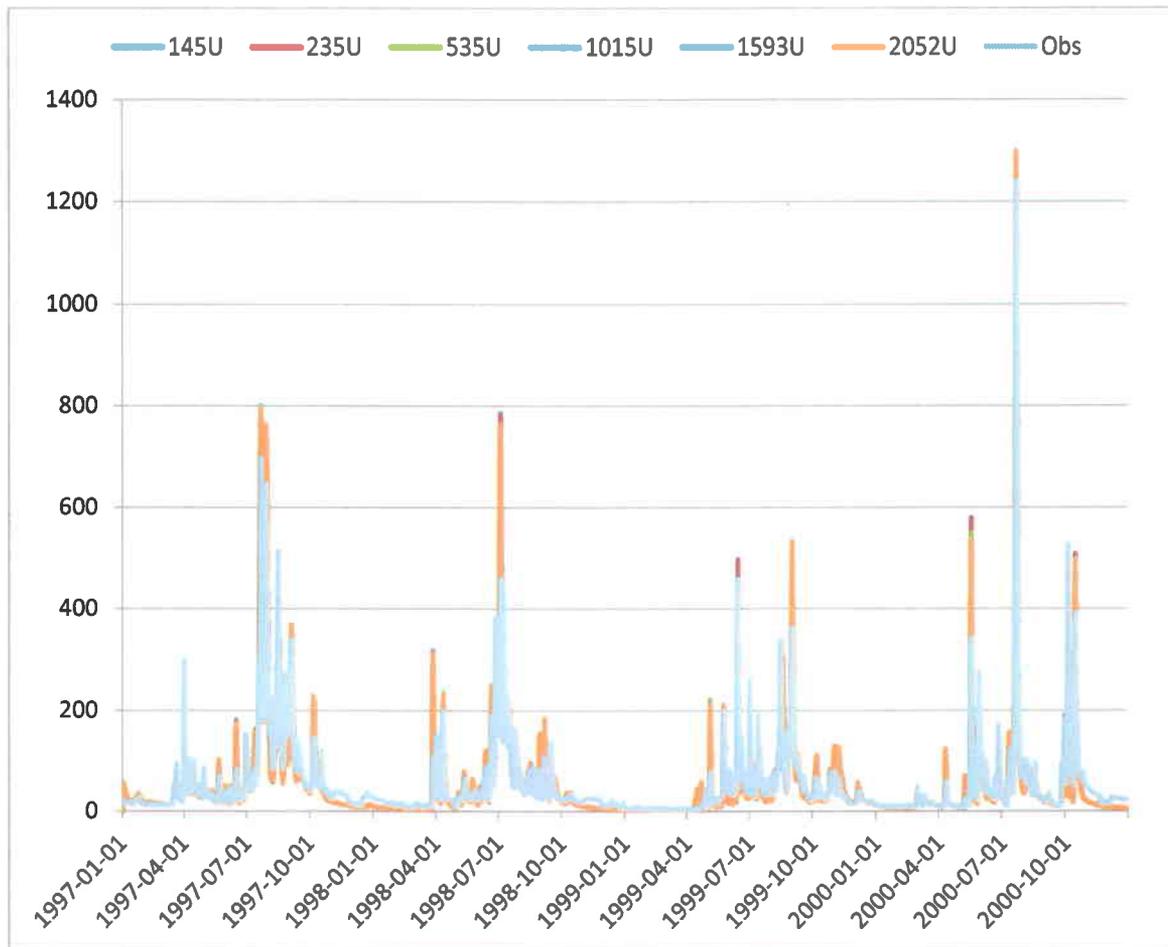


Figure A-15 : Comparaison des six scénarios - 1997 à 2000 (référence 235 UHRH).

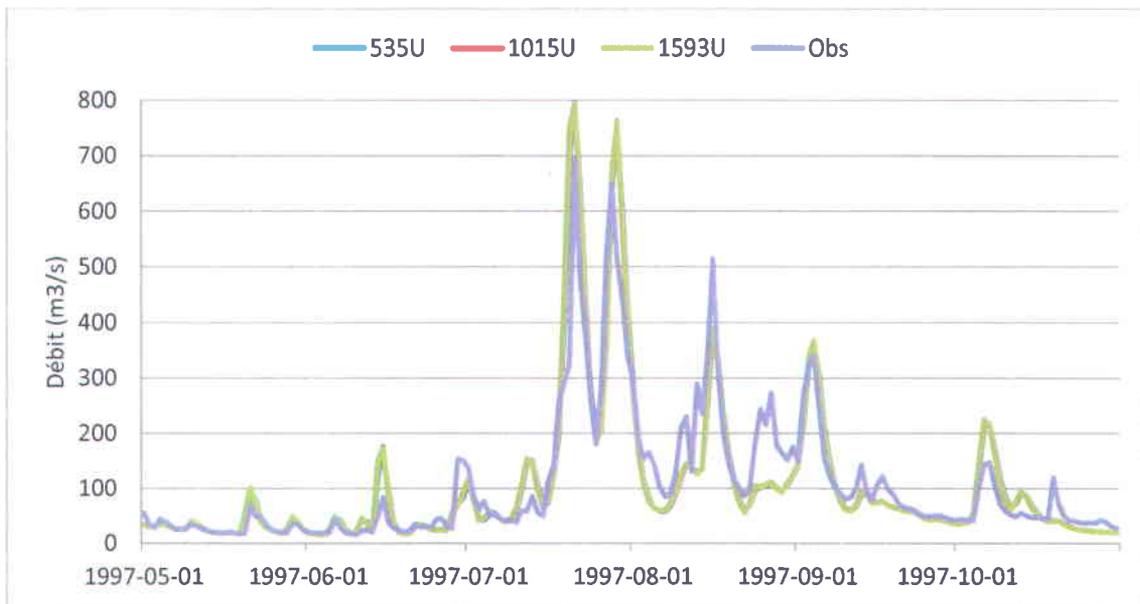


Figure A-16 : Comparaison des trois scénarios – saison des pluies – année 1997 (projet de référence 235 UHRH).

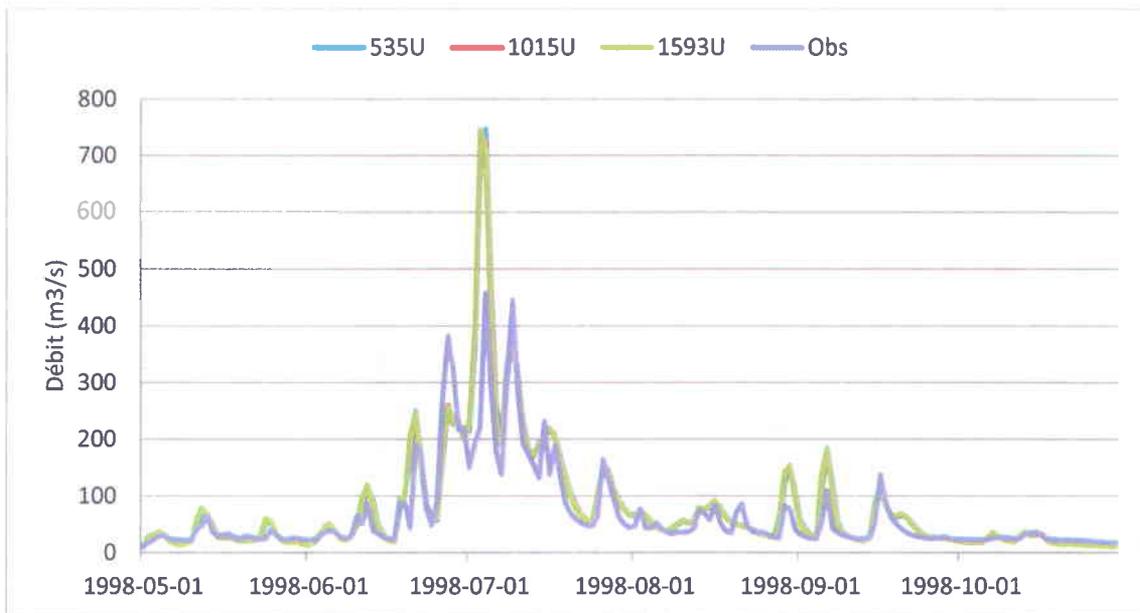


Figure A-17 : Comparaison des trois scénarios – saison des pluies – année 1998 (projet de référence 235 UHRH).

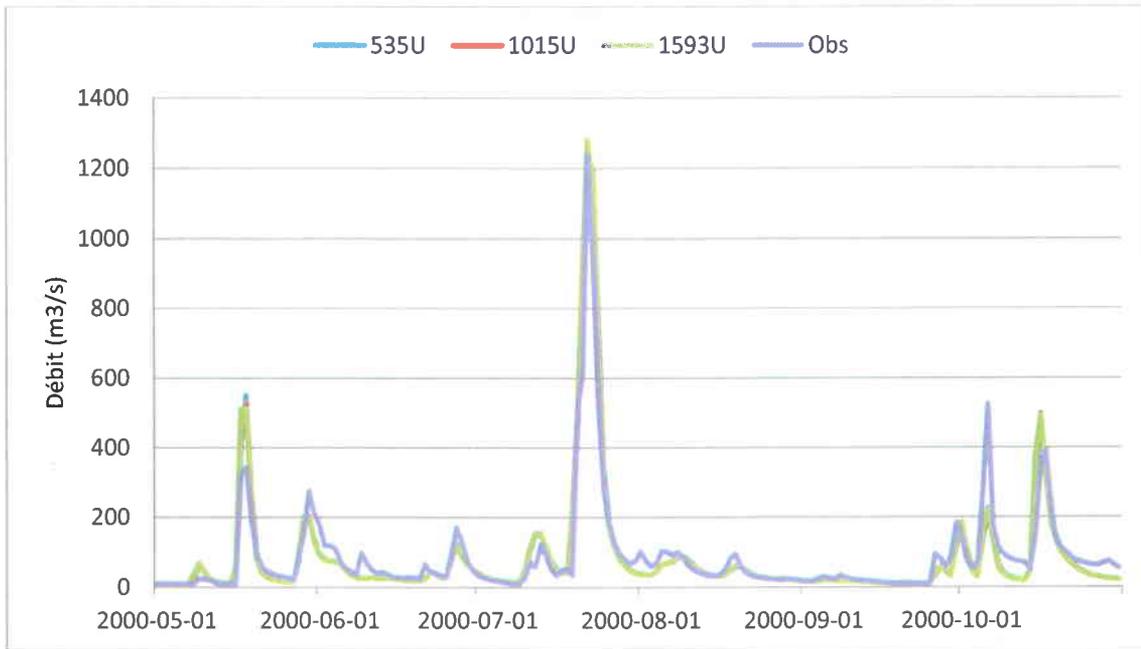


Figure A-18 : Comparaison des trois scénarios – saison des pluies – année 2000 (projet de référence 235 UHRH).

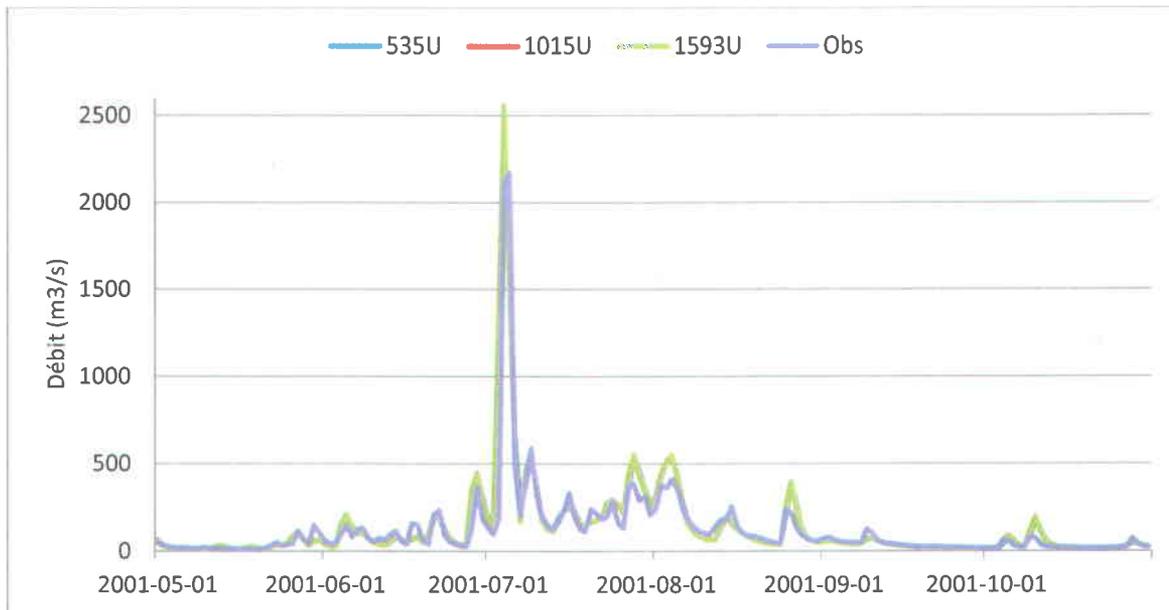


Figure A-19 : Comparaison des trois scénarios – saison des pluies – année 2001 (projet de référence 235 UHRH).

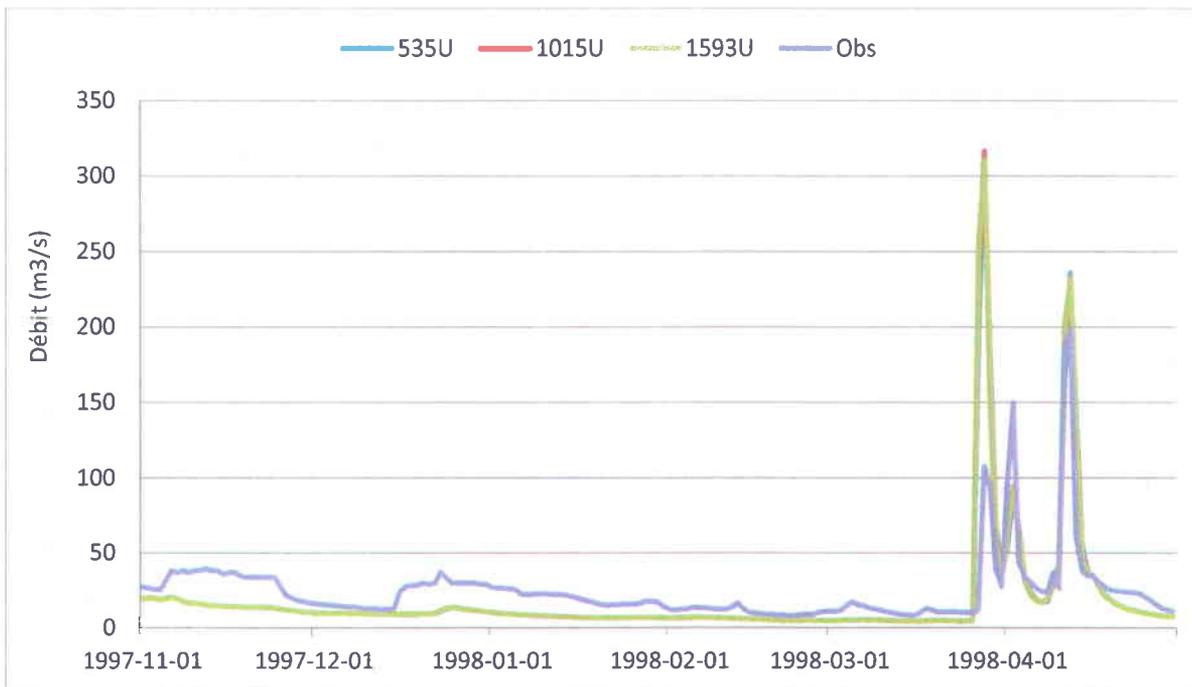


Figure A-20 : Comparaison des trois scénarios – saison sèche - 1997-1998 (projet de référence 235 UHRH).

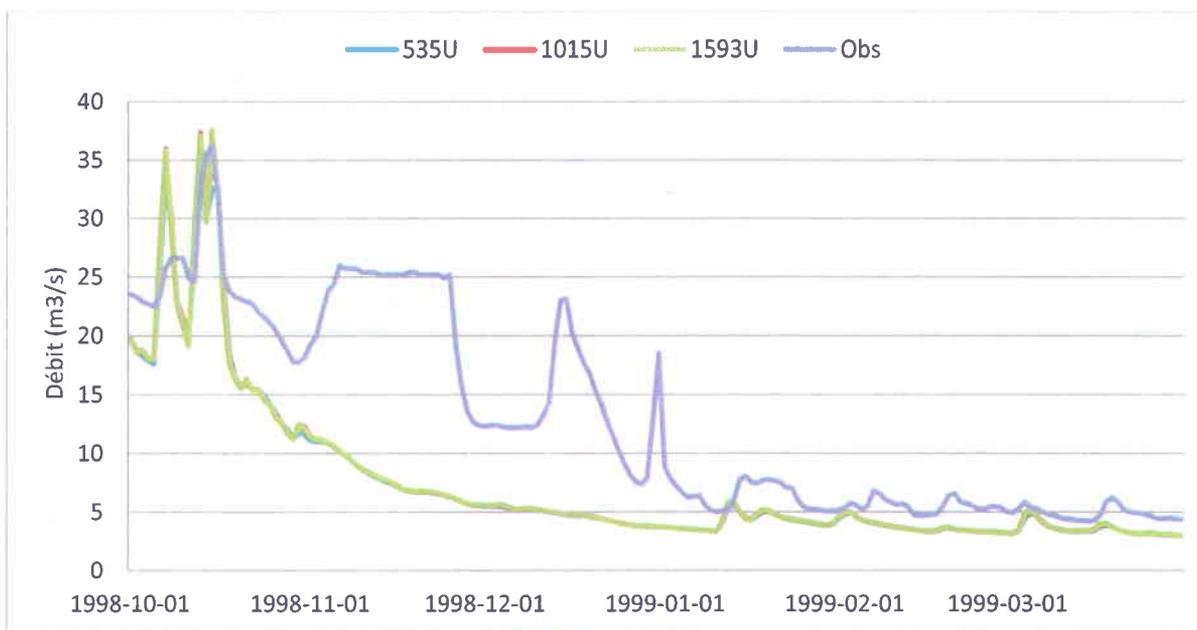


Figure A-21 : Comparaison des trois scénarios – saison sèche - 1998-1999 (projet de référence 235 UHRH).

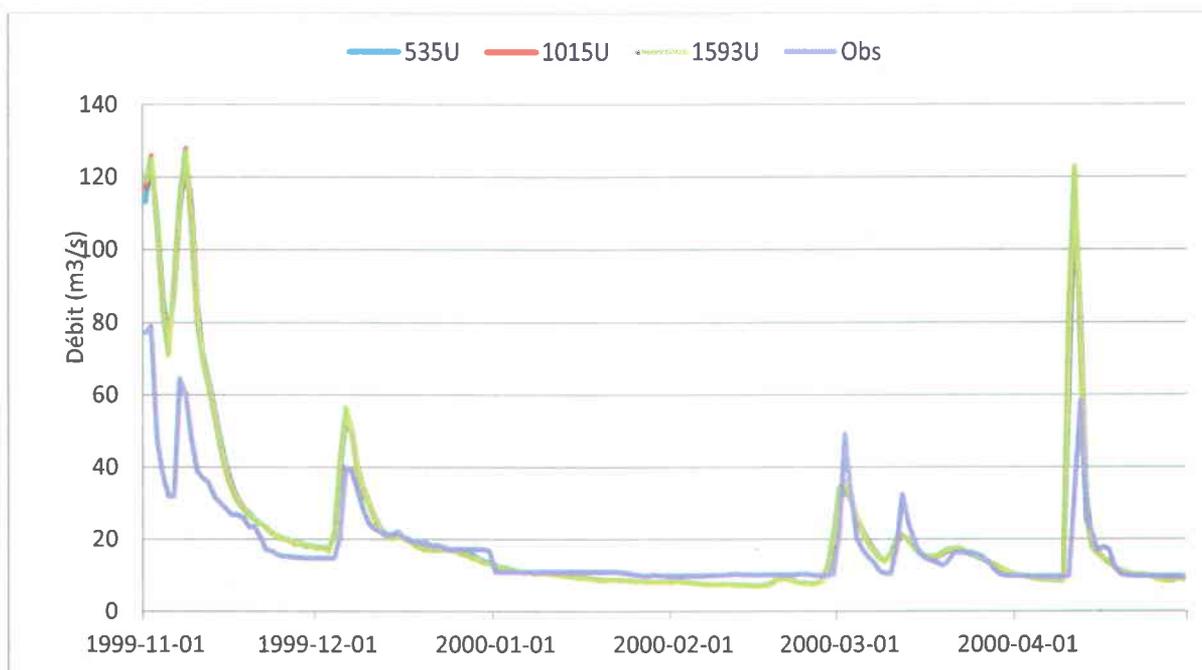


Figure A-22 : Comparaison des trois scénarios – saison sèche - 1999-2000 (projet de référence 235 UHRH).

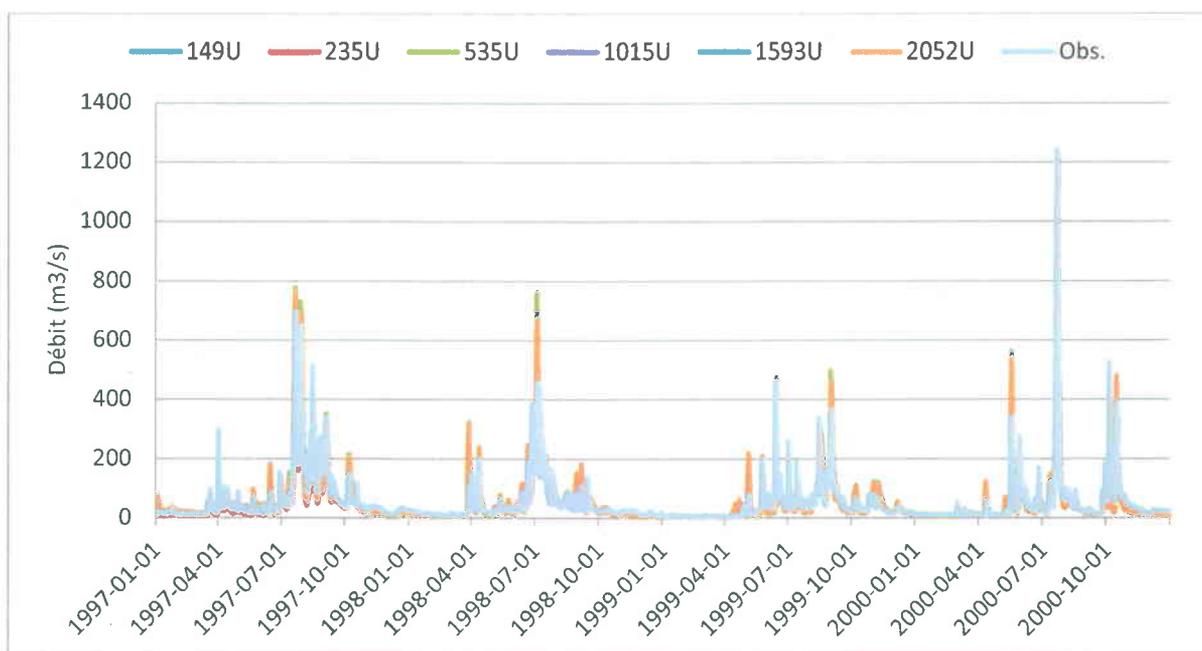


Figure A-23 : Comparaison des six scénarios - période de 1997 à 2000 (projet de référence 2 052 UHRH).

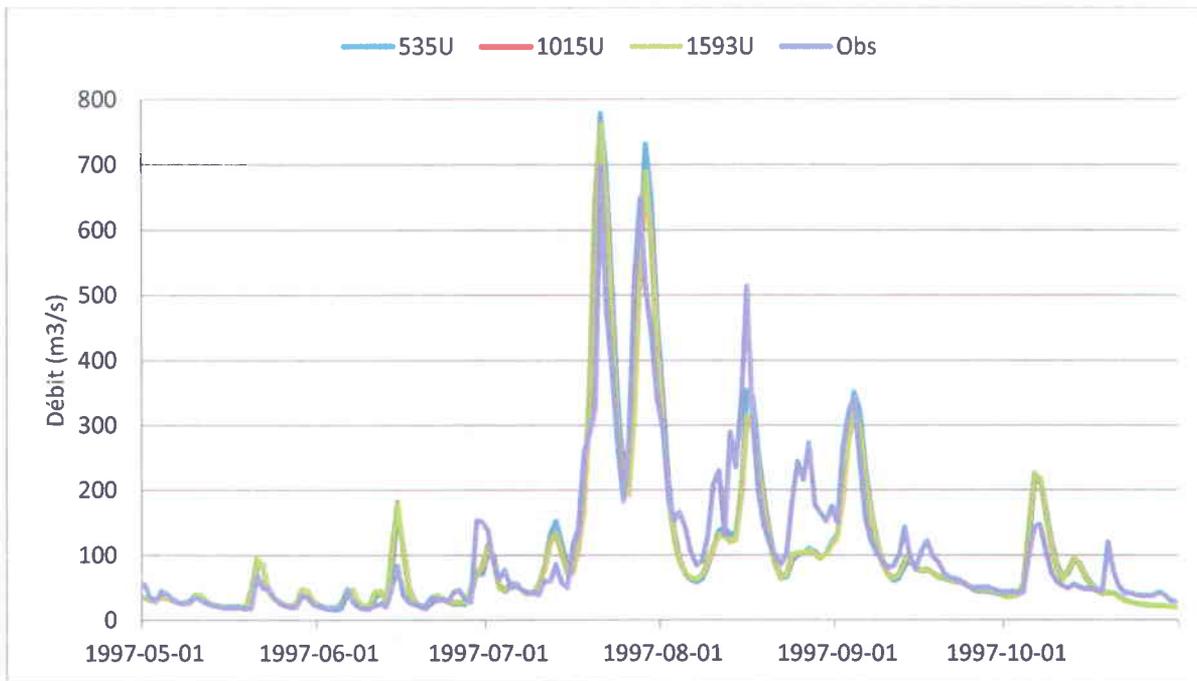


Figure A-24 : Comparaison des trois scénarios- saison des pluies - année 1997 (projet de référence 2 052 UHRH).

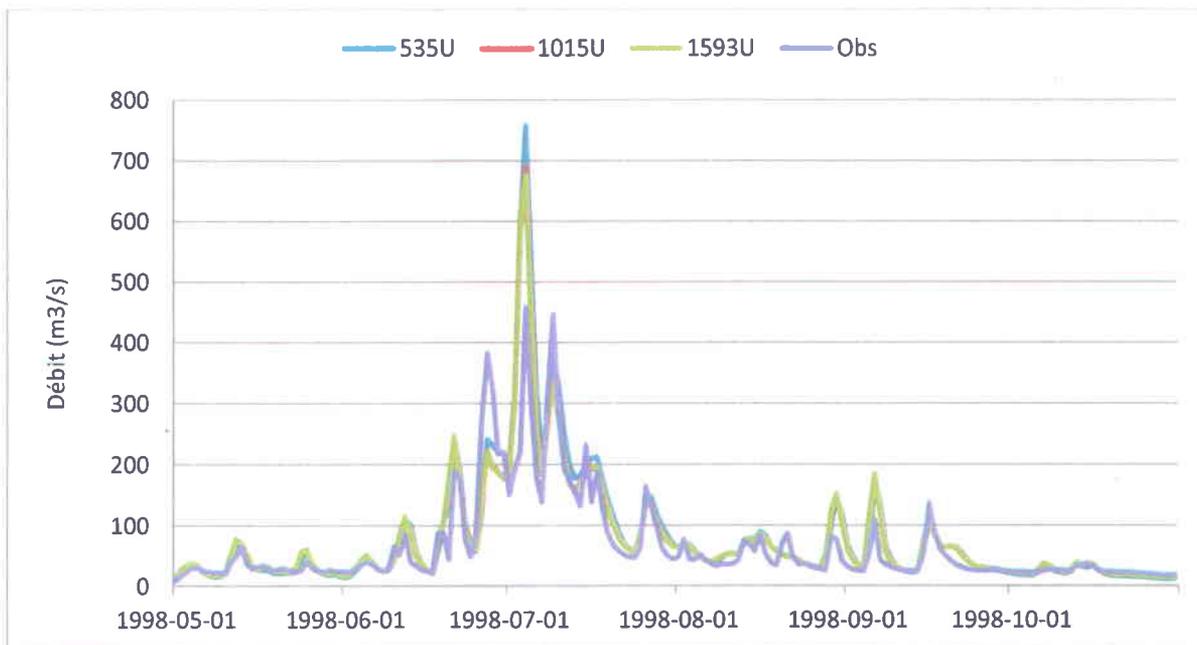


Figure A-25 : Comparaison des trois scénarios- saison des pluies - année 1998 (projet de référence 2 052 UHRH).

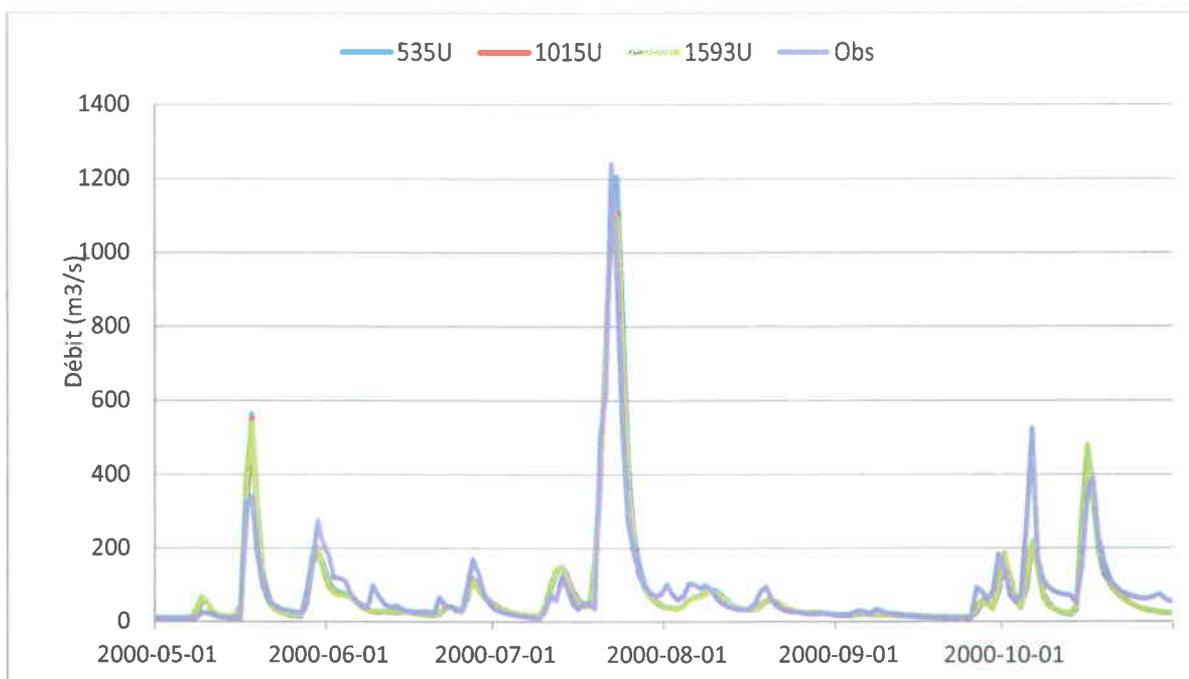


Figure A-26 : Comparaison des trois scénarios- saison des pluies - année 2000 (projet de référence 2 052 UHRH).

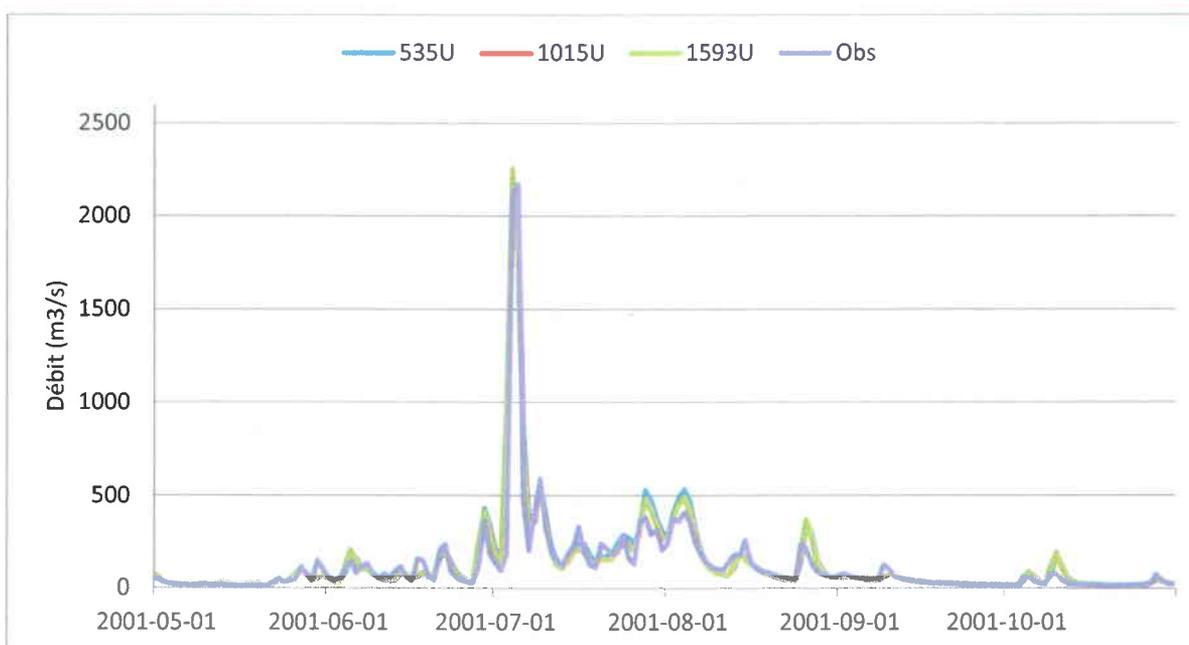


Figure A-27 : Comparaison des trois scénarios- saison des pluies - année 2001 (projet de référence 2 052 UHRH).

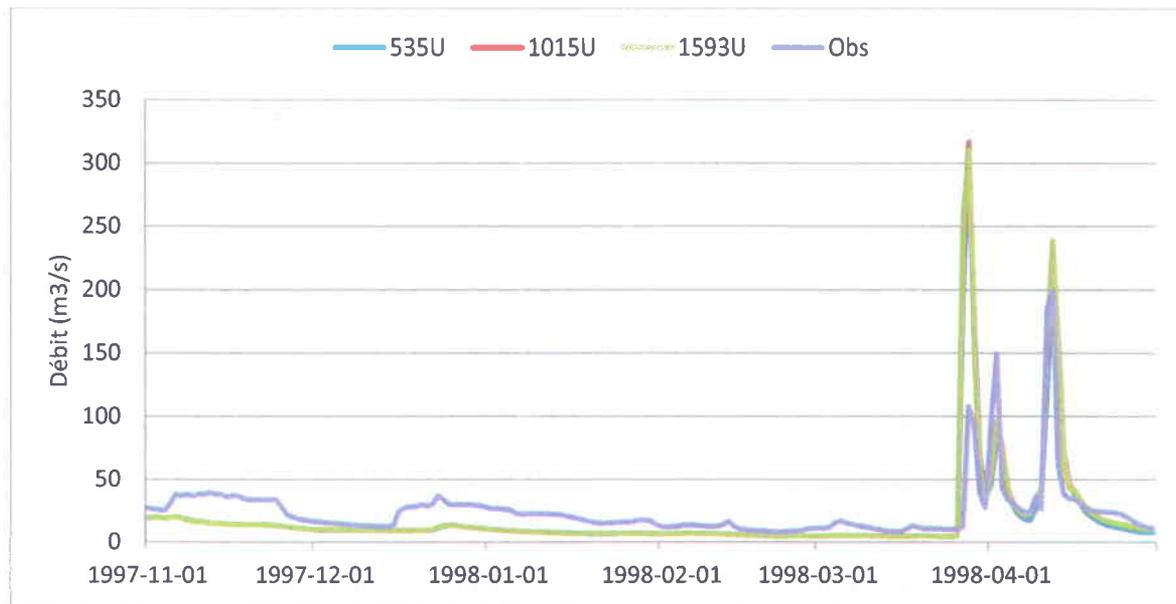


Figure A-28 : Comparaison des trois scénarios – saison sèche - 1997-1998 (projet de référence 2 052 UHRH).

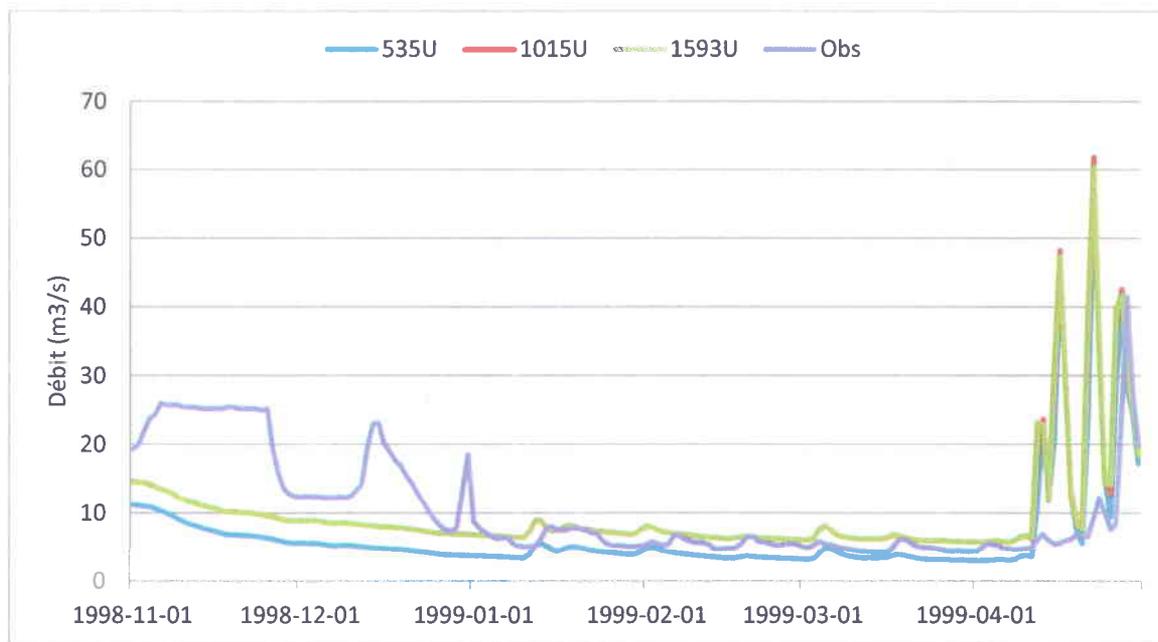


Figure A-29 : Comparaison des trois scénarios – saison sèche - 1998-1999 (projet de référence 2 052 UHRH).

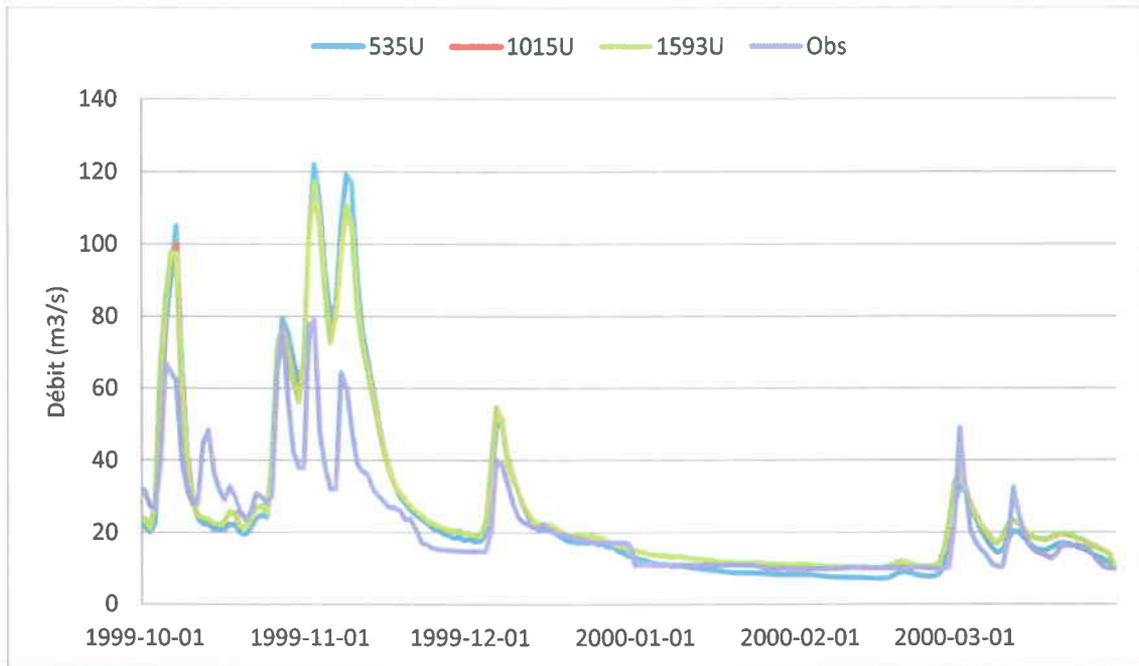


Figure A-30 : Comparaison des trois scénarios- saison sèche - 1999-2000 (projet de référence 2 052 UHRH).

Résultats du chapitre 7 : Capacité de reconstitution du régime hydrologique

Pour l'année 2000, tandis que le modèle simule bien le régime hydrologique du tronçon Gia Bay (débits simulés T-GB-Simulé vs débits mesurés S-GB-Mesuré), le débit mesuré au tronçon à Thac Rieng (T-TR-Mesuré) est sous-estimé (débits simulés S-TR-Simulé plus élevés) du 1^{er} juin jusqu'à la fin de l'année, mais sa tendance est toutefois bien respectée.

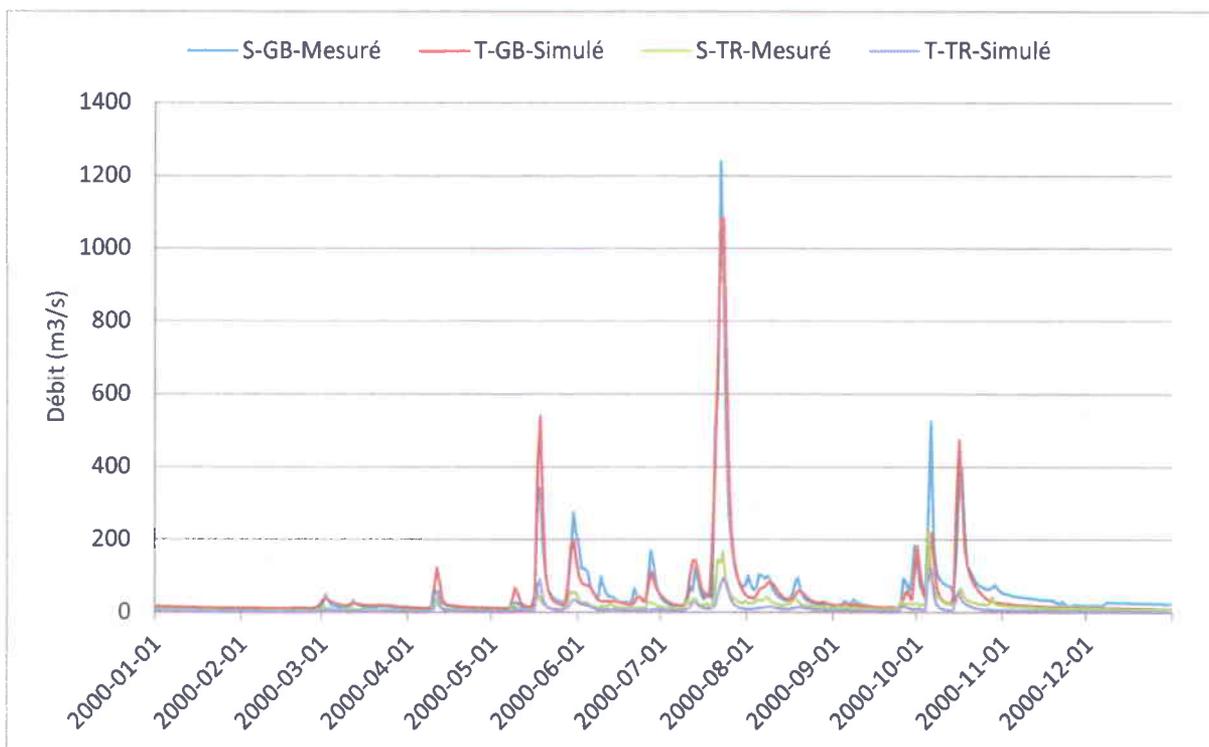


Figure A-31 : Résultats de simulation - deux tronçons aux deux stations hydrométriques- année 2000.

Pour l'année 2001, la simulation du régime hydrologique du tronçon Gia Bay (T-GB-Simulé) est encore meilleure. Le régime du tronçon Thac Rieng est toujours sous-estimé de la mi-juillet jusqu'à la mi-septembre, mais encore une fois, sa tendance est bien respectée par la simulation.

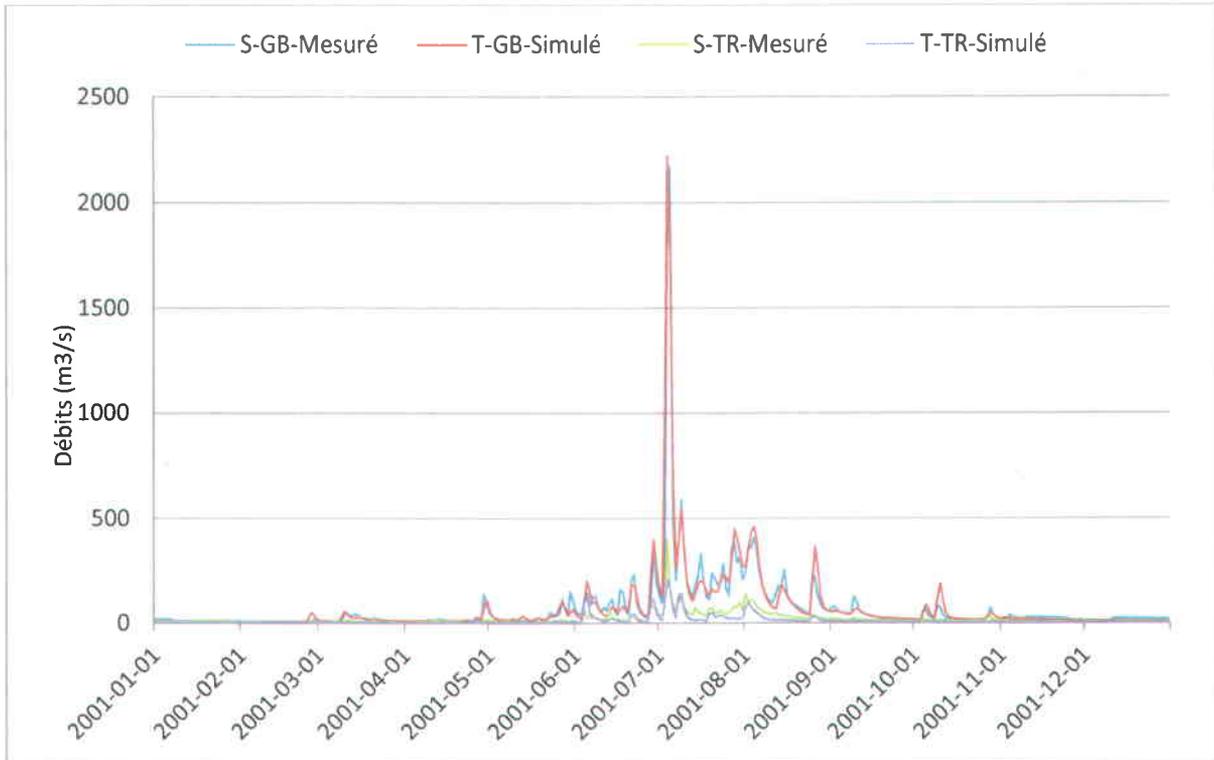


Figure A-32 : Résultats de simulation - deux tronçons se situant aux deux stations hydrométriques – année 2001.

Pour l'année 2002, le tronçon Gia Bay (T-GB-Simulé) est bien simulé comme auparavant. Le régime hydrologique du tronçon Thac Rieng est sous-estimé de la mi-mai au 1^{er} octobre, mais sa tendance est bien respectée par la simulation.

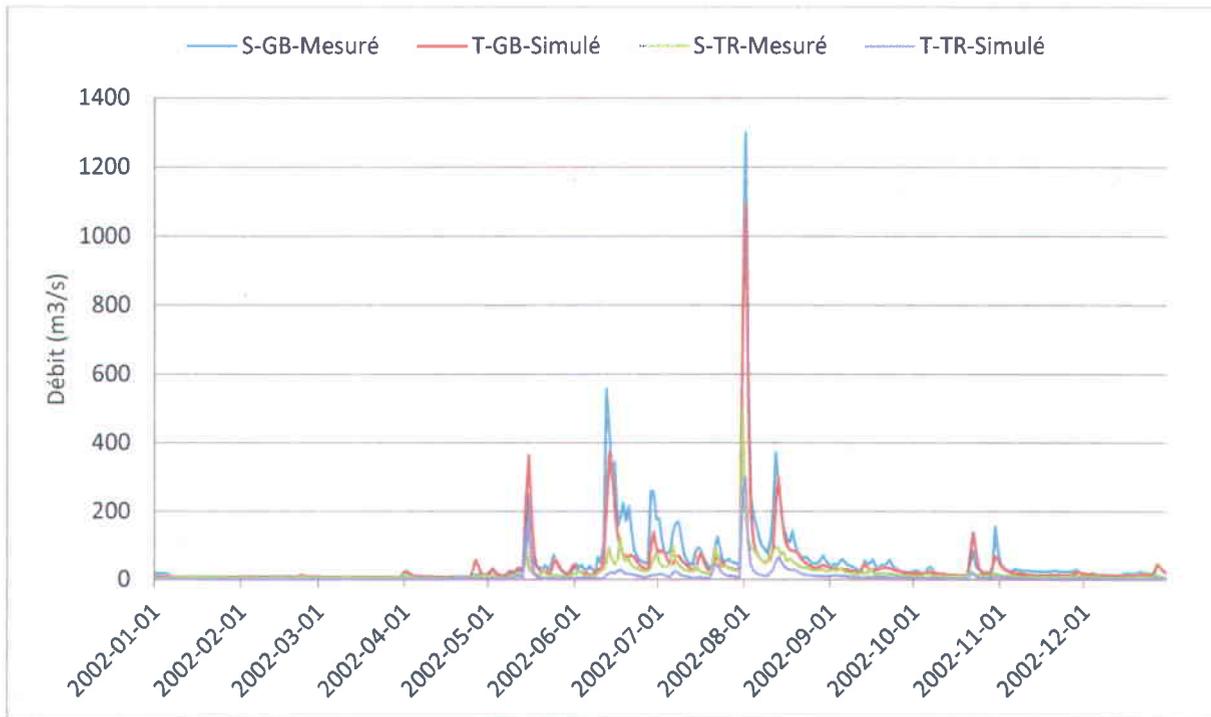


Figure A-33 : Résultats de simulation - deux tronçons se situant aux deux stations hydrométriques – année 2002.



Figure A-34 : Dispositif de mesure du niveau d'eau à Thac Rieng.

Chaque marche est reliée à une profondeur d'eau et une largeur de rivière prédéterminées. Les débits observés sont calculés à partir de la courbe d'étalonnage et de la profondeur de l'eau.

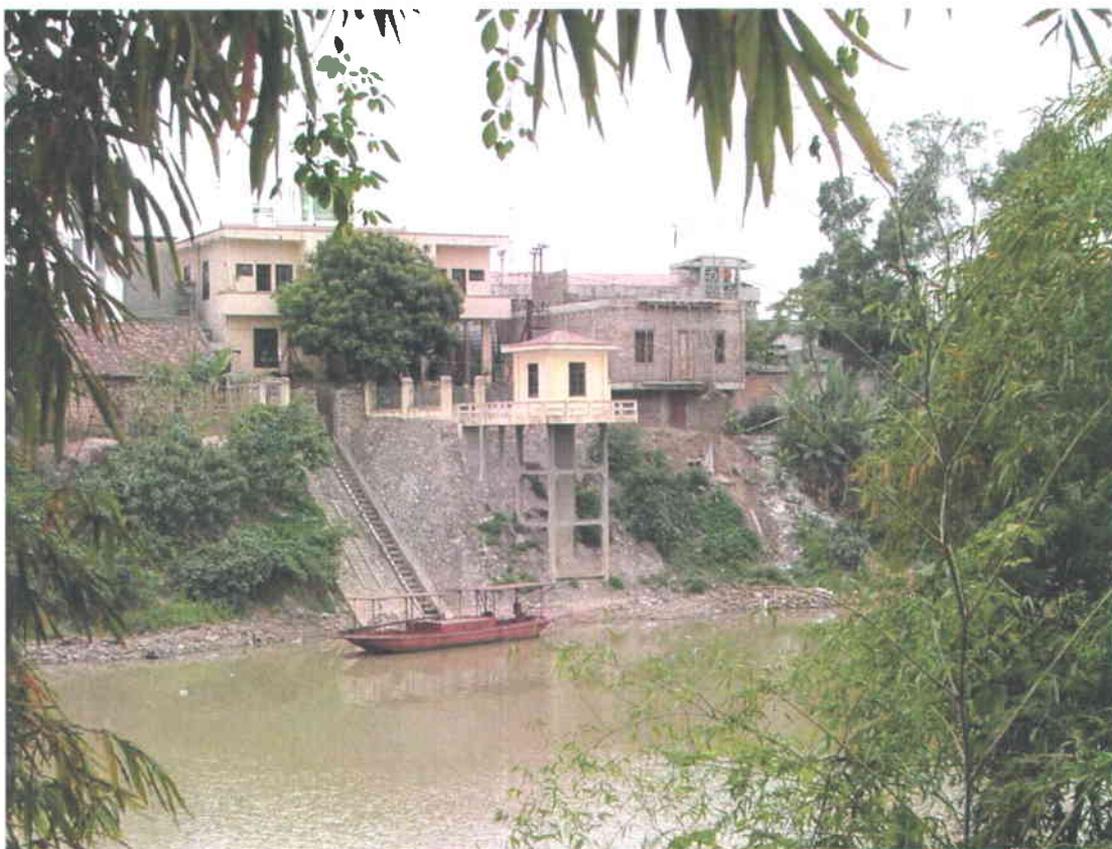


Figure A-35 : Dispositif de mesure du niveau d'eau à Gia Bay.

Chaque marche est reliée à une profondeur d'eau et une largeur de rivière prédéterminées pour la mesure des profondeurs d'eau et des largeurs. Le bateau permet de déterminer le niveau d'eau et la largeur de la rivière en saison sèche. Les débits observés sont calculés à partir de la courbe d'étalonnage et des profondeurs d'eau mesurés.

Tableau A-1 : Processus simulés et algorithmes disponibles dans HYDROTEL.

Processus hydrologiques	Algorithmes disponibles	
1. Interpolation des données météorologiques	1.1	Polygones de Thiessen
	1.2	Moyenne pondérée des trois stations les plus rapprochées
2. Évolution du couvert nival	2.1	Méthode mixte (degrés-jours) - (bilan énergétique)
3. Évapotranspiration potentielle	3.1	Thornthwaite
	3.2	Hydro-Québec
	3.3	Linacre
	3.4	Penman-Monteith
	3.5	Priestley-Taylor
4. Bilan d'eau vertical	4.1	Bilan vertical en trois couches (BV3C)
5. Écoulement vers le réseau hydrographique	5.1	Onde cinématique
6. Écoulement dans le réseau hydrographique	6.1	Onde cinématique
	6.2	Onde diffusante

Tableau A-2 : Manipulations effectuées sur le RHV afin de le rendre compatible avec les critères de format imposés par PHYSITEL.

Étape	Manipulations
1	Simplifier le RHV selon le niveau de détail désiré.
2	Rendre les vecteurs connexes.
3	Insérer des noeuds communs aux jonctions de vecteurs.
4	Orienter les vecteurs dans le sens de l'écoulement du réseau.
5	Assurer l'arborescence du réseau, éliminer les cycles fermés d'écoulement.
6	Représenter les lacs et les îles par des polygones.
7	Représenter les rivières décrites par deux rives en une seule polyligne.

Tableau A-3 : Pourcentages des classes d'occupation du sol.

Classe d'occupation du sol		Agricole	Forestier	Eau
%		8,21	36,55	3,84
Classe d'occupation du sol	Sol_nu	Mixte (Agri_Hab_Plant)	Arbustif	Urbain
%	1,03	43,28	2,35	4,72

Tableau A-4 : Caractéristiques et textures des sols correspondant aux classes de Rawls et Brakensiek (proposées dans Hydrotel).

N°	Texture	Porosité effective	Teneur en eau à la capacité au champ	Teneur en eau au point de flétrissement	Conductivité hydraulique à saturation	Pression de déplacement (arithmétique)	Distribution dimensionnelle des pores
		(φ_e)	(θ_{cc})	(θ_{pf})	(K_s)	(h_b)	(λ)
		cm^3/cm^3	cm^3/cm^3	cm^3/cm^3	m/h	m	
1	sand	0,417	0,091	0,033	0,21	0,1598	0,694
2	loamy_sand	0,401	0,125	0,055	0,0511	0,2058	0,553
3	sandy_loam	0,412	0,207	0,095	0,0259	0,302	0,378
4	loam	0,434	0,27	0,117	0,0132	0,4012	0,252
5	silt_loam	0,486	0,33	0,133	0,0068	0,5087	0,234
6	sandy_clay_loam	0,33	0,255	0,148	0,0043	0,5941	0,319
7	clay_loam	0,39	0,318	0,197	0,0023	0,5643	0,242
8	silty_clay_loam	0,432	0,366	0,208	0,0015	0,7033	0,177
9	sandy_clay	0,321	0,339	0,239	0,0012	0,7948	0,223
10	silty_clay	0,423	0,387	0,25	0,0009	0,7654	0,15
11	clay	0,385	0,396	0,272	0,0006	0,856	0,165

Tableau A-5 : Nombres d'UHRH pour chaque type de sol et pour les projets 1 593 UHRH et 235 UHRH.

Type de sol	Projet 1 593 UHRH	Projet 235 UHRH
Sand	0	0
Loamy sand	0	0
Sandy loam	23	1
Loam	578	87
Silt loam	13	1
Sandy clay loam	0	0
Clay loam	5	0
Silty clay loam	864	136
Sandy clay	0	0
Silty clay	18	1
Clay	54	6
Rocky	38	3

Tableau A-6 : Indice foliaire en fonction du jour et par classe d'occupation dans le bassin versant.

Jour	Classes d'occupation						
	Agricole	Forestier	Eau	Urbain	Sol_nu	Agri_Hab_Plant	Arbustif
1	3	5	0	0	0	2	2
100	3	5	0	0	0	2	2
150	3	5	0	0	0	2	2
200	3	5	0	0	0	2	2
250	3	5	0	0	0	2	2
300	3	5	0	0	0	2	2
365	3	5	0	0	0	2	2

Tableau A-7 : Profondeur racinaire (m) en fonction du jour et par classe d'occupation dans le bassin versant.

Jour	Classes d'occupation						
	Agricole	Forestier	Eau	Urbain	Sol_nu	Agri_Hab_Plant	Arbustif
1	0,5	1,5	0	0	0	0,5	0,3
100	0,5	1,5	0	0	0	0,5	0,3
150	0,5	1,5	0	0	0	0,5	0,3
200	0,5	1,5	0	0	0	0,5	0,3
250	0,5	1,5	0	0	0	0,5	0,3
300	0,5	1,5	0	0	0	0,5	0,3
365	0,5	1,5	0	0	0	0,5	0,3

Tableau A-8 : Disponibilité et sources des données aux stations hydrométriques et en fonction des années.

Code HYDROTEL	Station	Aire de drainage	Données	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
7777735	Thac Rieng	712 km2	Niveau d'eau	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
			Débit	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
7777726	Gia Bay	2670 km2	Niveau d'eau	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
			Débit	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■



Données de l'Académie des Sciences et Technologies du Vietnam



Données d'autres sources



Données estimées par une courbe de tarage

Tableau A-9 : Disponibilité et sources des données de pluie aux stations en fonction des années.

Code HYDROTEL	Station	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
7777771	Bac Can										
7777772	Cha										
7777773	Cho Don										
7777774	Cho Moi										
7777775	Cho Ra										
7777776	Dai Tu										
7777777	Diem Mac										
7777778	Dinh Hoa										
7777710	Ky Phu										
7777713	Phan Me										
7777716	Phu Luong										
7777717	Phu Thong										
7777720	Vo Nhai										
7777721	Vu Chan										
7777723	Thai Nguyen										
7777726	Gia Bay										
7777730	Tam Dao										
7777735	Thac Rieng										



Données de l'Académie des Sciences et Technologies du Vietnam



Données d'autres sources



Données interpolées

Tableau A-10 : Disponibilité et sources des données de températures (max./min.) aux stations en fonction des années.

Code	Station	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
7777771	Bac Can										
7777772	Cha										
7777773	Cho Don										
7777774	Cho Moi										
7777775	Cho Ra										
7777776	Dai Tu										
7777777	Diem Mac										
7777778	Dinh Hoa										
7777710	Ky Phu										
7777713	Phan Me										
7777716	Phu Luong										
7777717	Phu Thong										
7777720	Vo Nhai										
7777721	Vu Chan										
7777723	Thai Nguyen										
7777726	Gia Bay										
7777730	Tam Dao										
7777735	Thac Rieng										



Données de l'Académie des Sciences et Technologies du Vietnam



Données d'autres sources

Tableau A-11 : Variations relatives (%) des indicateurs de performance pour les quatre niveaux de changements des paramètres (projet 235 UHRH).

Paramètres	Nash-Sutcliffe				RCEQM				ERSVET			
	Niveaux de variation				Niveaux de variation				Niveaux de variation			
	-50 %	-25 %	25 %	50 %	-50 %	-25 %	25 %	50 %	-50 %	-25 %	25 %	50 %
GVT	1,19	0	0	-1,19	-2,48	-1,13	0,99	1,87	-2,54	-1,27	1,25	2,48
ETP	76,19	26,19	-1,19	3,57	-123,59	-53,08	4,14	-8,89	-77,14	-0,38	23,07	36,74
Z1	0	0	0	0	0,30	0,18	-0,16	-0,35	-0,70	-0,32	0,31	0,62
Z2	4,76	1,19	-1,19	-1,19	-13,03	-4,27	1,98	2,15	6,10	0,03	-3,05	-6,41
Z3	20,24	4,76	-1,19	-1,19	-43,82	-10,68	1,99	2,07	-14,51	-4,56	2,06	2,84
DES	1,19	0	0	0,00	-2,64	-0,81	0,42	0,64	-2,42	-0,01	0,43	0,67
CDR	1,19	0	0	0,00	-1,59	-0,78	0,74	1,46	0,93	0,47	-0,47	-0,94
RMMF	3,57	1,19	0	0,00	-7,49	-2,21	0,16	-0,75	-0,20	-0,07	0,04	0,05
RME	0	0	0	0	-0,01	0	0	0	0	0	0	0
RMAM	1,19	1,19	0	0,00	-3,51	-1,55	0,84	0,91	-0,02	-0,01	0,01	0,01
LR- HGM	1,19	0	1,19	2,38	-3,48	0,26	-2,09	-4,80	0,05	0,00	-0,04	-0,09

Tableau A-12 : Valeurs des paramètres de calibration pour les projets 235 UHRH, 1 593 UHRH et 2 052 UHRH.

Paramètres	235 UHRH	1 593 UHRH	2 052 UHRH
Gradient vertical des précipitations (mm/100 m)	0	0	0
Gradient vertical des températures (°C/100 m)	-0,5	-0,5	-0,5
Température de passage de la pluie en neige (°C)	1	1	1
Coefficient multiplicatif d'optimisation de l'évapotranspiration potentielle	0,91	0,94	0,93
Limite inférieure couche 1 (m)	0,13	0,13	0,13
Limite inférieure couche 2 (m)	0,9	1,1	1
Limite inférieure couche 3 (m)	2,9	3,3	3,2
Humidité relative initiale de la couche 1	0,7	0,6	0,7
Humidité relative initiale de la couche 2	0,9	0,8	0,9
Humidité relative initiale de la couche 3	0,9	0,9	0,9
Coefficient d'extinction	0,6	0,6	0,6
Coefficient de récession	$5 \cdot 10^{-6}$	10^{-5}	10^{-5}
Coefficient additif optimisation de la classe du sol	0	0	0
Coefficient multiplicatif d'optimisation de l'assèchement	1	1	1
Variation maximale de l'humidité relative par pas de temps	0,3	0,3	0,3
Coefficient de rugosité de Manning milieux forestière	0,3	0,3	0,3
Coefficient de rugosité de Manning eau	0,03	0,03	0,03
Coefficient de rugosité de Manning autres milieux	0,1	0,1	0,1
Lame de référence pour l'hydrogramme géomorphologique (m)	0,0006	0,0003	0,0003
Coefficient d'optimisation de la rugosité	1	1	1
Coefficient d'optimisation de largeur des rivières	1	1	1

Tableau A-13 : Classement des trois scénarios par indicateur - saison des pluies (référence 23 UHRH).

Scénario	Point par indicateur de performance		Pointage total	Rang
	NS	ERSVET		
535 UHRH	3	1	4	2
1 015 UHRH	1	3	4	2
1 593 UHRH	1	2	3	1

Tableau A-14 : Classement des trois scénarios par indicateur - saison sèche (référence 235 UHRH).

Scénario	Point par indicateur de performance		Pointage total	Rang
	NS	ERSVET		
535 UHRH	1	2	3	1
1 015 UHRH	3	3	6	3
1 593 UHRH	2	1	3	1

Tableau A-15 : Classement des trois scénarios par indicateur – saison des pluies (référence 2 052 UHRH).

Scénario	Point par indicateur de performance		Pointage total	Rang
	NS	ERSVET		
535 UHRH	2	1	3	1
1 015 UHRH	3	3	6	3
1 593 UHRH	1	3	4	2

Tableau A-16 : Classement des trois scénarios par indicateur – saison sèche (référence 2 052 UHRH).

Scénario	Point par indicateur de performance		Pointage total	Rang
	NS	ERSVET		
535 UHRH	1	2	3	1
1015 UHRH	2	3	5	3
1593 UHRH	2	1	3	1



ANNEXE B : PARAMÈTRES D'ÉTALONNAGE ET PROCESSUS HYDROLOGIQUES

Quatorze paramètres ont permis d'étalonner le modèle HYDROTEL pour le bassin versant de la rivière Cau. Cette section expose le rôle joué par chacun des paramètres dans les processus hydrologiques, ayant lieu à l'échelle des UHRH, avec les équations correspondantes. Le coefficient additif d'optimisation de la classe de sol (CAOC) n'est pas présenté dans cette synthèse, car son rôle a déjà été exposé au chapitre 4 (Section 4.4.1).

- Interpolation des données météorologiques

HYDROTEL permet de tenir compte de la variation de la température en fonction de l'altitude en un point à partir du gradient vertical des températures (GVT), qui peut être considéré comme paramètre d'étalonnage de la manière suivante :

$$T_c = T_m + GVT \left(\frac{A_s - A_u}{100} \right)$$

Avec :

T_c : température corrigée (°C);

T_m : température mesurée (°C);

GVT : gradient vertical des températures (°C/100 m);

A_s : altitude de la station la plus proche (m);

A_u : altitude de l'UHRH (m).

- Évapotranspiration réelle

L'évapotranspiration réelle (ETR) de chaque classe d'occupation nécessite de déterminer en premier l'évapotranspiration potentielle (ETP). Cinq algorithmes sont disponibles dans HYDROTEL pour estimer l'ETP, dont celui développé au Québec par Hydro-Québec, qui a été utilisé dans le cadre de cette thèse :

$$ETP = 0,029718(T_{\max} - T_{\min})e^{0,019\left(\frac{9}{5}(T_{\max} - T_{\min}) + 64\right)}$$

Avec :

ETP : évapotranspiration potentielle (mm/j);

T_{max} : température maximale journalière (°C);

T_{min} : température minimale journalière (°C).

L'ETP est ensuite ajustée à la hausse ou à la baisse à partir du coefficient multiplicatif d'optimisation de l'ETP, paramètre d'étalonnage d'HYDROTEL.

Finalement, pour chaque classe d'occupation du territoire dans une UHRH, l'ETR est calculée à partir de la valeur ajustée de l'ETP en suivant les trois principales étapes suivantes :

(1) Calcul de l'évapotranspiration maximale E_m du sol nu :

$$E_m = ETP e^{-DES \times IF}$$

Avec :

DES : coefficient d'extinction du rayonnement solaire dans la végétation, paramètre de l'étalonnage qui tient compte de l'absorption du rayonnement solaire par le couvert végétal;

IF : indice foliaire de la classe d'occupation.

(2) Calcul de l'évaporation réelle du sol nu :

$$E = C_s E_m$$

Avec :

C_s : coefficient d'assèchement de la couche de surface du sol.

C_s dépend de plusieurs paramètres, par exemple, le type de sol majoritaire dans l'UHRH, la teneur en eau absolue du sol, la teneur en eau à la capacité au champ, etc. 1992).

(3) Transpiration totale T_r provenant du profil de sol influencé par le système racinaire :

$$T_r = C_t \left[(ETP - E_m) \left(\beta + (1 - \beta) \frac{E}{E_m} \right) \right]$$

Avec :

C_t : coefficient similaire au coefficient d'assèchement de la surface du sol C_s ;

β : coefficient représentant l'effet de l'assèchement en surface sur l'évapotranspiration.

La transpiration totale T_r est redistribuée entre les couches du sol en fonction du rapport entre le contenu en eau de chaque couche atteinte par le système racinaire et du contenu en eau moyen du profil de sol. Pour déterminer la(les) couche(s) de sol atteinte(s) par les racines, la profondeur racinaire (PR) du type de couvert végétal intervient. L'ETR d'une classe d'occupation est calculée comme somme de l'évaporation du sol nu et de la transpiration des couches (T_r) du sol. À l'échelle d'une UHRH, l'ETR est une somme pondérée des ETR de chaque classe d'occupation du territoire par la surface occupée par l'occupation du territoire, qui intervient dans le bilan hydrologique.

- **Bilan d'eau vertical en trois couches (BV3C)**

BV3C est un algorithme qui permet de représenter les processus en jeu lors de l'infiltration en tenant compte des caractéristiques hydrauliques du sol. Il considère trois couches verticales du sol pour redistribuer l'eau provenant de l'infiltration. À partir de la surface du sol, la profondeur de la première couche, ou couche de surface (Z_1), de la deuxième couche (Z_2) et de la troisième couche (Z_3) sont des paramètres d'ajustement. La couche de surface est affectée par l'évaporation du sol nu et contrôle également le ruissellement de surface. La deuxième couche contrôle les processus liés à l'écoulement retardé dans la couche de surface. La dernière couche (couche 3) contrôle les processus liés au débit de base ou de la nappe. Le débit de base Q_3 (m^3/s) est modélisé comme suit :

$$Q_3 = k_r (Z_3 - Z_2) \theta_3$$

Avec :

k_r : coefficient de récession, paramètre d'ajustement;

Z_3-Z_2 : épaisseur de la couche 3 du sol (m);

θ_3 : teneur en eau de la couche 3.

L'infiltration est contrôlée par la lame de pluie lorsque la couche de surface n'est pas saturée et par la conductivité hydraulique à saturation lorsque cette couche est saturée. L'excès d'eau à la surface du sol est finalement affecté au ruissellement de surface. L'écoulement

- Écoulement vers le réseau hydrographique

Il s'agit des processus liés aux écoulements sur le sol (ex. : à travers la végétation), à l'intérieur des canaux (naturels ou artificiels) et dans le sol à la suite du bilan vertical. L'algorithme de l'onde cinématique est utilisé et les équations sont une approximation unidimensionnelle des équations de Saint-Venant et de l'équation cinématique de type Manning :

$$\begin{cases} \frac{\delta R}{\delta x} + \frac{\delta h}{\delta t} = i \\ h = \left(\frac{n}{1,49\sqrt{S_0}} R \right)^{3/5} \end{cases}$$

Avec :

R : écoulement latéral de maille en maille (m^2s^{-1});

h : épaisseur de la lame écoulee (m);

i : écoulement en provenance du bilan vertical ($m s^{-1}$);

n : coefficient de Manning;

S_0 : pente de la maille ($m m^{-1}$);

x : distance (m);

t : temps (s).

Cette formulation fait intervenir le coefficient de Manning, qui varie en fonction de la classe d'occupation du sol : coefficient de rugosité de Manning des milieux forestiers (RMMF),

coefficient de rugosité de Manning de l'eau (RME) et le coefficient de rugosité de Manning des autres milieux (RMAM).

La première étape du calcul de l'écoulement sur une UHRH consiste à évaluer un hydrogramme géomorphologique de référence. Il s'agit d'un hydrogramme qui est la variation temporelle du débit à la sortie de l'UHRH pour une lame d'eau de référence (LR-HGM) disponible pour l'écoulement à chaque pas de temps. La lame d'eau de référence provient d'un bilan vertical fictif sur l'UHRH, qui est déterminée indépendamment des séquences météorologiques réelles.

Étant donné que la lame d'eau réelle disponible pour l'écoulement provenant du sous-modèle du bilan vertical varie à chaque pas de temps, la distribution dans le temps des écoulements à la sortie de l'UHRH s'exprime de la manière suivante :

$$\bar{Q}_t = \bar{H}_t \frac{i_t}{i_{ref}}$$

Avec :

H_t : vecteur hydrogramme géomorphologique de référence de l'UHRH;

i_t : apport d'eau provenant du bilan d'eau vertical pour le pas de temps considéré;

i_{ref} : apport d'eau de référence provenant du bilan d'eau vertical.

