

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC
Institut National de la Recherche Scientifique
Centre Eau Terre Environnement

**MODÉLISATION DE L'IMPACT DES RIZIÈRES ET DE L'IRRIGATION SUR LE
RÉGIME HYDROLOGIQUE DE LA RIVIÈRE CONG AU VIETNAM**

Par
Nguyen Xuan Tuan

**Thèse présentée pour l'obtention du grade de
Philosophia doctor (Ph.D) en sciences de l'eau**

Jury d'évaluation

Examineur externe	Pierre Hubert Université Pierre et Marie Curie Paris VI
Examineur externe	Jacques Gallichand Université Laval
Examineur interne	Jean-Pierre Fortin INRS-ETE
Codirecteur de recherche	Nomessi Kokutse INRS-ETE
Codirectrice de recherche	Sophie Duchesne INRS-ETE
Directeur de recherche	Jean-Pierre Villeneuve INRS-ETE

Avril 2016

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je voudrais remercier sincèrement mon directeur de thèse Jean-Pierre Villeneuve pour son appui, son soutien, sa patience et surtout pour m'avoir accepté dans le cadre du programme de formation doctorale.

Je tiens également à remercier ma codirectrice de thèse, professeure Sophie Duchesne, pour son soutien et ses conseils tout le long de cette période de thèse.

J'exprime ma gratitude à mon codirecteur de thèse Nomessi Kokutse pour avoir codirigé cette thèse, pour ses corrections, son aide dans l'élaboration des concepts tout au long de cette thèse. Merci beaucoup pour ton aide du début jusqu'à la fin de cette thèse.

Je voudrais également remercier sincèrement Sébastien Tremblay pour son aide dans l'élaboration des codes des sous-modèles dans cette thèse.

Je remercie les professeurs Jean-Pierre Fortin et Alain Rousseau à l'INRS pour leurs suggestions et les précieuses informations qu'ils m'ont données sur les concepts de base du modèle HYDROTEL.

Je tiens à remercier Babacar Toumbou pour son aide durant la période de cours ainsi que pour les conseils en matière de méthodologie de recherche.

Je remercie les personnes suivantes pour leur aide au cours des années d'étude de la thèse : M. Jean-Daniel Bourgault pour son aide en matière de revue de la littérature; Mme Suzanne Dussault et Mme Aubert Linda pour les démarches administratives d'inscription et Mme Dianne Tremblay pour les premiers jours de recherche.

Je remercie les directeurs de l'Institut de Plannification des Ressources en Eau (IPRE) de Hanoi, To Trung Nghia et Bui Nam Sach, mes collègues Nguyen Xuan Phung, Pham Doan Hung de l'IPRE de m'avoir fourni plusieurs données nécessaires à cette thèse.

Je remercie ma collègue de l'INRS Hoang Kim Huong pour sa collaboration au sein de l'équipe du projet du bassin versant de la rivière Cau.

J'exprime ma gratitude à Quoc Sinh Le et à The Dong Pham pour m'avoir initialement présenté au professeur Jean-Pierre Villeneuve.

J'ai reçu beaucoup d'aide dans la période d'étude à l'INRS, je voudrais remercier l'ensemble des professeurs, techniciens, agents et étudiants de l'INRS-ETE.

Pour les soutiens financiers, je remercie le ministère de l'Éducation et de la Formation du Vietnam de m'avoir offert une bourse d'études et payé les frais de scolarité.

Enfin, je remercie ma famille et particulièrement ma plus petite fille Nguyen Anna, ma fille Nguyen Jennifer et mon fils Nguyen Xuan Huy Hoang, ma femme, ma sœur, mon beau frère, mon frère, mes belles sœurs, mes nièces, mes neveux et mes beaux-parents ainsi que mes parents pour leurs encouragements constants tout au long de mes études.

RÉSUMÉ

La collaboration scientifique entre le Canada et le Vietnam a permis de mettre en place un projet qui est celui de la gestion intégrée des ressources en eau du bassin versant (GIEBV) de la rivière Cau au Vietnam. Ce projet a été réalisé dans le cadre d'un partenariat entre l'Académie des Sciences et Technologies du Vietnam (ASTV) et l'Institut National de la Recherche Scientifique (INRS) du Canada. La thèse s'inscrit dans ce projet et a comme cas d'étude le sous-bassin versant de la rivière Cong du bassin versant de la rivière Cau. L'objectif global de la thèse est la modélisation de l'impact des rizières et de l'irrigation sur le régime d'écoulement en rivière du bassin versant de la rivière Cong.

Dans le cadre de ce projet, les outils de modélisation sont importants pour analyser les impacts de l'aménagement des rizières sur le bassin versant. HYDROTEL (Fortin *et coll.*, 1995) est un modèle qui permet de modéliser et de simuler l'ensemble des processus hydrologiques sur un bassin versant. Par contre, la version actuelle de ce modèle ne permet pas de simuler l'impact hydrologique des rizières ni le mode de gestion du lac Nuicoc, un réservoir d'importance situé sur le bassin versant de la rivière Cong. Ainsi, dans un premier temps, des sous-modèles ont dû être développés puis implémentés dans HYDROTEL, afin que ce modèle puisse être appliqué sur le bassin de la rivière Cong. Dans le premier de ceux-ci, soit le sous-modèle des rizières, le bassin versant est divisé en unités hydrologiques relativement homogènes (UHRH) à partir de la structure spatiale d'HYDROTEL. Dans chaque UHRH, les rizières sont considérées comme des réservoirs qui viennent modifier le bilan en eau journalier. De plus, des paramètres d'infiltration spécifiques (K_{inf}) aux rizières ainsi que le coefficient cultural du riz (K_c) sont implémentés. Dans le second sous-modèle, celui de gestion du lac, le lac-réservoir, Nuicoc est représenté comme un lac à deux sorties : une qui sert pour la régulation des crues et l'autre pour satisfaire les besoins en eau. Le sous-modèle de gestion du lac a été développé selon le principe de la conservation de la masse. Dans un second temps, le modèle HYDROTEL ainsi bonifié des sous-modèles des rizières et de gestion du lac a été appliqué sur le bassin versant de la rivière Cong pour analyser l'impact des rizières et de l'irrigation sur le régime d'écoulement en rivière du bassin versant.

Pour l'analyse de l'impact des rizières et de l'irrigation sur l'hydrologie du bassin versant, trois scénarios principaux ont été étudiés dans la thèse : (i) un premier scénario de conversion de 100 % des rizières actuelles en terres agricoles non inondables, pour lequel le volume

d'écoulement total augmente de 12 % à 16 % en saison des pluies et diminue de 3 à 4 % en saison sèche; (ii) un deuxième scénario d'augmentation de 30 % de la superficie des rizières, qui entraîne une diminution de 2 à 3 % du volume d'écoulement total en saison des pluies et une augmentation de 2 à 4 % de volume de l'écoulement total en saison sèche; (iii) un troisième scénario de réaffectation temporaire de 30 % des rizières en terres agricoles non inondables qui entraîne une augmentation de 2 à 4 % de l'écoulement total en saison des pluies et une diminution de 2 à 3 % en saison sèche. Cette thèse a apporté des éléments nouveaux en matière de compréhension des processus hydrologiques ayant lieu dans un bassin versant avec des rizières. Elle a permis de comprendre la nécessité de tenir compte du fonctionnement hydrologique de cultures nécessitant de grandes quantités d'eau (p. ex. les rizières) dans l'hydrologie d'un bassin versant. Ce travail a également permis d'améliorer le modèle HYDROTEL afin de l'utiliser dans la mise en place de la gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant de la rivière Cong et dans des bassins versants similaires au Vietnam. Les résultats de la thèse et les outils développés pourront servir aux gestionnaires et aux preneurs de décisions en vue de réaliser la gestion intégrée des ressources en eau sur le bassin versant de la rivière Cau.

TABLE DES MATIÈRES

1.	Introduction générale.....	1
1.1	Contexte des recherches	1
1.2	Objectifs de la thèse.....	4
1.3	Plan de la thèse	6
2.	Revue de la littérature	7
2.1	Introduction	7
2.2	La gestion intégrée de l'eau par bassin versant : concepts et modèles	7
2.2.1	Gestion intégrée de l'eau par bassin versant (GIEBV).....	7
2.2.1.1	Classification des modèles hydrologiques	7
2.2.1.2	Modèles hydrologiques distribués	8
2.3	Modèles de simulation des rizières.....	10
2.3.1	Quelques définitions de base	10
2.3.2	Modèles de rizières	11
2.4	Estimation des pertes d'eau dans une rizière	14
2.4.1	Calcul de l'évapotranspiration pour les surfaces rizicoles.....	14
2.4.2	Calcul de l'infiltration pour les surfaces rizicoles.....	16
2.4.2.1	Méthode basée sur relations empiriques.....	17
2.4.2.2	Approche à base physique.....	17
2.5	Modèles de simulation de l'irrigation.....	19
2.5.1	Quelques définitions de base	19
2.5.2	Modèles à base physique.....	20
2.5.3	Modèles conceptuels.....	24
2.6	Synthèse	24
3.	Étude de cas du bassin versant de la rivière Cong.....	26
3.1	Introduction	26
3.2	Caractéristiques naturelles.....	28

3.2.1	Topographie.....	28
3.2.2	Type de sol	29
3.2.3	Réseau de stations météorologiques et hydrométriques	30
3.2.4	Climat.....	31
3.2.5	Réseau hydrographique	33
3.2.6	Occupation du sol	35
3.2.7	Riziculture	37
3.3	Système d'irrigation.....	42
3.3.1	Évolution du système d'irrigation.....	42
3.3.2	Caractéristiques d'irrigation.....	43
3.3.3	Opération d'irrigation.....	45
3.3.4	Rôle du lac Nuicoc	48
3.4	Drainage en saison des pluies	48
3.5	Synthèse.....	50
4.	Modèle des rizières et implémentation dans HYDROTEL.....	51
4.1	Introduction	51
4.2	Méthodologie.....	51
4.2.1	Présentation du modèle hydrologique distribué HYDROTEL.....	51
4.2.2	Intégration du sous-modèle « rizière » aux structures d'HYDROTEL	53
4.2.3	Modifications adoptées dans le modèle HYDROTEL.....	55
4.2.4	Nouveau schéma de simulation implémenté dans HYDROTEL	58
4.3	Caractéristiques des rizières présentées dans le sous-modèle des rizières	60
4.4	Concepts et implémentation du sous-modèle des rizières	62
4.4.1	Concepts du modèle de rizières	62
4.4.2	Algorithme implémenté pour le sous-modèle des rizières.....	63
4.4.3	Simulation des processus hydrologiques dans les rizières	68
4.4.4	Organigramme	70

.....	72
4.5 Synthèse.....	73
5. Modèle de gestion du lac et implémentation dans HYDROTEL.....	75
5.1 Introduction.....	75
5.2 Gestion du lac et opération d'irrigation.....	75
5.2.1 Gestion du lac et opération d'irrigation.....	75
5.2.2 Gestion du lac.....	76
5.2.2.1 Paramètres principaux du lac Nuicoc.....	76
5.2.2.2 Gestion du déversoir.....	80
5.2.2.3 Gestion des vannes d'irrigation pour la satisfaction des besoins de consommation.....	80
5.3 Concept et implémentation de la gestion du lac.....	82
5.3.1 Concept d'écoulement en lac.....	82
5.3.2 Algorithme implémenté pour la gestion du lac.....	83
5.3.3 Mode opérationnel pour la simulation de la gestion du lac.....	87
5.3.4 Organigramme.....	88
5.3.5 Données d'entrée.....	90
5.4 Synthèse.....	91
6. Reconstitution du régime d'écoulement naturel de la rivière.....	93
6.1 Introduction.....	93
6.2 Méthodologie.....	93
6.2.1 Choix des sous-modèles dans HYDROTEL.....	93
6.2.2 Données d'entrée du modèle.....	94
6.2.3 Périodes d'analyse.....	105
6.2.4 Calage du modèle et critère d'analyse.....	106
6.3 Résultat.....	107
6.3.1 Calage du modèle.....	107

6.3.2	Analyse des résultats en fonction des saisons	110
6.4	Synthèse	112
7.	Calage du modèle et études d'impacts de scénarios d'aménagement sur l'hydrologie du bassin versant	115
7.1	Introduction	115
7.2	Calage du modèle des rizières en saison des pluies	116
7.2.1	Données de calage et de validation.....	116
7.2.2	Paramètres de calage intervenant dans les processus hydrologiques dans les rizières	119
7.2.3	Résultats	120
7.3	Analyses d'impacts de scénarios d'aménagements hydroagricoles sur le régime d'écoulement de la rivière	123
7.3.1	Méthodologie d'analyse.....	123
7.3.1.1	Choix des conditions météorologiques	123
7.3.1.2	Critères d'analyse	126
7.3.2	Résultats	127
7.3.2.1	Scénario d'analyse 1 : Impacts des rizières sur le régime d'écoulement en rivière	127
7.3.2.2	Scénario d'analyse 2 : Conversion de terre agricole en rizières pour augmenter les rizières de 30 %.....	133
7.3.2.3	Scénario d'analyse 3 : Conversion de 30 % des rizières en terre agricole non inondées.	138
7.4	Synthèse	144
8.	Études d'impacts de l'irrigation des rizières sur l'utilisation du volume utile du lac.....	147
8.1	Introduction	147
8.2	Impact de l'irrigation des rizières sur le volume utile du lac	147
8.2.1	Simulation des besoins en eau d'irrigation	147
8.2.2	Analyse d'impact de l'irrigation des rizières sur le volume utile du lac	150

8.3 Synthèse.....	151
9. Conclusion générale et perspective.....	153
10. Références bibliographiques.....	159
11. Annexes	171

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Photo de parcelles ou casiers rizicoles délimités par des diguettes	10
Figure 2.2 : Illustration d'une diguette avec le niveau d'eau dans le casier	11
Figure 2.3 : Illustration des variables du bilan d'eau dans une parcelle	12
Figure 2.4 : Illustration des cellules dans le champ rizicole.....	13
Figure 2.5 : Photo d'un canal d'irrigation	20
Figure 2.6 : Représentation schématique d'un bief de canal sous forme de réservoir	21
Figure 2.7 : Un canal comme mise en série de biefs	22
Figure 2.8 : Schéma simplifié d'un tronçon de canal à pentes variables	23
Figure 2.9 : Illustration des paramètres du bilan de masse dans une rizière.....	24
Figure 3.1 : Localisation des bassins versants des rivières Cau et Cong au Vietnam.....	27
Figure 3.2 : Carte topographique du bassin versant de la rivière Cong.....	28
Figure 3.3 : Carte des principaux types de sols dans la zone d'étude.....	29
Figure 3.4 : Carte du réseau des stations météorologiques et hydrométriques.....	31
Figure 3.5 : Carte du réseau hydrographique et du réseau d'irrigation dans la zone d'étude.....	34
Figure 3.6 : Variation des débits moyens mensuels aux deux stations hydrologiques (de 1960 à 1976 à Tancuong et de 1958 à 1968 à Nuihong).....	35
Figure 3.7 : Carte d'occupation du sol du bassin versant de la rivière Cong.....	36
Figure 3.8 : Photos d'illustration des phases de préparation des parcelles et deux des phases du stade de croissance de la plante	41
Figure 3.9 : Illustration des grandes phases d'évolution du bassin versant entre 1960 et 2009 .	43
Figure 3.10 : Photo du canal principal d'amenée d'eau	44
Figure 3.11 : Sections transversales des canaux d'irrigation et revêtement intérieur	45
Figure 3.12 : Carte des différents secteurs rizicoles et des différents canaux.....	47
Figure 3.13 : Schéma simple d'opération du lac Nuicoc	48
Figure 3.14 a- Drainage dynamique par pompage. b- Drainage gravitaire par ouverture dans une diguette qui délimite un casier (source : ADF, 2011).	49
Figure 4.1 : Illustration des couches lac, rizière et canaux d'irrigation.....	54
Figure 4.2 : Illustration de l'UHRH avec la surface \propto rizière occupée par la rizière.....	54
Figure 4.3 : (a) Schéma du bilan vertical en trois couches actuel; (b) Illustration du bilan vertical modifié en trois couches.....	56

Figure 4.4 : Nouvelle structure implémentée dans le modèle HYDROTEL (les cases rosées correspondent aux modifications apportées au modèle dans cette thèse)	59
Figure 4.5 : Développement du riz dans chaque période de croissances	60
Figure 4.6 : Illustration des stades de croissances du riz.....	60
Figure 4.7 : Illustration des variables du bilan de masse à l'échelle d'un casier rizicole	62
Figure 4.8 : Illustration des processus hydrologiques sur une UHRH avec une classe d'occupation rizière	64
Figure 4.9 : Organigramme implémenté dans HYDROTEL	72
Figure 5.1 : Schéma simple d'opération du lac Nuicoc	76
Figure 5.2 : Illustration des paramètres du lac Nuicoc	77
Figure 5.3 : Courbe de la relation volume-niveau	78
Figure 5.4 : Courbe de la relation surface moyenne-niveau.....	79
Figure 5.5 : Courbe de la relation niveau-volume	80
Figure 5.6 : Illustration de la gestion du lac dans HYDROTEL.....	83
Figure 5.7 : Organigramme	89
Figure 6.1 : Carte topographique du bassin versant de la rivière Cong.....	96
Figure 6.2 : Carte du du réseau hydrographique	97
Figure 6.3 : Carte d'occupation du territoire reconstituée pour le bassin versant de la rivière Cong avant la construction du lac (1961-1970)	99
Figure 6.4 : Traitement des données de type de sol pour le bassin versant de la rivière Cong (1961-1970).....	100
Figure 6.5 : Pluviométrie journalière sur le basin versant de la rivière Cong.....	103
Figure 6.6 : Données observées à la station Tancuong entre 1961 et 1970	104
Figure 6.7 : Résultat de calage du modèle sans rizière entre 1961 et 1966.....	108
Figure 6.8 : Volume total mensuel de l'écoulement	108
Figure 6.9 : Résultat de la validation du modèle sans rizière pour la période entre 1966 et 1970	111
Figure 7.1 : Station Giabay sur le bassin versant de la rivière Cau.....	118
Figure 7.2 : Débits observés à la station Giabay.....	119
Figure 7.3 : Hydrogrammes simulés et observés à la station Giabay en saison des pluies sur la période 2006-2007 (période de calage).....	121
Figure 7.4 : Hydrogrammes simulés et observés à la station Giabay en saison des pluies sur la période 2008-2009	121

Figure 7.5 : Hydrogramme à l'exutoire du bassin versant en saison sèche pour l'année sèche 1995 (scénario 1)	128
Figure 7.6 : Hydrogramme à l'exutoire du bassin versant en saison sèche pour l'année moyenne 2002 (scénario 1)	129
Figure 7.7 : Différence relative de volume d'écoulement en fonction des étapes de croissance du riz en saison sèche pour l'année sèche et pour l'année moyenne (scénario 1)	129
Figure 7.8 : Hydrogramme à l'exutoire du bassin versant en saison des pluies pour l'année humide 2008 (scénario 1)	131
Figure 7.9 : Hydrogramme à l'exutoire du bassin versant en saison des pluies pour l'année de pluviométrie moyenne 1981 (scénario 1)	132
Figure 7.10 : Différence relative des volumes d'écoulement en fonction des étapes de croissance du riz en saison des pluies pour l'année humide et pour l'année de pluviométrie moyenne (scénario 1).....	132
Figure 7.11 : Hydrogramme à l'exutoire du bassin versant en saison sèche pour l'année sèche 1995 (scénario 2)	134
Figure 7.12 : Hydrogramme à l'exutoire du bassin versant en saison sèche pour l'année moyenne 2002 (scénario 2).....	134
Figure 7.13 : Différence relative du volume d'écoulement en fonction des étapes de croissance du riz en saison sèche pour l'année sèche et pour l'année moyenne (scénario 2).....	135
Figure 7.14 : Hydrogramme à l'exutoire du bassin versant en saison des pluies pour l'année humide 2008 (scénario 2).....	137
Figure 7.15 : Hydrogramme à l'exutoire du bassin versant en saison des pluies pour l'année de pluviométrie moyenne 1981 (scénario 2).....	137
Figure 7.16 : Différence relative de volume d'écoulement en fonction des étapes de croissance du riz en saison des pluies pour l'année humide et pour l'année de pluviométrie moyenne (scénario 2)	138
Figure 7.17 : Hydrogramme à l'exutoire du bassin versant en saison sèche pour l'année sèche 1995 (scénario 3)	139
Figure 7.18 : Hydrogramme à l'exutoire du bassin versant en saison sèche pour l'année moyenne 2002 (scénario 3).....	140
Figure 7.19 : Différence relative des volumes d'écoulement en fonction des croissances du riz en saison sèche pour l'année sèche et pour l'année moyenne (scénario 3)	140
Figure 7.20 : Hydrogramme à l'exutoire du bassin versant en saison des pluies pour l'année humide 2008 (scénario 3).....	142

Figure 7.21 : Hydrograme à l'exutoire du bassin versant en saison des pluies pour l'année de pluviométrie moyenne 1981 (scénario 3).....	143
Figure 7.22 : Différence relative du volume d'écoulement en fonction des étapes de croissances du riz en saison des pluies pour l'année humide et pour l'année de pluviométrie moyenne (scénario 3).....	143
Figure 8.1 : Précipitation moyenne journalière sur le bassin versant en 1988 (probabilité au dépassement P85%).....	149
Figure 8.2 : Hauteur des pertes journalières par évapotranspiration réelle et infiltration journalière sur les rizières en 1988.....	149
Figure 8.3 : Hauteur d'irrigation cumulée à la surface sur les rizières en 1988 en saison sèche et en saison des pluies.....	150
Figure 8.4 : Hauteur d'eau sur la rizière en 1988.....	150
Figure 8.5 : Courbe de volume du lac (1977-2009).....	151

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 : Occupation du sol dans la zone d'étude (Source : IPRE, 2004)	37
Tableau 3.2 : Stades de croissance du riz et étapes de préparation des parcelles rizicoles en amont du lac (Source : IPRE, 2008)	39
Tableau 3.3 : Stades de croissance du riz et étapes de préparation des parcelles	40
Tableau 3.4 : Caractéristiques des canaux d'irrigation (Source : IPRE, 2008)	44
Tableau 3.5 : Canaux utilisés pour l'irrigation des différents secteurs avec les surfaces de rizières correspondantes (Source : IPRE, 2004).....	46
Tableau 4. 1 : Processus simulés et algorithmes disponibles pour les simulations hydrologiques (Source: Fortin et Royer, 2004)	52
Tableau 4. 2 : Équations du BV3C et du BV3C_modifié	57
Tableau 4.3 : Hauteurs d'eau utilisées dans les rizières pour les simulations	61
Tableau 4.4 : Définition des variables de la figure 4.8	64
Tableau 4.5 : Variables dans le code du sous-modèle des rizières	71
Tableau 5.1 : Définition des variables présentées dans l'organigramme	88
Tableau 6.1 : Algorithmes sélectionnés pour les simulations hydrologiques.....	94
Tableau 6.2 : Données des indices foliaires et profondeurs racinaires adaptées en fonction du stade de croissance de la plante	101
Tableau 6.3 : Détermination des valeurs de l'indice thermique annuel de Thornthwaite	102
Tableau 6.4 : Détermination des seuils.....	105
Tableau 6.5 : Valeurs des paramètres de calage.....	110
Tableau 6.6 : Indicateurs de performance du modèle sans rizière par saison et toute l'année.	112
Tableau 7.1 : Valeurs des indices foliaires et des profondeurs racinaires.....	117
Tableau 7.2 : Paramètres ajustés du sous-modèle des rizières.....	120
Tableau 7.3 : Comparaison des indicateurs de performance sur la période 2006-2009.....	122
Tableau 7.4 : Résumé des différentes analyses d'impacts et des scénarios.....	125

1. Introduction générale

1.1 Contexte des recherches

Depuis plusieurs années, le Vietnam est connu en Asie comme un pays avec une croissance économique de plus de 6 % (DGS, 2015). Dans cette économie, le secteur agricole occupe une place importante et sa contribution dans l'économie dépasse 50 % du produit intérieur brut (Bui et Nguyen, 2002). Conscients du rôle majeur joué par l'agriculture dans le développement socio-économique du pays, la population et le gouvernement vietnamien ont toujours accordé une importance capitale à ce secteur. De nombreux projets et lois ont ainsi permis de développer l'ensemble du secteur agricole, d'augmenter les quantités produites, le rendement des cultures et d'ouvrir le Vietnam aux marchés internationaux pour l'exportation des produits agricoles.

Parmi ces produits agricoles, le riz occupe la première place. Depuis plusieurs années, le Vietnam est devenu l'un des plus gros producteurs et exportateurs de riz au monde. À la 3^e Conférence internationale sur le riz ayant eu lieu à Hanoi au Vietnam en 2010, le Vietnam a été reconnu comme 2^e exportateur mondial de riz (Dao, 2010). La quantité totale de riz produite augmente continuellement et est passée de 18 millions de tonnes en 1986 à presque 34 millions de tonnes en 1999 (Bui et Nguyen, 2002). La superficie totale des rizières a également augmenté durant cette période, passant de 5,8 millions d'hectares en 1986 à 7,6 millions d'hectares en 1999 (Bui et Nguyen, 2002). L'augmentation des quantités de riz produites a été possible grâce à différents programmes soutenus par les pouvoirs publics : le défrichement de forêts pour l'extension des surfaces agricoles, les grands aménagements hydrauliques (p. ex. la construction de canaux d'irrigation), la mise en place de la riziculture intensive (plusieurs cycles de culture dans l'année), les investissements, etc. La science et la technologie viennent en appui à l'ensemble du processus. Elles jouent un rôle majeur dans le développement continu du secteur agricole et surtout dans la culture du riz au Vietnam. Elles permettent d'améliorer les connaissances nécessaires pour le développement des bassins rizicoles, pour l'adaptation de techniques de culture, pour le calcul du rendement des rizières, pour les aménagements hydrauliques nécessaires pour répondre aux besoins en eau des rizières, etc.

Dans ce contexte d'augmentation continue de la quantité de riz produite, le gouvernement vietnamien a effectué des aménagements dans des bassins versants comme celui de la rivière Cau, situé au nord de la capitale Hanoi. Dans ce bassin versant d'une superficie d'environ 6 000 km², de nombreuses rizières ont été aménagées ces deux dernières décennies et d'autres aménagements sont prévus dans les années à venir. Pour répondre aux besoins en eau des rizières durant la saison de déficit de pluies, à savoir la saison sèche (novembre à mai), un vaste réseau d'irrigation a été construit et plusieurs aménagements ont été effectués. Ce réseau permet d'irriguer environ 190 000 ha de riz, soit un peu plus de 50 % de l'ensemble des terres agricoles irriguées (IPRE, 2004 et 2008). Pendant la saison des pluies, les rizières sont généralement irriguées par les pluies et le ruissellement de surface. Par conséquent, durant toute l'année, en saison des pluies comme en saison sèche, l'utilisation d'une partie des eaux du bassin versant pour répondre aux besoins en eau des rizières peut contribuer à la réduction des quantités d'eau disponibles pour les autres besoins (autres cultures, besoins des industries, pisciculture, alimentation en eau des municipalités, loisirs, etc.). À part l'irrigation, des fertilisants sont également utilisés pour accroître le rendement des rizières et accroître les rendements à plus de cinquante quintaux/ha (Bui et Nguyen, 2002). Les polluants provenant des rizières, drainés par les eaux de ruissellement, peuvent ainsi contribuer à la dégradation de la qualité des eaux de surface du bassin versant.

Aujourd'hui, la demande en eau à l'échelle du bassin devient de plus en plus élevée à cause de l'essor économique que connaît ce bassin versant. Durant certains moments de l'année, les quantités d'eau ne suffisent plus à couvrir l'ensemble des besoins à l'échelle du bassin. Les débits en périodes de crue et d'étiage ont également tendance à diminuer dans certains tronçons de rivières, ce qui a un impact sur les quantités d'eau disponibles en aval pour répondre aux besoins. Par exemple, certaines activités agricoles en amont du bassin versant ont des répercussions sur les disponibilités en eau en des points situés en aval du bassin versant. Ainsi, pour mieux répondre aux besoins en eau à l'échelle du bassin versant, il est aujourd'hui nécessaire d'effectuer une gestion intégrée des eaux du bassin versant. Cette gestion intégrée doit passer par la prise en compte de toutes les activités pouvant potentiellement affecter les quantités d'eau, surtout celles qui consomment d'importantes quantités d'eau comme la riziculture, et évaluer leur impact sur l'hydrologie du bassin versant. L'évaluation des impacts de la riziculture et de l'extension des aires rizicoles pourra permettre de fournir les éléments d'aide à la décision aux pouvoirs publics.

C'est dans ce contexte que ce travail de thèse propose d'élaborer un modèle permettant d'évaluer les impacts de la riziculture et de l'irrigation sur le régime hydrologique des rivières d'un bassin versant comme celui de la rivière Cong. Au-delà de l'évaluation des impacts des rizières actuelles sur le régime hydrologique de la rivière, cette thèse évaluera l'impact de l'extension des rizières dans les années à venir sur le régime hydrologique de la rivière, ainsi que de la réaffectation de rizières en terres agricoles en cas de déficit en eau important. Cette évaluation s'appuiera sur une approche de modélisation et de simulation de scénarios probables d'extension des surfaces rizicoles et de conversion temporaire des rizières en terres agricoles. La politique d'augmentation de la production de riz adoptée par les pouvoirs publics depuis plusieurs décennies, par conversion d'une partie des terres (agricoles ou non utilisées) en rizières, pourrait avoir des impacts importants sur l'écoulement de surface et sur les débits en rivière.

Pour appuyer l'aide à la décision en matière d'aménagements hydro-agricoles, l'approche proposée dans cette thèse est celle du développement d'un modèle de simulation qui permettra : (1) d'intégrer le fonctionnement hydrologique des rizières dans l'ensemble des processus hydrologiques et d'en tenir compte dans le bilan hydrologique et (2) d'évaluer, à partir de quelques scénarios, l'impact des rizières et de l'irrigation sur les débits en rivière et sur l'écoulement de surface dans le bassin versant. Ce modèle sera implémenté comme une composante ou un sous-modèle d'un modèle hydrologique préexistant, HYDROTEL (Fortin *et coll.*, 1995), développé à l'Institut National de la Recherche Scientifique (INRS). Il s'appuiera sur les concepts de modélisation du modèle HYDROTEL en ce qui concerne les processus, le pas de temps, l'échelle spatiale, etc. Il permettra de simuler différents processus hydrologiques qui ont lieu à l'échelle d'un bassin versant, en intégrant les rizières et l'irrigation par canaux.

Le choix du modèle HYDROTEL pour le développement des concepts qui sous-tendent la modélisation des rizières et leur implémentation se justifie par les raisons suivantes :

- Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre d'un projet de « Gestion intégrée des ressources en eau du bassin versant de la rivière Cau au Vietnam ». Ce programme a été mis en place dans le cadre d'un partenariat entre l'Académie des Sciences et Technologies du Vietnam (VAST) et l'INRS (Québec, Canada);
- HYDROTEL a été choisi pour la modélisation de l'hydrologie du bassin versant en vue de la mise en place de la gestion intégrée par bassin versant dans le cadre de ce projet.

Ainsi, ce modèle a déjà fait l'objet d'une série d'adaptations et d'un calage (Nguyen, 2012), sans tenir compte, cependant, des particularités dans le fonctionnement hydrologique des rizières. Il est alors nécessaire d'intégrer, à partir d'un sous-modèle, le fonctionnement hydrologique des rizières. Cela pourrait permettre d'améliorer les résultats de simulation, quant à l'écoulement de surface et les débits en rivière, et surtout évaluer l'impact possible d'extension des rizières (ou de la réaffectation temporaire de rizières en terres agricoles) sur l'hydrologie du bassin versant.

Pour utiliser les modèles en vue d'évaluer l'impact de l'irrigation et des rizières sur le régime hydrologique des rivières, une étude de cas sera faite. Il s'agit du bassin versant de la rivière Cong, sous bassin de la rivière Cau qui est la zone d'étude du projet scientifique et collaboratif Canada-Vietnam portant sur la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE). Dans ce sous-bassin versant, les rizières représentent une proportion non négligeable des terres agricoles, soit une occupation d'environ 42 % de la surface des terres agricoles ainsi qu'une consommation d'environ 90 % du volume utile de réservoir du lac Nuicoc, (IPRE, 2004). Il existe également un système d'ouvrages hydrauliques, composé d'un lac et d'un réseau d'irrigation situé en aval du lac qui permet de réguler le débit en aval de la rivière Cong en saison des pluies et de stocker de l'eau pour l'irrigation des rizières en saison sèche (IPRE, 2004). Ce réseau de canaux permet de répondre aux besoins en eau des rizières et à d'autres besoins dans le bassin versant de la rivière Cong.

1.2 Objectifs de la thèse

Dans le but d'évaluer l'impact de la riziculture et de l'irrigation sur le régime hydrologique d'une rivière, il est important de disposer d'un modèle d'analyse pouvant permettre de simuler différents scénarios réels ou potentiels pour la prise de décision. Par conséquent, l'objectif principal de ce travail de thèse est de modéliser, dans un contexte de GIRE, le fonctionnement hydrologique des rizières et la variation du niveau/volume d'eau dans le lac en vue d'analyser l'impact des rizières et de l'irrigation sur le régime hydrologique d'une rivière et l'écoulement de surface.

Pour atteindre l'objectif principal de cette recherche, les objectifs spécifiques suivants seront considérés :

1. Élaborer un modèle de simulation du fonctionnement hydrologique d'une rizière adapté aux principes de gestion par bassin versant et qui tient également compte de l'irrigation,

qui permettra d'estimer l'évolution des niveaux/volumes d'eau dans le lac permettant de répondre aux besoins en eau sur le bassin versant. Ce modèle devra permettre de différencier le fonctionnement hydrologique des surfaces inondées comme les rizières de celui des autres surfaces agricoles non inondées. En effet, des surfaces comme les rizières ont un comportement similaire à celui de petits réservoirs qui stockent et drainent de l'eau en fonction des besoins et des saisons de l'année. Pour ce faire, il sera nécessaire de s'appuyer sur la littérature existante pour répertorier les modèles préexistants et les principes qui les régissent afin d'identifier les concepts qui peuvent être adaptés au contexte de la zone d'étude.

2. Implémenter le modèle développé dans HYDROTEL, outil de simulation des processus hydrologiques à l'échelle d'un bassin versant. Pour ce faire, il est important d'adapter le modèle aux concepts déjà existants dans HYDROTEL. Il sera nécessaire de formuler les hypothèses appropriées de résolution des équations régissant le modèle de rizière en respectant les règles de discrétisation spatiale du bassin versant et de discrétisation temporelle imposées par HYDROTEL. Par ailleurs, le calage du modèle HYDROTEL en tenant compte de la simulation des processus hydrologiques sur les rizières permettra d'évaluer la capacité du modèle à reproduire les débits en rivière et l'écoulement de surface.
3. Évaluer l'impact des rizières actuellement présentes dans le bassin versant sur le régime hydrologique de la rivière Cong, par simulation des débits en rivière et de l'écoulement total dans le bassin versant. Pour évaluer un tel impact, il sera nécessaire de tenir compte des besoins spécifiques en eau des rizières. Le riz étant une plante dont les besoins en eau sont variables d'une étape de croissance à une autre, l'impact de cette évolution sur l'hydrologie du bassin versant sera également évalué.
4. Analyser l'impact d'accroissements possibles des surfaces rizicoles dans le bassin sur l'hydrologie du bassin versant, par conversion d'une partie des autres terres agricoles en rizières. Même si cela n'est pas l'objectif primordial des pouvoirs publics, il est possible de réaffecter temporairement des rizières en terres agricoles en cas de déficit important d'eau dans le bassin versant. Ainsi, l'impact de la réaffectation temporaire de rizières en terres agricoles sera également analysé dans un contexte de GIRE. Cette analyse s'appuiera sur la construction de scénarios plausibles issus de l'analyse des politiques de développement agricole.

1.3 Plan de la thèse

La présente thèse est organisée en huit chapitres. Le chapitre 2 présente la revue de la littérature. Il expose les principaux modèles de simulation de l'hydrologie des bassins versants ainsi que les modèles de simulation des processus hydrologiques dans les rizières dans un contexte de GIRE. Quelques modèles de simulation d'irrigation, répondant aux principes de la gestion intégrée par bassin versant, seront également exposés. Les principes et les équations qui sont à la base de ces modèles seront également présentés. Une analyse des modèles a également été effectuée dans le but d'identifier les modèles dont les principes répondent au mieux à la gestion intégrée par bassin versant. Le chapitre 3 présente la zone d'application, qui est le bassin versant de la rivière Cong au Vietnam. La zone d'étude retenue pour l'application des modèles de rizières et d'irrigation sera décrite. Cette zone servira à évaluer l'impact de scénarios de culture et d'extension des surfaces rizicoles sur l'hydrologie du bassin versant. Les caractéristiques naturelles, l'occupation du territoire, avec un accent particulier sur les rizières, ainsi que les conditions hydrométéorologiques seront décrites. Le Chapitre 4 expose la méthodologie de recherche. Il présente les concepts d'implémentation des modèles. L'outil de simulation HYDROTEL, dans lequel seront implémentés les modèles développés, sera présenté. Les principes et les équations qui régissent le modèle de simulation de l'irrigation et des processus hydrologiques dans les rizières seront présentés, avec les hypothèses de simplification. Le chapitre 5 expose le modèle d'irrigation à partir du réservoir (lac Nuicoc), les concepts et les stratégies d'implémentation de ce modèle dans HYDROTEL. Le chapitre 6 présente la reconstitution du régime hydrologique de la rivière entre 1960 et 1972. Le régime hydrologique du bassin de la rivière Cong a été reconstitué au cours de la période de l'écoulement naturel du bassin, période qui précède 1977, année des aménagements hydroagricoles. La reconstitution du régime d'écoulement naturel de la rivière permettra de déterminer certains paramètres de calage du modèle HYDROTEL. Le chapitre 7 présente l'analyse d'impact des aménagements hydroagricoles sur le régime hydrologique de la rivière Cong. Il expose la méthodologie d'analyse et les résultats de l'évaluation des impacts (i) des rizières actuelles et de l'irrigation; (ii) d'aménagements futurs par implantation de nouvelles rizières dans le bassin; et (iii) de la réaffectation temporaire de rizières en terres agricoles. Enfin, le chapitre 8 présente la conclusion générale et les perspectives futures de cette thèse.

2. Revue de la littérature

2.1 Introduction

Ce chapitre a pour principal objectif d'exposer un résumé des concepts de base provenant de travaux de recherche qui existent dans la littérature scientifique : (i) les modèles hydrologiques de gestion intégrée en eau par bassin versant intégrant les processus hydrologiques ayant lieu dans les rizières et les principes d'irrigation; (ii) les modèles de simulation des rizières, soit les concepts de base de ces modèles avec leurs équations; et (iii) les modèles de simulation de l'irrigation de parcelles agricoles. Une synthèse de toutes ces notions est également présentée afin d'identifier les éléments importants pouvant servir d'orientation pour la modélisation du fonctionnement hydrologique des rizières dans le cadre de cette thèse.

2.2 La gestion intégrée de l'eau par bassin versant : concepts et modèles

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

Dans un bassin versant, il existe divers usages de l'eau. Selon Villeneuve *et coll.* (2008), pour éviter un conflit entre ces différents usages, la gestion intégrée de l'eau par bassin versant est nécessaire pour mieux gérer la quantité d'eau selon les interdépendances des usages multiples ainsi qu'intégrer l'influence des divers usages du territoire sur la qualité de l'eau. Dans un contexte de gestion intégrée de l'eau par bassin versant, pour une meilleure prise de décision, il est recommandé d'avoir recours à un modèle pour analyser l'évolution de la quantité et de la qualité de l'eau en rivière suite à un aménagement. Plusieurs outils existent dans la littérature pour aider dans la mise en place de la GIEBV. L'un de ces outils est l'outil GIBSI (Villeneuve *et coll.*, 1998; 2003; Rousseau *et coll.*, 2000) développé par l'INRS et qui permet de simuler l'ensemble des processus hydrologiques de l'évolution de la quantité et de la qualité de l'eau dans un bassin versant. GIBSI intègre différents modèles pour simuler l'hydrologie, l'érosion, le transport de sédiments, le transport de contaminants et la qualité de l'eau en rivière.

2.2.1.1 *Classification des modèles hydrologiques*

Selon Singh (1995) et Indarto (2008), il y a trois critères pour classer les modèles hydrologiques : (i) la description des processus (global, distribué); (ii) l'échelle (modèles globaux, distribués et semi-distribués); et (iii) la technique utilisée pour les équations (modèles à base physique, conceptuelle ou empirique). Selon la classification des modèles hydrologiques,

les modèles hydrologiques peuvent être subdivisés en trois catégories principales (Cunderlik, 2003; Villeneuve, 2008) : (i) les modèles globaux, comme par exemples IHACRES (Identification of unit Hydrographs and Component flows from Rainfalls, Evaporation and Streamflow data) (Littlewood *et al.*, 1997), SRM (Snowmelt-Runoff Model) (Martinec *et al.*, 1994) et WATBAL (Kaczmarek, 1993); (ii) les modèles semi-distribués, comme par exemples SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Arnold *et al.*, 1998), HBV-96 (Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning) (Bergström, 1995), HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) (Singh, 1995), HFAM (Hydrocomp Forecast and Analysis Modeling) (Hydrocomp, 2002), HSPF (Hydrologic Simulation Program-Fortran) (Crawford and Linsley, 1966), PRMS (Precipitation-Runoff Modeling System) (Leavesley *et al.*, 1983), SSARR (Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation) (Rockwood, 1964), SWMM (Storm Water Management) (OSU-CE, 2003) et TOPMODEL (Beven, 1997); et (iii) les modèles distribués, par exemple CASC2D (Schroet *et coll.* 2000), CEQUEAU (Morin *et coll.*, 1981), GAWSER/GRIFFS (Guelph All Weather Sequential Event Runoff-Grand River Integrated Flood Forecast System (Boyd *et al.*, 2000), HYDROTEL (Fortin *et al.*, 1995), MIKE/SHE (Abbott *et al.*, 1986) et WATFLOOD (DHI, 2000). Il est important de préciser que malgré la diversité de la classification des modèles hydrologiques, les modèles distribués à base physique à l'échelle du bassin versant intéressent tout particulièrement cette thèse. En effet, pour la mise en place de la GIRE par bassin versant, le modèle HYDROTEL (Fortin *et coll.*, 1995) est celui qui est retenu pour le projet de GIRE du bassin versant de la rivière Cau.

2.2.1.2 Modèles hydrologiques distribués

Pour mettre en place la GIRE, il existe plusieurs modèles. Cependant, aucun de ces modèles n'intègre de manière complète les processus hydrologiques pouvant avoir lieu dans une rizière (p. ex., stock d'eau dans la rizière, drainage d'eau excédentaire) ainsi que l'irrigation à partir d'un lac. Parmi ces modèles de GIRE, certains parmi les plus connus sont :

- WATFLOOD (Kouwen, 2006), qui est conçu pour des simulations des processus hydrologiques comme l'interception, l'infiltration, l'évaporation, la fonte des neiges, le débit de surface, la recharge, l'écoulement de base, le ruissellement de surface et l'écoulement en rivière;
- MIKE SHE IR et Mike11Nam (Abbott *et coll.*, 1986; DHI, 2000; Gupta *et coll.*, 2008), qui sont des modèles permettant de décrire les processus hydrologiques dans un bassin versant. Ces modèles intègrent un sous-modèle d'irrigation à partir du réseau hydrographique du bassin versant. Cependant, ces modèles ne tiennent pas compte des processus de drainage ni de celui du stockage d'eau dans les rizières;

- CEQUEAU (Morin, 1981), qui contient une fonction de bilan d'eau vertical qui considère les différents processus comme un système de réservoirs s'écoulant vers l'autre. Ce modèle ne permet pas de représenter les processus d'écoulement dans les rizières;
- GAWSER/GRIFFS (Schroet *et coll.*, 2000), qui comprend des sous-modèles comme la fonte de neige, la distribution du couvert nival, l'infiltration, l'écoulement en rivière, le ruissellement terrestre et l'écoulement hypodermique. Ce modèle peut permettre d'estimer l'impact de différents types d'occupation du sol sur le régime hydrologique;
- HYDROTEL (Fortin *et coll.*, 1995; Fortin et Royer, 2004), qui est un modèle hydrologique distribué pouvant bénéficier des données fournies par la télédétection et les systèmes d'information géographique pour simuler plusieurs processus hydrologiques : précipitation, infiltration, évapotranspiration, ruissellement de surface, écoulement en rivière, etc. Il tient compte de la variabilité spatiale des données d'entrée météorologiques, de l'occupation du sol, du type de sol, etc. La structure spatiale des écoulements est basée sur des mailles provenant d'un modèle numérique de terrain et est intégrée dans des unités spatiales appelées unités hydrologiques relativement homogènes (UHRH). Ce modèle ne permet pas de simuler le fonctionnement d'une rizière différemment de celui des autres terres agricoles, à savoir de faire une différence entre les terres agricoles inondées et celles non inondées. Le modèle HYDROTEL a déjà été appliqué dans le cadre de plusieurs projets et cela dans différents pays : Canada, France, Espagne, Cote d'Ivoire et États-Unis. Son application au Vietnam est en cours de mise en place dans le cadre du projet de GIRE du bassin versant de la rivière Cau.

La plupart des modèles hydrologiques de gestion intégrée par bassin versant ne permettent pas de faire une distinction entre les surfaces agricoles inondées et celles non inondées. Or cette distinction est nécessaire pour simuler de manière réaliste le fonctionnement hydrologique d'une rizière. Un modèle permettant de simuler l'impact hydrologique des rizières sur un bassin versant doit par ailleurs tenir compte de toutes les caractéristiques d'une rizière, tout en procédant aux simplifications jugées nécessaires pour les simulations à l'échelle d'un bassin versant. Il est ainsi important de déterminer les variables caractéristiques d'une rizière et les modèles de simulation dont on pourrait s'inspirer pour développer un modèle de rizières dans le cadre de cette thèse.

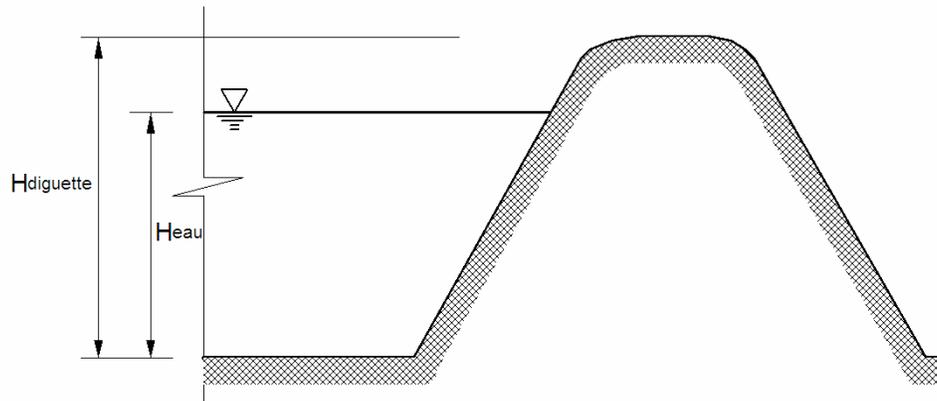
2.3 Modèles de simulation des rizières

2.3.1 Quelques définitions de base

Une rizière (figure 2.1) est généralement définie comme un ensemble de parcelles réservées à la culture du riz dans laquelle on inonde la culture (www.wikipedia.org). Elle est généralement subdivisée en compartiments par des diguettes (figure 2.2). Chacune des parcelles est encore appelée casier rizicole. Les diguettes, parfois appelées billons, ados ou levées, sont de petits bourrelets de terre qui servent à délimiter les parcelles et surtout à retenir l'eau provenant de l'irrigation ou de la pluie dans les casiers rizicoles (figure 2.1). Les diguettes peuvent être permanentes ou provisoires et leur hauteur, généralement de l'ordre de 30 cm à 60 cm, est telle que ces diguettes permettent de maintenir un niveau d'eau suffisant dans les casiers rizicoles pour répondre aux besoins en eau des plantes. Le niveau d'eau dans la rizière dépend en général des besoins en eau des plantes à différentes périodes de leur cycle de croissance. En temps de pluie, ces diguettes permettent d'effectuer une ouverture dans les parcelles pour drainer les eaux par gravité, lorsque cela est possible, pour éviter la submersion des cultures.



**Figure 2.1 : Photo de parcelles ou casiers rizicoles délimités par des diguettes
(Source : Dang, 2010)**



H_{diguette} = hauteur de la diguette; H_{eau} = niveau d'eau dans la rizière ou dans une parcelle.

Figure 2.2 : Illustration d'une diguette avec le niveau d'eau dans le casier

2.3.2 Modèles de rizières

Différents travaux ont permis de modéliser les rizières pour différents objectifs, par exemple la gestion de l'irrigation, et en tenant compte des données disponibles. Tous ces travaux ont utilisé différentes méthodes. Cependant, ces méthodes se basent toutes sur un même concept : le principe de la conservation de la masse, qui peut être appliqué à l'échelle d'une rizière ou d'un casier rizicole (ou parcelle). Pour déterminer la variation du niveau d'eau dans une rizière pendant la saison de culture du riz, un modèle a été développé par Khepar *et coll.* (2000). Ce modèle considère la rizière comme un réservoir auquel est appliqué le principe de conservation de la masse (figure 2.3). Leur modèle tient compte de la mise en eau des parcelles par irrigation (période de déficit pluviométrique) ou par précipitation. Le bilan de masse a permis aux auteurs de déterminer la profondeur d'eau au jour j à partir de l'équation suivante, appliquée à une parcelle de rizière délimitée par des diguettes :

$$HP_j = HP_{j-1} + RF_j + IR_j - ET_j - DP_j - RO_j \quad (\text{Éq. 2.1})$$

Avec HP_j : profondeur de l'eau au jour j , HP_{j-1} : profondeur de l'eau au jour $j-1$, RF_j : précipitation, IR_j : irrigation (en hauteur d'eau) du jour j , ET_j : évapotranspiration du jour j , DP_j : infiltration au jour j et RO_j : ruissellement de surface en sortie de la parcelle du jour j .

Pour un terrain comme celui de cette étude, les apports latéraux d'eau provenant des parcelles voisines sont considérés comme négligeables en raison de la topographie des parcelles (qui sont sans relief) et du fait que les niveaux d'eau dans les parcelles avoisinantes sont similaires.

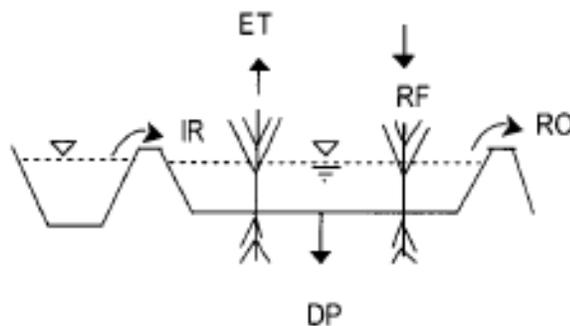


Figure 2.3 : Illustration des variables du bilan d'eau dans une parcelle
(Source : Khepar *et coll.*, 2000)

Azamathulla *et coll.* (2008) ont proposé un modèle destiné à calculer les besoins des plantes pour un objectif de gestion optimale de l'irrigation des cultures de riz à partir d'un lac. Ce modèle permet de déterminer la quantité d'eau à apporter pour amener le sol d'une teneur en eau initiale vers une teneur en eau finale, la teneur en eau finale étant fonction du stade de croissance des plantes ou de la profondeur des racines. Ce modèle est aussi basé sur le principe de conservation de la masse, appliqué au bassin de culture considéré comme un réservoir. Il est basé sur l'équation suivante, permettant de déterminer la teneur en eau à différents pas de temps :

$$\theta_i^{k+1} ED_i^{k+1} - \theta_i^k ED_i^k - IRR_i^k + AET_i^k = RF^k \quad (\text{Éq. 2.2})$$

Avec i : type de culture, k : stades ou périodes de croissance des plantes, θ_i^{k+1} , θ_i^k : teneurs en eau finale et initiale du sol aux périodes $k+1$ et k , ED_i^{k+1} , ED_i^k : profondeurs de la zone de racines dans les périodes $k+1$ et k , IRR_i^k : irrigation à la période k , AET_i^k : évapotranspiration des plantes dans la période k et RF^k : précipitation dans la période k .

Selon ces auteurs, le modèle reste applicable à un bassin de cultures mixtes et non seulement à un bassin de cultures monospécifiques.

Dans une étude sur le calcul de la quantité d'eau nécessaire à l'irrigation dans un champ rizicole, Somura *et coll.* (2008) ont développé un modèle. Ce modèle considère la rizière comme un réservoir auquel ils appliquent le bilan de masse. Pour la résolution des équations du modèle, la rizière a été discrétisée en cellules considérées comme des unités spatiales de calcul (figure 2.4). Dans le bilan de masse, les apports en eau et les pertes sont déterminés à chaque pas de temps pour déterminer les volumes d'eau nécessaires à apporter par irrigation aux plantes dans chaque cellule au pas de temps suivant. Le volume d'eau dans chaque cellule est

exprimé par l'équation suivante :

$$WS_{i,j}^n = WS_{i,j}^{n-1} + Rain_{i,j}^n + HSW_{i,j}^n - (Wloss_{i,j}^n + (\alpha PET_{i,j}^n M_{day})) \quad (\text{Éq. 2.3})$$

Avec (i,j) : couple de numéros d'identification spatiale des cellules, WS^n , WS^{n-1} : volumes d'eau dans une cellule respectivement aux pas de temps n et $n-1$, $Rain^n$: apports par précipitations dans une cellule au pas de temps n , HSW^n : apport par irrigation au pas de temps n , $Wloss^n$: pertes par infiltration, $PET^n M_{day}$: pertes par évapotranspiration au pas de temps n , α : coefficient de l'évapotranspiration potentielle.

Ce modèle d'estimation de la quantité d'eau nécessaire à l'irrigation des rizières a été calé et validé à partir de données réelles sur la consommation des plantes.

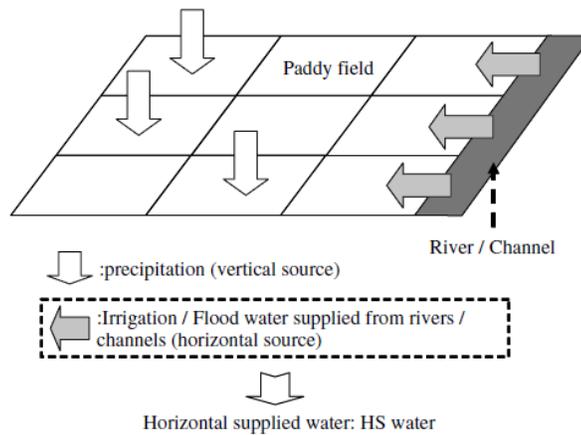


Figure 2.4 : Illustration des cellules dans le champ rizicole

(Source : Somura et coll., 2008).

Someth et coll. (2009) ont aussi proposé un modèle de rizière dans les plaines d'irrigation en utilisant le même principe de bilan de masse appliqué à une rizière considérée comme un réservoir. Le bilan d'eau dans le bassin a été exprimé sous la forme de variations de l'emmagasinement selon l'équation suivante :

$$\Delta W = (P + IR + S_{in} + R_{in}) - (ET_c + I + S_{out} + R_{out}) \quad (\text{Éq. 2.4})$$

Avec ΔW : variation de l'emmagasinement dans la rizière, P : apport par précipitation, IR : apport par irrigation, S_{in} : apport provenant de la remontée de la nappe, R_{in} : apport provenant de l'écoulement de surface, ET_c : pertes par évapotranspiration, I : pertes par infiltration, S_{out} :

perles latérales, et R_{out} : écoulement de surface en sortie de la rizière. L'évapotranspiration des plantes a été déterminée à partir de l'équation suivante :

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (\text{Éq. 2.5})$$

Avec, ET_c : évapotranspiration, K_c : coefficient des cultures et ET_0 : évapotranspiration de référence.

Dans de récents travaux effectués en 2008 (Gupta *et coll.*, 2008; Masumoto *et coll.*, 2008; Pham *et coll.*, 2008; Sato *et coll.*, 2008), le même principe de conservation de la masse a été utilisé pour déterminer l'apport par irrigation dans les rizières ou dans un bassin agricole donné à partir de la profondeur initiale en eau dans les parcelles ou de la teneur initiale en eau du sol à un pas de temps donné. Aucune différence fondamentale n'existe entre ces différents modèles d'un point de vue conceptuel. Le concept utilisé reste celui de la conservation de la masse. Ces travaux ne diffèrent finalement les uns des autres que par les objectifs spécifiques d'élaboration des modèles, les équations qui gouvernent les modèles, les méthodes de discrétisation de l'espace et du temps pour la résolution des équations, etc.

2.4 Estimation des pertes d'eau dans une rizière

2.4.1 Calcul de l'évapotranspiration pour les surfaces rizicoles

L'évapotranspiration se définit comme étant la réponse de la végétation aux conditions climatiques naturelles en relation avec les propriétés physiologiques de la plante et ses ressources en eau. Dans la réalité, la détermination de l'évapotranspiration réelle de la plante est nécessaire, car il s'agit d'une importante source de pertes en eau. Cependant, sa mesure en champ demeure assez difficile compte tenu des conditions de mise en œuvre des essais. Il est important de disposer d'ordres de grandeur de cette variable pour des comparaisons lors de simulations hydrologiques. Peu de données existent dans la littérature sur des valeurs mesurées.

L'étude de Doan *et coll.* (2008), portant sur la mesure de l'évapotranspiration en champ à partir de la méthode du lysimètre au nord du Vietnam pour 16 rizières pendant deux ans (2008 et 2009), a permis de déterminer la quantité d'eau perdue par évapotranspiration. Celle-ci est fonction de la saison et des conditions météorologiques (vitesse du vent, température, etc.). Au Nord du Vietnam, il existe deux grandes rotations pour la culture du riz qui correspondent aux

deux saisons (saison sèche et saison des pluies). En saison sèche, elle varie de 303 mm/rotation à 709 mm/rotation. En saison des pluies, l'évapotranspiration varie entre 321 mm/rotation à 645 mm/rotation. Ces valeurs sont intéressantes en ce sens qu'elles ont été mesurées dans la même zone géographique que celle de notre étude. La plupart des études se sont basées sur d'autres méthodes d'estimation de l'évapotranspiration, qui sont plutôt des méthodes théoriques.

Ainsi, il existe aujourd'hui dans le monde plusieurs modèles qui ont permis d'estimer l'évapotranspiration réelle des cultures. On peut citer à titre d'exemple les modèles HYDROTEL (Fortin *et coll.*, 2004), CROPWAT (Allen *et coll.*, 1998), SHE (Abbott *et coll.*, 1986), SWAT (Singh *et coll.*, 2006; Immerzeel *et coll.*, 2007). En général, les auteurs ont utilisé des formules comme celles de Penman (Penman, 1948; Allen *et coll.*, 1998), de Monteith (1965), de Penman-Monteith (Allen *et coll.*, 1998), de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948), de Linacre (Linacre, 1977) ou de Priestley et Penman (Priestley-Taylor, 1972). Selon Lee *et coll.* (2004), les résultats diffèrent quelque peu d'une méthode de calcul à une autre. Par ailleurs, certaines méthodes de calcul sont plus adaptées que d'autres, et cela en fonction des caractéristiques de la zone. Dans certains modèles, l'évapotranspiration réelle peut être déterminée de deux manières différentes :

(i) Méthode de l'évapotranspiration de référence

Selon Allen *et coll.* (1998) et Someth *et coll.* (2009), l'évapotranspiration des cultures peut être déterminée par l'équation suivante :

$$ET_c = K_c \times ET_o \quad (\text{Éq. 2.6})$$

Avec, ET_c : évapotranspiration des cultures (mm/jour); K_c : coefficient de culture et ET_o : évapotranspiration de référence (mm/jour).

Pour déterminer l'évapotranspiration de référence, l'étude a appliqué l'équation de Penman-Monteith avec le gazon comme condition standard.

L'évapotranspiration de référence est déterminée par la méthode de Penman-Monteith :

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \left(\frac{900}{T+273}\right)u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0,34u_2)} \quad (\text{Éq. 2.7})$$

Avec R_n : radiation nette sur la surface (MJ/m²/h), G : densité de chaleur du sol, T : température moyenne journalière à la hauteur de 2 m (°C), u_2 : vitesse du vent à la hauteur de 2 m (m/s), e_s : pression de vapeur moyenne à saturation (kPa), Δ : pente de la courbe de la pression de vapeur (kPa/°C) et γ : constante psychrométrique (kPa/°C).

Selon IRRI (2007) et Someth *et coll.* (2009), le coefficient de culture du riz dépend du stade de croissance du riz. Selon IRRI (2007), il y a trois stades de croissance : semis (40 jours), développement (35 jours) et mûrissement (30 jours), correspondant respectivement aux valeurs de 1,05; 1,20 et 0,75.

(ii) Méthode de l'évapotranspiration potentielle

Selon Abbott *et coll.* (1986), et Singh *et coll.* (2002), dans certains modèles, l'évapotranspiration est calculée à partir de l'évapotranspiration potentielle. Dans ce cas, l'évapotranspiration réelle est déterminée à partir de l'évapotranspiration potentielle. Différentes manières existent pour estimer l'évapotranspiration potentielle. Celle de Thornthwaite peut être mentionnée à titre d'exemple :

$$E = \frac{16,2}{30,4} L_j \left(\frac{10T}{I} \right)^A \quad (\text{Éq. 2.8})$$

Avec E : évapotranspiration potentielle de Thornthwaite (mm/j), L_j : coefficient d'ajustement tenant compte de la longueur du jour et de la latitude, T : température moyenne journalière de l'air sur l'UHRH (°C), I : indice thermique de Thornthwaite et A : exposant déterminé à partir de l'indice thermique I .

2.4.2 Calcul de l'infiltration pour les surfaces rizicoles

Étant donné qu'il s'agit de casiers remplis d'eau pendant une grande partie de la rotation, l'infiltration au fond des rizières représente également une autre source importante de pertes. Il est alors important de répertorier des études portant sur l'évaluation quantitative de ce processus. En général, dans la littérature, il existe deux familles de modèles pour calculer l'infiltration : (i) les modèles empiriques comme ceux de Kustiakov (1932), de Horton (1933), de Holton (1961) et (ii) les modèles à base physique comme ceux de Richards (1931), de Philip (1957), de Smith et Parlange (1978). Nous avons considéré que le modèle de Richards, qui est basé sur la loi de Darcy, est le plus à même de décrire le processus d'infiltration.

2.4.2.1 Méthode basée sur relations empiriques

Les travaux de Kukal et Aggarwal (2003) ont montré que l'infiltration au fond d'une rizière est influencée par le labour du sol, car celui-ci peut faire baisser ou augmenter l'infiltration (Sharma et De Datta, 1985). L'amplitude de la diminution ou de l'augmentation dépend de l'intensité du labour (Aggarwal *et coll.*, 1995), de la profondeur de labour (Sharma et Bhagat, 1993), du temps après labour, du type de sol et de la hauteur d'eau dans la rizière (Tabbal *et coll.*, 1992). Someth *et coll.* (2009) ont déterminé la quantité d'eau perdue par infiltration dans une rizière par une méthode empirique dans la période de saison sèche dans la région de delta du Mékong. Les résultats ont permis de trouver que la quantité d'eau perdue par infiltration varie entre 1 et 2,3 mm/jour avec une valeur moyenne de 1,9 mm/jour. Horton (1933) et Réméniéras (1999) ont montré que la capacité d'infiltration normale d'un sol pouvait être représentée par une équation de la forme :

$$i(t) = i_f + (i_o - i_f)e^{-\gamma t} \quad (\text{Éq. 2.9})$$

Avec $i(t)$: capacité d'infiltration au temps t (mm/h), i_o : capacité d'infiltration initiale (mm/h); i_f : capacité d'infiltration finale (mm/h), t : temps depuis le début de l'averse (h) et γ : constante empirique (h^{-1}).

Selon Chen *et coll.* (2001), la perte par infiltration peut être quantifiée par une méthode nommée Chen/Lee. Dans cette méthode, les équations sont de type empirique, par exemple pour un type de sol donné, on a :

$$\begin{cases} M_e = 0,021S_a + 0,151S_i + 0,592S_c \\ \text{Log}_{10}P = 1,5087 - 0,0411M_e \end{cases} \quad (\text{Éq. 2.10})$$

Avec S_a , S_i et S_c : pourcentages de sable, silt et argile, M_e : variable décrivant le sol et P : taux d'infiltration dans la rizière.

2.4.2.2 Approche à base physique

En général, la quantité d'eau infiltrée est fonction de la teneur en eau initiale du sol, du type de sol et de la conductivité hydraulique à saturation du sol. Fortin *et coll.* (1995) et Ricard (2008) ont montré que le statut du sol est déterminé par la teneur en eau spécifique : (i) à saturation pour un sol saturé en eau (ii) à la capacité au champ, correspondant à la teneur en eau résiduelle, et (iii) au point de flétrissement, correspondant à l'écoulement capillaire.

Dans le cas de l'infiltration en milieu saturé, la capacité dépend des propriétés du milieu poreux et de celles du fluide (Fortin *et coll.*, 1995). Le processus d'infiltration est modélisé par la loi de Darcy :

$$q = -KA \frac{\Delta h}{L} \quad (\text{Éq. 2.11})$$

Avec q : débit volumique d'infiltration (m^3/h), K : conductivité hydraulique (m/h), A : superficie de la section au travers de laquelle s'écoule le fluide (m^2), et Δh : différence de hauteur piézométrique observée entre deux points espacés par la distance L (m).

La conductivité hydraulique dans chaque type de sol peut être déterminée par les travaux de Rawls et Brakensiek (1989).

Dans le cas de l'infiltration en milieu non saturé, selon Fortin *et coll.* (2005) et Ricard (2008), le processus d'écoulement du fluide dans le milieu poreux est exprimé par l'équation suivante :

$$\vec{q} = -K_{\theta} \vec{\nabla}(\psi_{\theta} + z) \quad (\text{Éq. 2.12})$$

Avec q : débit d'écoulement souterrain, K_{θ} : conductivité hydraulique du milieu non saturé et $\vec{\nabla}(\psi_{\theta} + z)$: gradients du potentiel matriciel et gravitaire.

Dans cette équation, la conductivité hydraulique dépend de la teneur en eau (Campbell, 1974) et le potentiel matriciel en milieu non saturé dépend de la teneur en eau. Ce paramètre est déterminé par le modèle capillaire de Brooks et Corey (1964) ainsi que celui de Clapp et Homberger (1978).

Tuong *et coll.* (1994) et Singh *et coll.* (2002) ont utilisé le modèle SAWAH (Berge *et coll.*, 1992), basé sur la loi Darcy, pour décrire le processus d'infiltration au fond d'une rizière. Selon Tuong *et coll.* (1994), la pression de la colonne d'eau tient compte de la couche de labour, sachant que la profondeur d'influence de cette couche de labour peut atteindre 20 cm. Selon Singh *et coll.* (2006), l'intensité du labour influence l'augmentation de la profondeur de la couche de labour et la diminution de la conductivité hydraulique du sol.

Chen *et al.* (2001, 2002) ont utilisé le modèle SAWAH (Berge *et coll.*, 1992) pour simuler l'infiltration dans la rizière. Leurs résultats montrent également que le processus d'infiltration dépend de la couche de labour puisqu'il y a une influence sur la pression de la colonne d'eau. Selon Manon et Bernd (2007, 2009) le processus d'infiltration sur la rizière peut être considéré comme similaire à celui ayant lieu au fond d'un lac. Ces auteurs ont utilisé la loi de Darcy pour

simuler l'infiltration. Les résultats ont montré que l'âge des rizières (trois ans pour les plus jeunes rizières et cent ans pour les plus âgées) est une variable d'influence puisque le poids spécifique du sol varie en fonction de l'âge de la rizière.

Dans les modèles SHE (Abbot *et coll.*, 1986) et HYDROTEL (Fortin et Royer, 2004), le processus d'infiltration est considéré dans chaque couche de sol à partir de la teneur en eau initiale du sol. Dans les deux modèles, le processus d'infiltration dépend également du type de sol. Dans le sous-modèle d'HYDROTEL qui intègre le processus d'infiltration, la capacité d'infiltration est déterminée par le taux d'infiltration maximal, qui correspond à la conductivité hydraulique à saturation de la première couche du sol (Fortin *et coll.*, 1995).

2.5 Modèles de simulation de l'irrigation

2.5.1 Quelques définitions de base

Un canal est une voie d'eau artificielle permettant la circulation de l'eau. Un canal d'irrigation (figure 2.5) peut être assimilé à une rivière canalisée. Une des différences importantes entre un canal d'irrigation et une rivière est l'augmentation du débit de l'amont vers l'aval dans le cas d'une rivière, du fait des apports naturels des affluents, alors que le canal d'irrigation a un débit et une section transversale qui diminuent de l'amont vers l'aval, du fait des prélèvements des divers usagers. Le canal d'irrigation a pour but de détourner une partie de l'eau d'une rivière de son cours normal ou d'un lac pour divers besoins : irrigation de parcelles de cultures, alimentation en eau potable, etc.



Figure 2.5 : Photo d'un canal d'irrigation

(Source : Henk et coll., 2005)

2.5.2 Modèles à base physique

Ces modèles sont basés sur les connaissances et les lois qui gouvernent le fonctionnement physique des écoulements en canaux. À partir de la littérature, on peut classer ces modèles en deux grandes familles suivant le principe physique qui est à la base du modèle : (i) le principe des réservoirs et (ii) celui de l'écoulement en rivière, qui domine largement la littérature.

Mise en série de réservoirs ou de lacs

Ratinho et coll. (2002) et Lozano et coll. (2008) ont proposé un modèle de simulation d'écoulement en canaux sur la base du principe de l'écoulement en réservoirs (figure 2.6). Chaque canal est assimilé à une série de réservoirs, le réservoir en amont se déversant dans celui en aval. Chaque réservoir est régi par le principe de conservation de la masse, auquel on ajoute une équation permettant d'exprimer le changement de la profondeur d'eau dans un réservoir de la manière suivante :

$$\frac{d}{dt} H = \frac{1}{A_{Sup}} \Delta Q \quad (\text{Éq. 2.13})$$

Avec H : hauteur d'eau dans le réservoir, A_{Sup} : surface mouillée dans le réservoir et ΔQ : variation du débit.

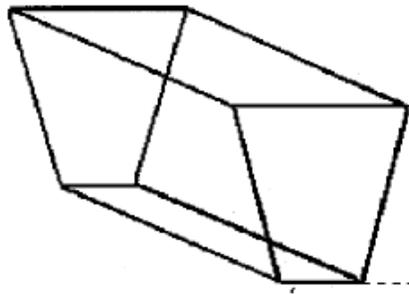


Figure 2.6 : Représentation schématique d'un bief de canal sous forme de réservoir

(Source : Rotinho *et coll.*, 2002)

Bautista *et coll.* (2005) ont également utilisé le même principe de mise en série de réservoirs pour modéliser un canal. Sur la base du même principe et bien avant plusieurs autres auteurs, Vyas et Sarma (1992) avaient déjà proposé un modèle d'écoulement en canal nommé Integrated Reservoir-based Canal Irrigation Model (IRCIM). La différence avec les autres est la méthode de discrétisation en segments adoptée par ces auteurs pour résoudre les équations qui gouvernent leur modèle (conservation de la masse, relation entre le débit et la profondeur d'eau).

Mise en série de tronçons de rivières

Pour modéliser un canal d'irrigation, la plupart des auteurs considèrent un canal comme une série de tronçons de rivières, avec des caractéristiques géométriques connues. À chaque tronçon sont appliqués les principes de conservation de la masse et de la quantité de mouvement traduits par les équations connues sous le nom d'équations de Saint-Venant. Dans leurs travaux de modélisation d'un système d'irrigation comportant des rivières et des canaux, Litrico *et coll.* (2000) ont élaboré un modèle basé sur le principe largement utilisé de mise en série de tronçons de rivières. Pour résoudre les équations de Saint-Venant, qui gouvernent l'écoulement dans leur modèle, chaque canal a été discrétisé en biefs (figure 2.7). Sur chaque bief, un régime d'écoulement est considéré et les conditions aux limites de chacun des biefs correspondent aux lois qui régissent les ouvrages de régulation.

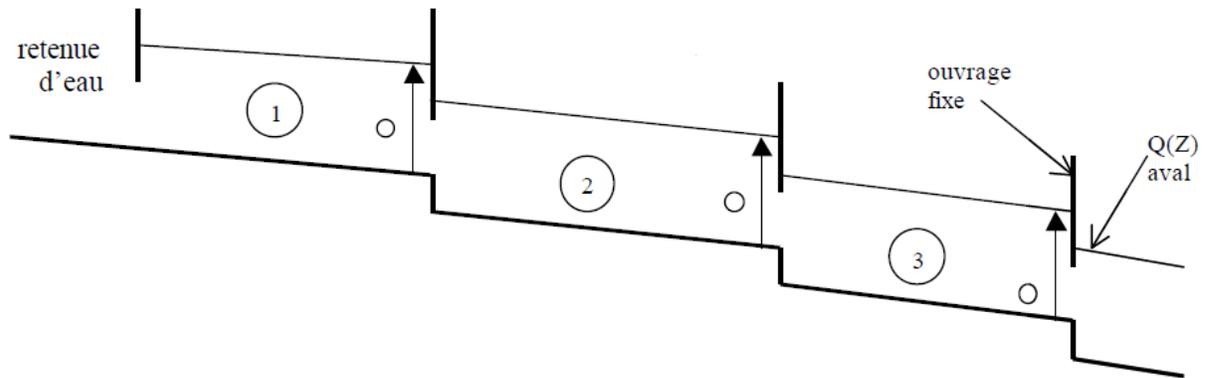


Figure 2.7 : Un canal comme mise en série de biefs

(Source : Litrico *et coll.*, 2000)

$Q(z)$: débit en aval.

Comme Litrico *et coll.* (2000), Mishra *et coll.* (2001) ont proposé un modèle similaire à la mise en série de tronçons de rivière, destiné à l'exploitation et à la gestion d'un système de canaux d'irrigation. Le canal est discrétisé en tronçons, chaque tronçon étant limité par deux nœuds, auxquels ils appliquent les principes de conservation de la masse et de la quantité de mouvement, traduits par les équations de Saint-Venant :

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (\text{Éq. 2.14})$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2AR} = 0 \quad (\text{Éq. 2.15})$$

Avec Q : débit, A : surface mouillée, q : débit latéral, h : profondeur d'eau, C : coefficient de Chezy, R : rayon hydraulique, g : 9,81 m/s², x : longueur du tronçon et t : temps.

Huang *et coll.* (2003) ont proposé un modèle nommé WaterCAD applicable à un réseau de canaux à pentes variables (figure 2.8). Chaque canal est subdivisé en tronçons et un régime d'écoulement peut être appliqué (permanent uniforme, permanent graduellement varié, etc.) en fonction de la pente du tronçon. Les équations qui régissent ce modèle découlent des principes de conservation de la masse et de la quantité de mouvement.

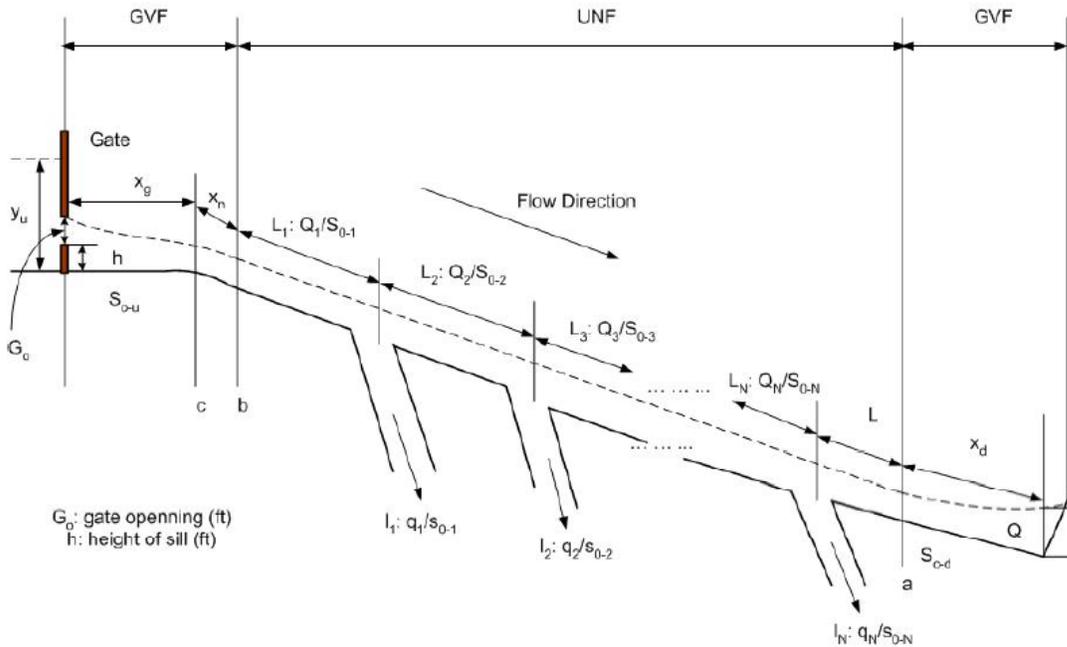


Figure 2.8 : Schéma simplifié d'un tronçon de canal à pentes variables
 (Source : Huang *et coll.*, 2003)

Au Vietnam, Wassmann *et coll.* (2002) et Hoanh *et coll.* (2009) ont proposé un modèle nommé Vietnam River System And Plains (VRSAP) pour simuler l'écoulement dans les rivières et les canaux d'irrigation. Chaque canal est divisé en segments ou tronçons limités par deux nœuds. Le résultat de la résolution des équations qui gouvernent leur modèle est une série de niveaux d'eau aux nœuds et de débits dans chaque segment à différents pas de temps. Le même principe de mise en série de tronçons de rivières pour modéliser un canal d'irrigation est utilisé par d'autres auteurs. Il s'agit entre autres des modèles de Swain et Chin (1990), CANALMODE de Steven (1996), de Tahir (1988), de Thomassin *et coll.* (2006), de Mazhar (2005), CANALMAN de Ghumman *et coll.* (2006) et d'Islam *et coll.* (2008).

2.5.3 Modèles conceptuels

Ces modèles, en faible minorité dans la littérature, sont basés sur des concepts proches du fonctionnement de l'écoulement en canaux. Par exemple, Gopakumar et Mujumdar (2008) ont développé un modèle semi-conceptuel en combinant le principe de conservation de la masse à des équations qui découlent de la logique floue. Ces équations provenant des règles de la logique floue remplacent le principe de conservation de la quantité de mouvement utilisé par les auteurs qui ont élaboré les modèles à base physique. Ces modèles à base de la logique floue ne présentent pas encore un grand intérêt (Malaterre, 2008). Un autre modèle conceptuel est celui de Hayami (Malaterre, 2008). Il s'agit de fonctions génériques permettant de représenter l'écoulement dans les canaux qui peuvent être appliquées à un canal discrétisé en série de tronçons pour calculer les débits et les hauteurs d'eau aux nœuds qui limitent le tronçon. D'autres modèles basés sur une approche de type « réseau de neurones » ont également été proposés dans la littérature pour la prévision des débits et des hauteurs d'eau dans les tronçons d'un canal (p. ex. Vazquez *et coll.*, 1999). Ces modèles assimilent le fonctionnement d'un réseau de canaux d'irrigation à celui d'un réseau de neurones.

2.6 Synthèse

La modélisation d'une rizière (figure 2.9) peut être résumée par le principe de la conservation de la masse appliqué à une parcelle ou au bassin de culture considéré comme un réservoir ou un petit lac, qui se remplit et se vide en fonction des besoins des plantes. Dans le réservoir considéré comme système, les apports sont l'irrigation (Irr), les précipitations (P), le ruissellement de surface en entrée (Re) et les apports latéraux par les parcelles voisines ($Ap.e_{latéral}$), tandis que les pertes sont l'évapotranspiration (ET), l'infiltration (Inf), les pertes latérales vers les parcelles voisines ($Ap.s_{latéral}$) et le ruissellement de sortie (Rs).

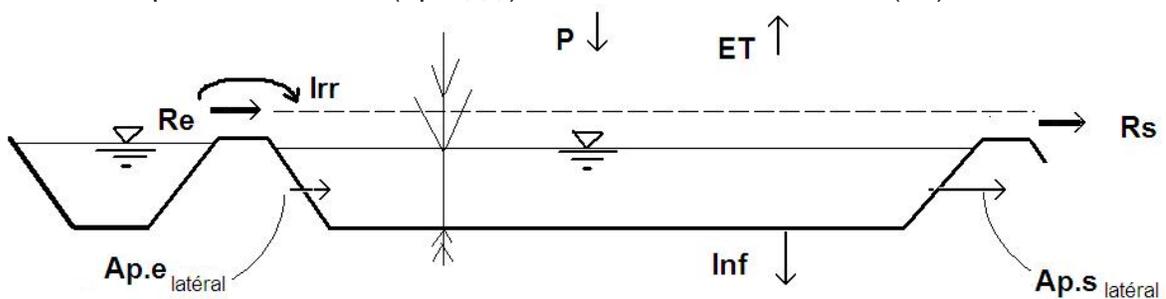


Figure 2.9 : Illustration des paramètres du bilan de masse dans une rizière

La variation de l'emmagasinement ΔV se traduit par :

$$\Delta V = (P + Irr + Re + Ap \cdot e_{latéral}) - (Inf + ET + Rs + Ap \cdot s_{latéral}) \text{ (Éq. 2.16)}$$

En ce qui concerne l'irrigation, il existe deux principales familles de modèles pour modéliser les canaux d'irrigation : les modèles à base physique et les modèles conceptuels. Les modèles à base physique sont largement représentés dans la littérature. Ils sont basés sur les principes de l'écoulement dans un réservoir ou dans une rivière. Un tronçon de canal est considéré comme une série de biefs. Chaque bief est ensuite modélisé comme une rivière ou un réservoir auquel sont appliqués les principes de conservation de la masse et de la quantité de mouvement. Cependant, une autre méthode de modélisation de l'irrigation des rizières, qui sera proposée dans cette thèse, est celle d'un "principe de couches", qui est inexistante dans la littérature scientifique à l'heure actuelle. Ce principe permet de faire abstraction des canaux d'irrigation, en transférant l'eau du lac (couche lac) vers les rizières (couche rizière) et en effectuant le bilan de masse à l'échelle du bassin versant. Un tel modèle est une approche innovante en ce sens qu'il fait abstraction des canaux réels existants dans le bassin versant et qu'il permet donc de s'affranchir d'une série d'équations à résoudre. Les détails seront présentés dans les sections suivantes.

3. Étude de cas du bassin versant de la rivière Cong

3.1 Introduction

La zone qui représente l'étude de cas dans le cadre de la présente recherche est un sous-bassin versant du bassin versant de la rivière Cau situé au nord du Vietnam (figure 3.1). Il s'agit du bassin versant de la rivière Cong, qui s'étend de 21°20' à 21°46' de latitude Nord et de 105°30' à 105°53' de longitude Est (figure 3.1). Le bassin versant de la rivière Cau représente le bassin d'application pour les études en cours dans le cadre du projet « Gestion intégrée du bassin versant de la rivière Cau au Vietnam », projet mis en place dans le cadre d'un partenariat entre l'INRS (Québec) et l'ASTV (Vietnam). Un des principaux cours d'eau qui drainent les eaux de ce bassin d'étude est la rivière Cong. Un lac appelé le lac Nuicoc se trouve sur cette rivière et subdivise ainsi le bassin de la rivière Cong en deux sous-bassins : la partie amont et la partie aval. Le bassin de la rivière Cong comporte une forte concentration de parcelles rizicoles, un lac et un système de canaux d'irrigation permettant d'irriguer les rizières pendant la saison sèche. Le bassin de la rivière Cong a une superficie de 905 km². Il se trouve dans l'une des sept provinces du grand bassin versant de la rivière Cau, la province de Thai Nguyen. Dans ce chapitre, les caractéristiques naturelles du bassin versant de la rivière Cong seront présentées, ainsi que les caractéristiques des rizières et du réseau de canaux d'irrigation.

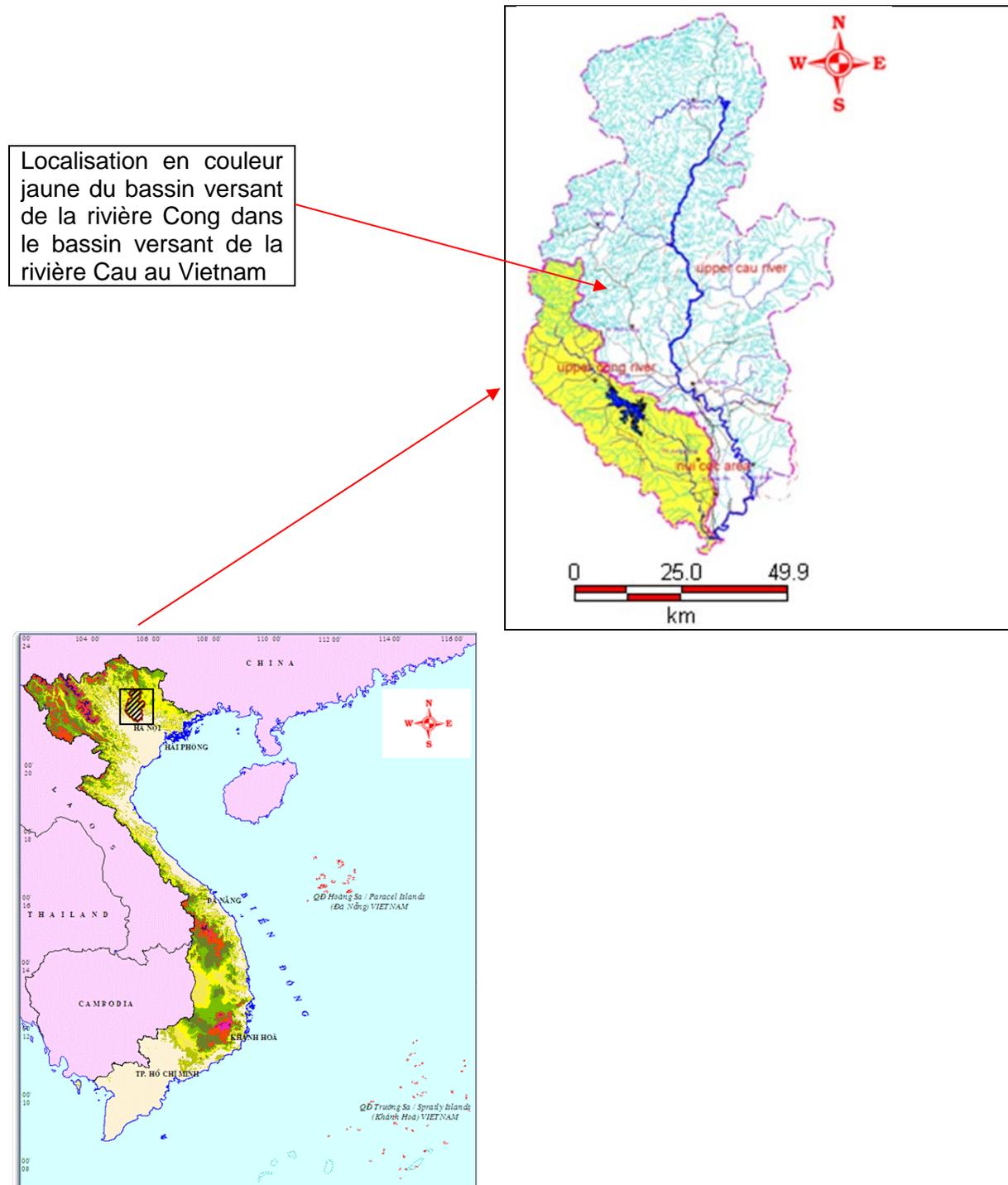


Figure 3.1 : Localisation des bassins versants des rivières Cau et Cong au Vietnam

3.2 Caractéristiques naturelles

3.2.1 Topographie

Le bassin versant de la rivière Cong a une topographie moins complexe que celle des autres sous-bassins versants de la rivière Cau. Ce bassin est borné à l'ouest par une zone de montagnes d'altitude moyenne (> 200 m) (figure 3.2, couleur rouge). Le reste du bassin est composé de plaines qui représentent une grande partie du relief, surtout au sud. Ces plaines sont dans leur grande majorité occupées par des rizières (rizières de plaines). Au centre du bassin, on trouve quelques plateaux et collines qui sont des terres ayant une altitude moyenne de 60 m, sur lesquelles existent également des rizières en terrasse.

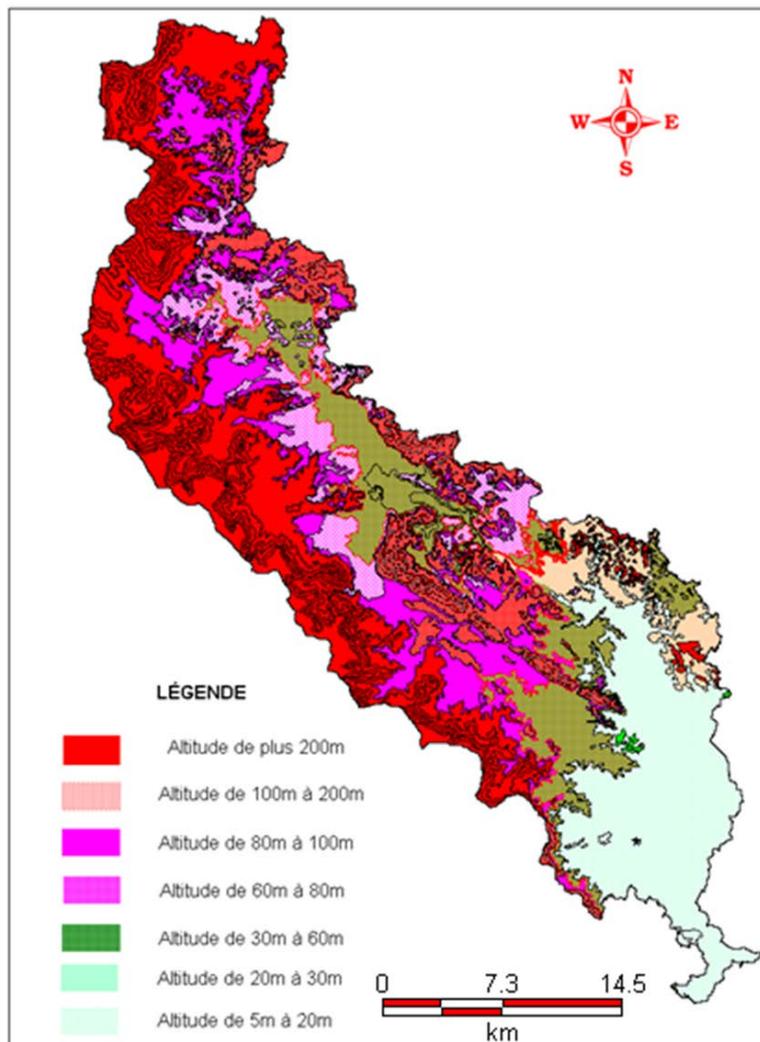


Figure 3.2 : Carte topographique du bassin versant de la rivière Cong

3.2.2 Type de sol

Les quatre principaux types de sols de ce bassin versant sont illustrés à la figure 3.3. Les sols sont dominés par le limon et l'argile. Ils sont à texture limono-sableux, limoneux, limono-argileux fins et argileux. Le limon provient des alluvions apportées par la rivière Cong et ses affluents en période de crue, la saison des pluies. Lorsqu'on s'éloigne des cours d'eau, les alluvions sont de plus en plus anciennes et les sols de plus en plus évolués. Ces alluvions contribuent à la fertilité des sols et favorisent la culture du riz. Les autres sols, de texture moins limoneuse, restent favorables pour des cultures comme le maïs, le thé, etc.

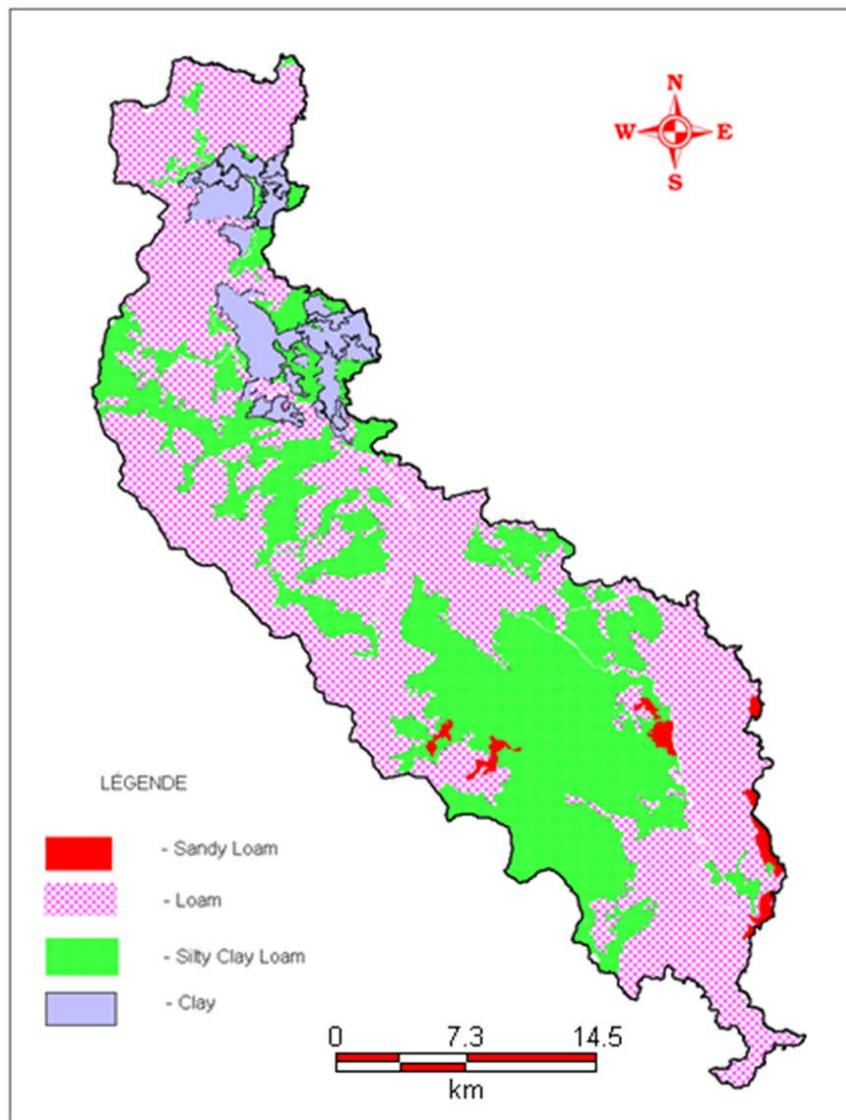


Figure 3.3 : Carte des principaux types de sols dans la zone d'étude
(Source : projet de GIEBV de la rivière Cau au Vietnam)

3.2.3 Réseau de stations météorologiques et hydrométriques

- Stations météorologiques

Dans le bassin versant, il n'existe que trois stations météorologiques, par contre on en retrouve plusieurs autres en périphérie du bassin versant. La figure 3.4 montre la répartition spatiale de ces stations.

- Stations hydrométriques

Il y a deux stations hydrométriques sur la rivière Cong : Nuihong (station amont du lac dont l'aire de drainage est 128 km²) et Tancuong (station en aval du lac avec une aire de drainage de 548 km²) (figure 3.4). Les données observées à la station Nuihong ont été mesurées pendant la période de 1958 à 1968. Les données observées à la station Tancuong ont été mesurées à partir de 1960 jusqu'en 1976.

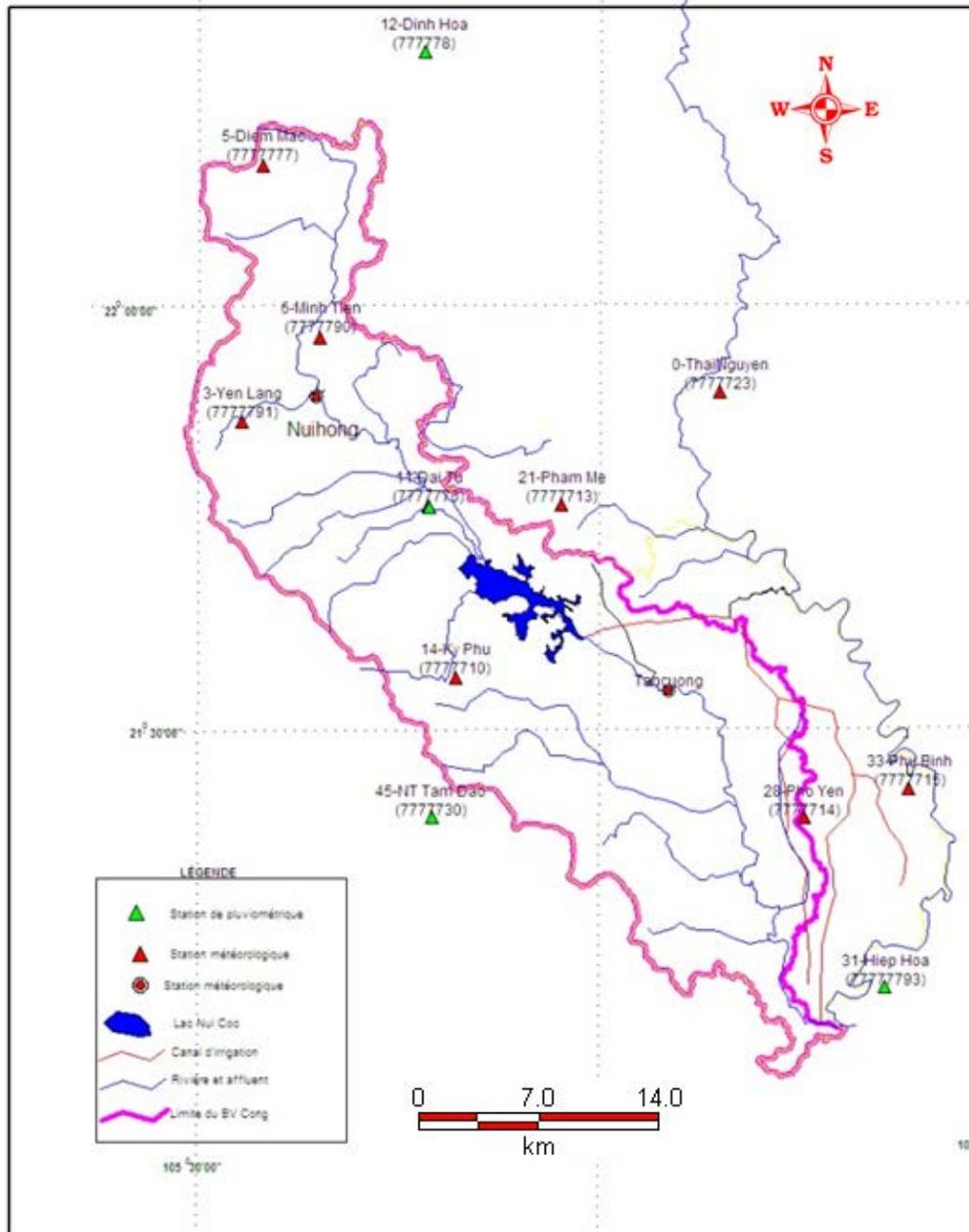


Figure 3.4 : Carte du réseau des stations météorologiques et hydrométriques

3.2.4 Climat

Le bassin versant de la rivière Cong, à cause de sa position géographique, est soumis à un climat tropical humide de mousson. Ce climat est caractérisé par deux saisons : la saison sèche (novembre à mars = hiver) et la saison des pluies (mai à septembre = été). Les mois d'avril et d'octobre sont des mois de transition entre ces deux saisons.

Précipitations

Les précipitations annuelles dans la zone d'étude varient entre 1 500 mm et 2 400 mm. Le territoire de la chaîne montagneuse qui limite le bassin ouest reçoit une grande partie des précipitations. On note une diminution des précipitations vers l'est. De 85 % à 90 %, des précipitations annuelles totales surviennent pendant la saison des pluies. Pendant cette saison, il peut y avoir de 15 à 20 jours de pluie durant certains mois.

Température

Le bassin versant de la rivière Cong est situé dans une région possédant un régime de climat tropical typique de mousson du Nord du Vietnam. Le climat est chaud et humide durant l'été et relativement froid et sec en hiver. Pendant la saison chaude, de mai à septembre, la température varie en général entre 25°C et 29°C. Le mois le plus chaud est celui de juillet, avec une température moyenne de 28°C-29°C, sauf à 900 m d'altitude où la température peut descendre à 23 °C. La température maximale peut atteindre 39-40°C et apparaît dans les mois de mai et juin. La saison froide va de novembre à mars. Pendant cette saison, la température moyenne mensuelle varie entre 15 et 20°C. Pendant les mois d'octobre et d'avril, le climat est plutôt doux.

Humidité de l'air

Dans le bassin d'étude, l'humidité de l'air reste généralement élevée, à plus de 80 %. Elle varie inégalement durant l'année et même à l'intérieur des saisons. Les mois de plus forte humidité sont mars et avril (lorsque la pluie fine commence) et août (lorsqu'apparaissent soudainement de brèves averses). Cependant, l'humidité de l'air peut descendre des fois à 70 % durant les mois de décembre et janvier.

Évaporation

L'évaporation varie en fonction des saisons. L'évaporation est plus forte durant la saison des pluies. Elle reste aussi plus élevée en amont du lac qu'en aval.

Vent

Affectée par la mousson et la topographie locale, la direction du vent dans le bassin versant change significativement selon les saisons. Durant l'hiver, les vents du Nord-Est et du Nord dominant. Durant l'été, ce sont les vents du Sud-Ouest et du Sud qui dominant. La vitesse moyenne du vent est généralement de l'ordre de 1 m/s, excepté en zone de montagne.

3.2.5 Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique de la zone d'étude est composé de la rivière Cong, de ses affluents et du lac Nuicoc, qui est un réservoir artificiel construit sur cette rivière (figure 3.5). À cause du lac artificiel, la zone d'étude est subdivisée en deux parties : la zone en amont du lac et celle en aval du lac. La rivière Cong, d'une longueur d'environ 96 km, s'écoule du Nord vers le Sud du bassin. Ce bassin couvre une superficie de 905 km² avec une altitude moyenne de 60 m par rapport au niveau de la mer.

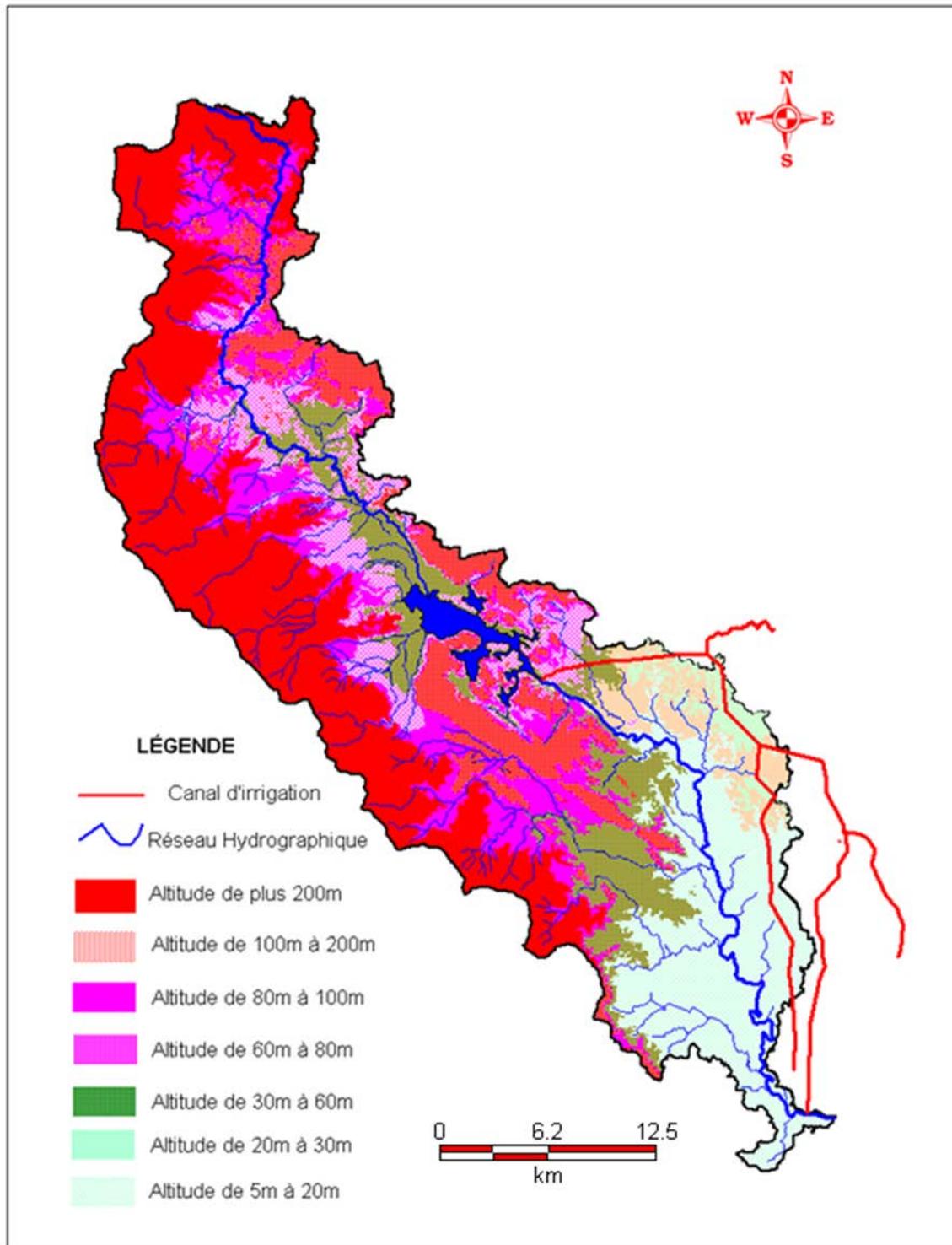


Figure 3.5 : Carte du réseau hydrographique et du réseau d'irrigation dans la zone d'étude

La pente moyenne du bassin versant est d'environ 27,3 %. Le débit d'écoulement de la rivière Cong varie non seulement en fonction des saisons, mais aussi en fonction des mois (figure 3.6). À cause de la forte pluviométrie durant la saison des pluies, environ 70 % de l'écoulement dans le bassin a lieu pendant cette saison. Le débit spécifique moyen annuel du bassin est de 28 l/s/km² (IPRE, 2004). Le réservoir artificiel de Nuicoc est situé dans la ville de Thai Nguyen, au centre du bassin versant d'étude.

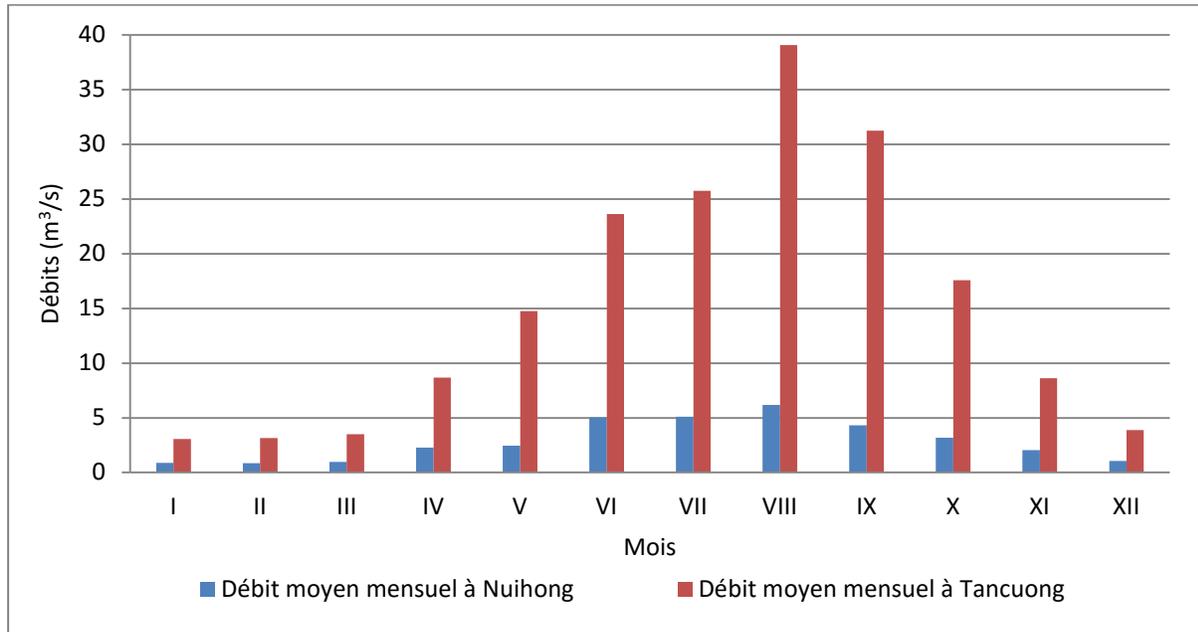


Figure 3.6 : Variation des débits moyens mensuels aux deux stations hydrologiques (de 1960 à 1976 à Tancuong et de 1958 à 1968 à Nuihong)

(Source : IPRE, 2004)

3.2.6 Occupation du sol

L'occupation des sols dans le bassin versant est dominée (52,8 % de l'aire du bassin versant) par la forêt (figure 3.7). L'agriculture occupe la deuxième place avec 30,4 % du territoire (tableau 3.1). Le reste du territoire est occupé par l'eau, les arbustes et les zones résidentielles. Le tableau 3.1 résume les différentes classes d'occupation du sol dans la zone d'étude avec les superficies et les proportions correspondantes.

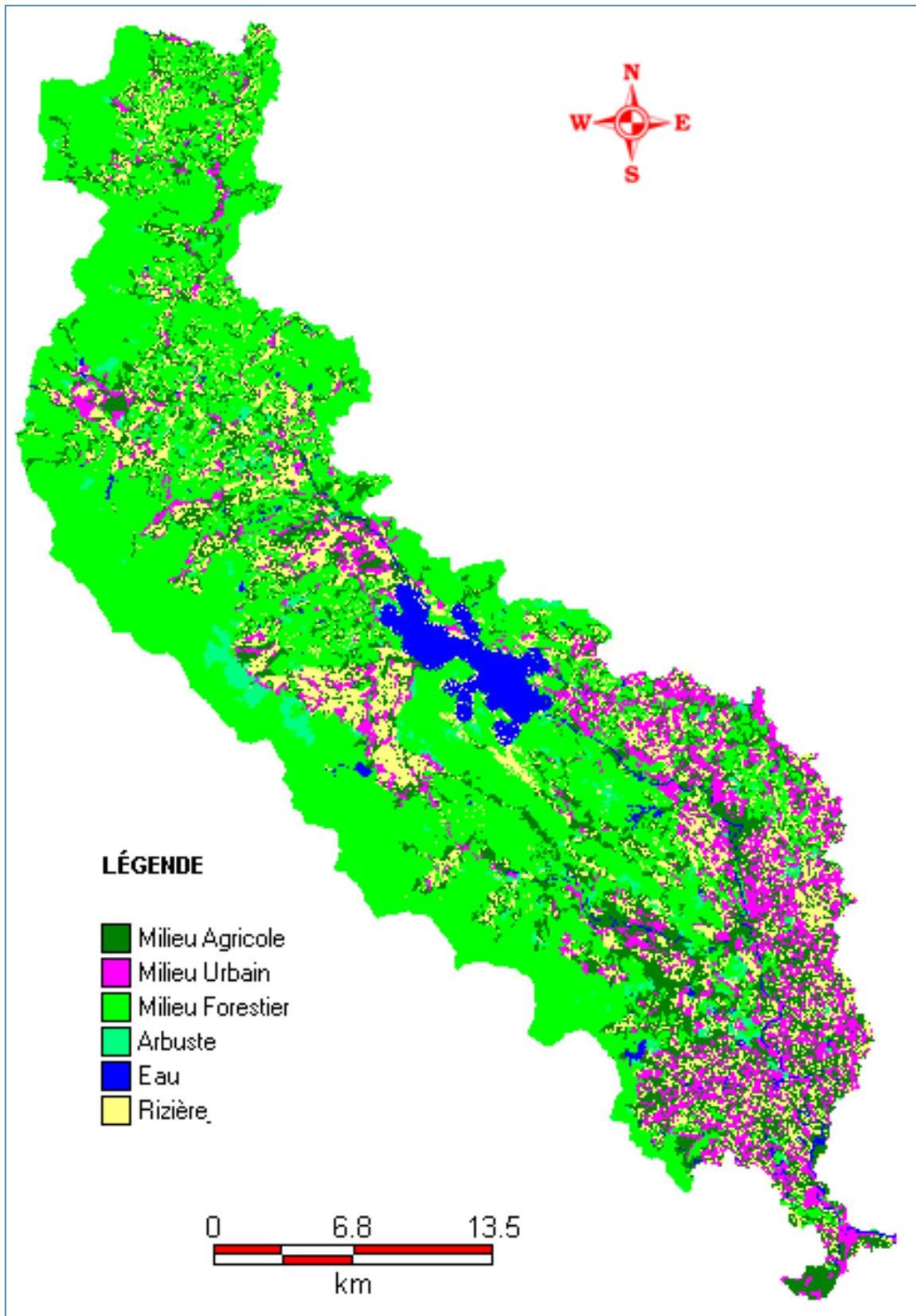


Figure 3.7 : Carte d'occupation du sol du bassin versant de la rivière Cong

Tableau 3.1 : Occupation du sol dans la zone d'étude (Source : IPRE, 2004)

Occupation du sol	Surface (ha)	Proportion de la surface totale du bassin (%)
Milieu agricole	27 500	30,39
Rizières	11 463	12,67
Autres	16 036	17,72
Milieu urbain	9 470	10,47
Milieu forestier	47 772	52,79
Arbustes	2 423	2,68
Eau	3 328	3,68
Total	90 494	100,00

3.2.7 Riziculture

Les rizières occupent la première place des cultures dans la partie agricole du bassin. Elles représentent 11 463 ha sur un total de 27 500 ha de terres agricoles, soit une occupation de plus de 41,7 % des terres agricoles (tableau 3.1). Cependant, certains facteurs comme les périodes de culture du riz, qui varient en fonction de la localisation de la rizière (amont ou aval du lac) dans le bassin, peuvent faire varier pendant l'année la surface totale occupée par les rizières dans le bassin.

Périodes de culture et stades de croissance du riz

Dans la zone d'étude, il existe deux grandes rotations pour la culture du riz, qui correspondent aux deux saisons (saison sèche, saison des pluies) caractéristiques du climat : (i) la rotation de la saison sèche, pendant laquelle les parcelles de culture de riz sont inondées par irrigation et (ii) la rotation de la saison des pluies, pendant laquelle l'apport d'eau dans les rizières provient des précipitations. Les périodes de culture du riz varient entre l'amont et l'aval du lac. La culture en amont est généralement en retard de quelques semaines par rapport à celle en aval du lac selon les règlements du gouvernement provincial. Ce décalage qui existe entre l'amont et l'aval pour la culture du riz ne modifie pas les surfaces occupées par le riz. Cependant, il existe une différence entre les parcelles du point de vue du « stade de croissance » dans lequel se trouvent les plantes dans chaque rizière, en fonction de sa localisation (en amont ou en aval du lac) de la rizière. La différence de stade de croissance devra être prise en compte dans le

modèle, en identifiant le stade de croissance des plantes dans chaque rizière dans le bassin versant.

Il est important de préciser que le développement d'une plante de riz passe généralement par trois grands stades (IRRI, 2009) : (i) la phase dite « végétative », caractérisée par le développement des feuilles et l'augmentation de la hauteur des plants (figure 3.8-c); (ii) la phase de reproduction, qui est celle de la floraison de la plante; et (iii) la phase de maturation, qui correspond au stade de maturité des graines. À la fin de cette dernière phase, le riz est récolté. La durée totale du cycle de croissance du riz dans la zone d'étude varie entre 110 et 120 jours en fonction de la saison de culture (tableau 3.2 et 3.3). Les stades du cycle de croissance diffèrent non seulement en matière de processus en jeu, mais aussi en matière de durées et des hauteurs d'eau recommandées dans les casiers rizicoles pour optimiser le rendement des parcelles. Les tableaux 3.2 et 3.3 présentent un résumé des différentes étapes du cycle de croissance de la plante en fonction de la saison de culture. Pendant ces étapes, des hauteurs optimales d'eau sont recommandées dans les casiers rizicoles pour les deux saisons de culture par les directives des gouvernements locaux (IPRE, 2004 et 2008) (tableaux 3.2 et 3.3). Ces recommandations permettent d'atteindre un rendement maximal en respectant les critères de gestion de l'eau en saison sèche et en effectuant un drainage suffisant en saison des pluies.

Tableau 3.2 : Stades de croissance du riz et étapes de préparation des parcelles rizicoles en amont du lac (Source : IPRE, 2008)

Phases de croissance et états du sol		Rotation dans la saison sèche				Rotation dans la saison des pluies			
		période		nombre total de jours	hauteur d'eau (cm)	période		nombre total de jours	hauteur d'eau (cm)
État du sol	Sol nu	1/I	31/I	30	-	26/VI	30/VI	5	-
	Préparation du sol	1/II	14/II	15	20	31/VI	9/VII	10	-
Phase végétative	Semis et repiquage	15/II	06/III	20	10-20	10/VII	29/VII	20	10-20
	Apparition des jeunes pousses	07/III	05/IV	30	10-20	30/VII	24/VIII	25	10-20
Phase de reproduction	Tallage	06/IV	10/V	35	10-20	25/VIII	23/IX	30	10-20
	Floraison	11/V	25/V	15	10-20	24/IX	08/X	15	10-20
Phase de maturation	Apparition des graines de couleur verte	26/V	05/VI	10	10-20	09/X	18/X	10	-
	Maturation	06/VI	15/VI	10	10	19/X	28/X	10	-
Total				120 jours				110 jours	
État du sol	Récolte du riz	16/VI	25/VI	10	-	29/X	7/XI	10	-
	Sol nu				-	8/XI	31/XII	54	-

Les cellules en couleur grise correspondent aux phases du cycle de développement du riz.

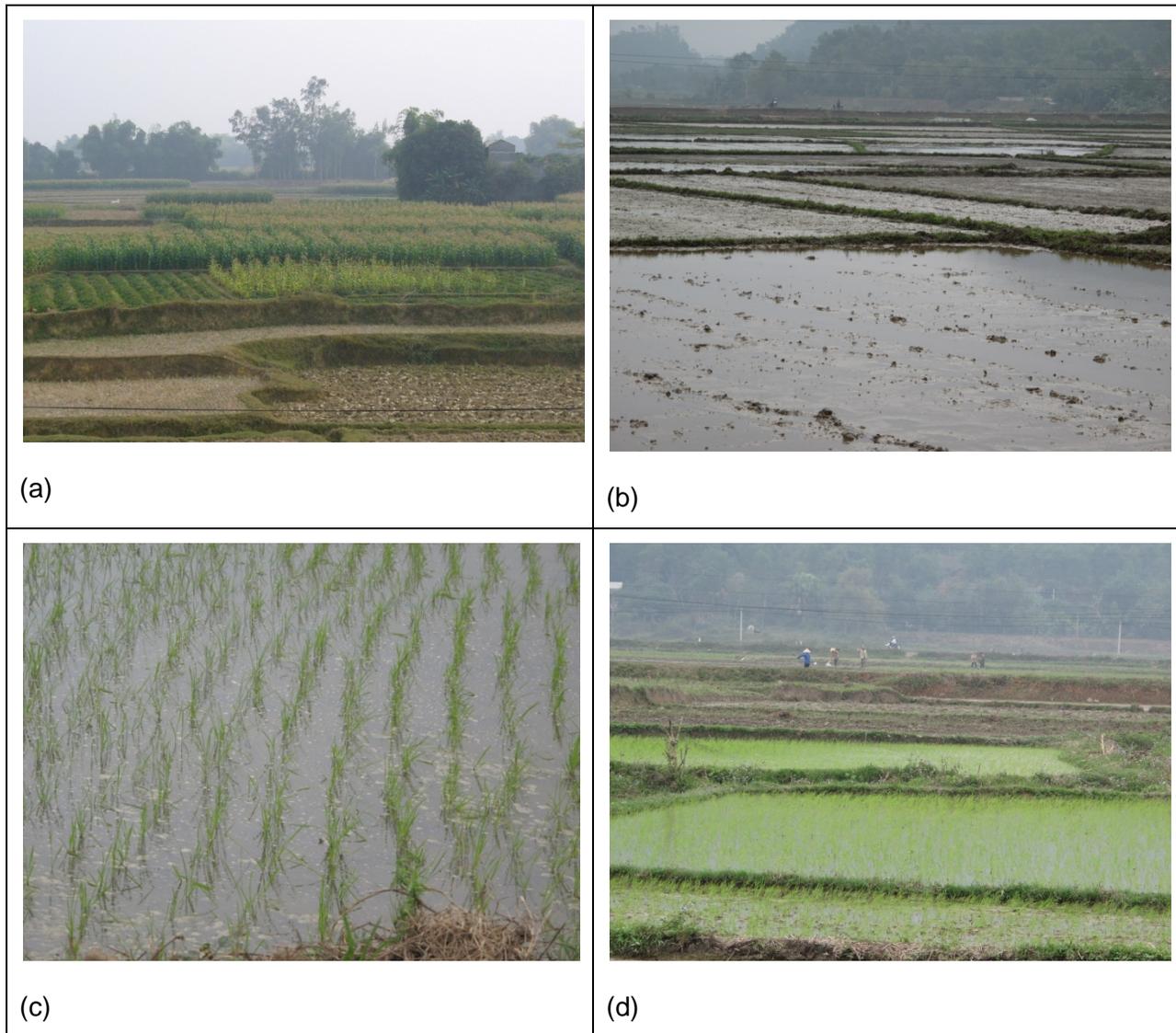
Tableau 3.3 : Stades de croissance du riz et étapes de préparation des parcelles rizicoles en aval du lac (Source: IPRE, 2008)

Phases de croissance et états du sol		Rotation dans la saison sèche				Rotation dans la saison des pluies			
		période		nombre total de jours	hauteur d'eau (cm)	période		nombre total de jours	hauteur d'eau (cm)
État du sol	Sol nu	1/I	20/I	20	-	15/VI	20/VI	6	-
	Préparation du sol	21/I	4/II	15	20	21/VI	30/VI	10	-
Phase végétative	Semis et repiquage	5/II	24/II	20	10-20	1/VII	20/VII	20	10-20
	Apparition des jeunes pousses	25/II	26/III	30	10-20	21/VII	14/VIII	25	10-20
Phase de reproduction	Tallage	27/III	30/IV	35	10-20	15/VIII	13/IX	30	10-20
	Floraison	1/V	15/V	15	10-20	14/IX	28/IX	15	10-20
Phase de maturation	Apparition des graines de couleur verte	16/V	25/V	10	10-20	29/IX	8/X	10	-
	Maturation	26/V	4/VI	10	10	9/X	18/X	10	-
Total					120 jours				110 jours
État du sol	Récolte du riz	5/VI	14/VI	10	-	19/X	28/X	10	-
	Sol nu				-	29/X	31/XII	64	-

Les cellules en couleur grise correspondent aux phases du cycle de développement du riz.

États du sol des parcelles de riz avant et après la période de culture

À la fin d'une rotation, les parcelles sont préparées pendant plusieurs semaines pour la prochaine rotation de riz. Ces activités de préparation des sols entre deux rotations de culture de riz modifient donc l'occupation des sols. En effet, les casiers rizicoles ne sont inondés qu'une partie de l'année pour la culture du riz. En général, 10 jours après la récolte du riz de la saison des pluies, les parcelles rizicoles sont exposées au soleil pendant plusieurs semaines, entre la fin de la récolte d'une année et le 20 janvier de l'année suivante (pour le sous-bassin aval du lac) ou la fin janvier (pour le sous-bassin amont du lac) (figure 3.8.a). Cette opération conduit au dessèchement du sol et à sa friabilité. Avant le repiquage des jeunes plants ou le semis à la volée des grains, le sol est labouré et les casiers sont inondés pendant 7 à 15 jours. La figure 3.8.b illustre l'état des casiers rizicoles avant la phase de semis ou de repiquage. L'eau est retenue dans les rizières par les diguettes qui délimitent les parcelles.



**Figure 3.8 : Photos d'illustration des phases de préparation des parcelles et deux des phases du stade de croissance de la plante
(Source : Hoang, 2009 et 2014)**

- a- Casiers rizicoles en phase de dessèchement.
- b- Irrigation des parcelles après le repiquage ou semi à la volée.
- c- Plants en phase végétative.
- d- Plants en phase de floraison.

3.3 Système d'irrigation

3.3.1 Évolution du système d'irrigation

Dans le bassin versant de la rivière Cong, la surface de rizières évolue dans le temps et surtout en fonction des saisons. La période retenue dans le cadre de cette étude est 1960-2009, soit une période de 50 ans. Le choix de cette période se justifie par le fait qu'à l'intérieur de cette période, des aménagements (construction de lac, de canaux d'irrigation) ont été effectués dans le bassin versant et le nombre total de rotations de culture de riz a changé à partir de 1977. Tous les aménagements effectués ont ainsi modifié dans le temps les conditions d'écoulement naturel. Les principales étapes sont entre 1960 et 2009 (figure 3.9):

- 1960-1972 : Rivière avec régime d'écoulement naturel. Durant cette période, dans le bassin versant, le riz n'est cultivé qu'en saison des pluies. En saison sèche, des cultures non irriguées (plantes ne nécessitant pas d'importants apports en eau comme le maïs, le thé, etc.) sont faites dans les casiers rizicoles;
- 1973-1976 : La construction du lac Nuicoc a commencé au début de 1973 et s'est achevée à la fin de 1976. Les aménagements des canaux ont également été effectués durant la même période. Pendant cette période, le régime d'écoulement de la rivière dépend du processus de régulation et de dérivation des débits pour la construction du barrage. Dans cette période, sur le bassin versant, il n'existe des rizières qu'en saison des pluies.
- 1977-2009 : Lac à deux sorties. La première sortie fonctionne uniquement en saison des pluies pour la régulation du débit en aval du lac. La deuxième sortie a pour rôle de fournir l'eau pour (i) satisfaire divers besoins toute l'année à l'extérieur du bassin et (ii) irriguer les rizières en saison sèche. Durant cette période, le riz est alors cultivé pendant les deux saisons.

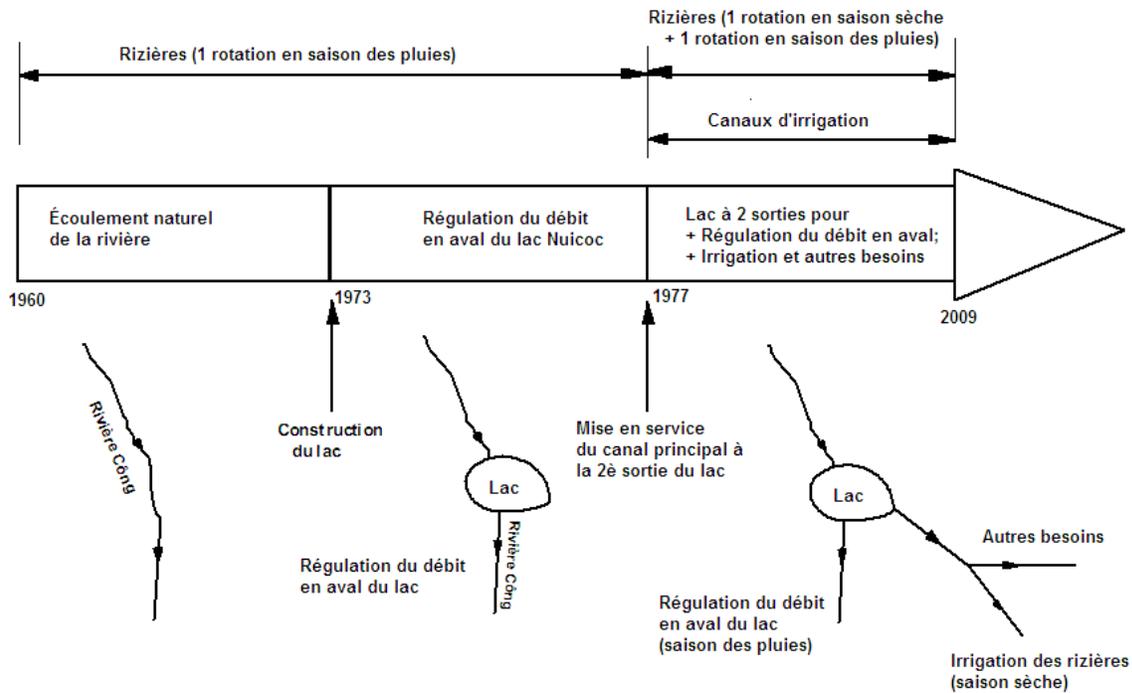


Figure 3.9 : Illustration des grandes phases d'évolution du bassin versant entre 1960 et 2009

3.3.2 Caractéristiques d'irrigation

Le réseau de canaux d'irrigation comprend un canal principal d'une longueur de 17,7 km et trois canaux secondaires, d'une longueur totale de 43,3 km, pour l'irrigation des rizières dans le bassin versant. Durant la saison sèche, les rizières sont alimentées en eau par ce réseau de canaux d'irrigation dont le canal principal est connecté au lac Nuicoc. La figure 3.5 montre le réseau de canaux qui dessert la partie aval du lac. Les canaux peuvent être de section rectangulaire ou trapézoïdale (figure 3.11). Aux canaux secondaires sont connectés 74 tronçons de petits canaux de niveau inférieur, permettant aux paysans de transférer l'eau des canaux secondaires vers les parcelles de riz en cas de nécessité. Les caractéristiques des canaux sont résumées au tableau 3.4.



**Figure 3.10 : Photo du canal principal d'amenée d'eau
(Source: Henk et coll., 2005)**

Du bas vers le haut sur la photo: le lac, la chambre et le canal principal. Le lac sert de réserve d'eau, la chambre permet de contrôler les opérations d'ouverture et de fermeture de la vanne à l'entrée du canal principal. Le canal principal sert de canal d'amenée de distribution d'eau dans les canaux secondaires.

Tableau 3.4 : Caractéristiques des canaux d'irrigation (Source : IPRE, 2008)

Type de canal	Longueur totale (km)	Forme géométrique de la section transversale
Canal principal	17,7	trapèze isocèle
Canaux secondaires	51,6	trapèze isocèle, rectangle
Canaux de niveau inférieur (3 et 4)	230,0	rectangle

La section transversale des canaux d'irrigation dans la zone d'étude présente différentes formes géométriques :

- trapèze isocèle : ces canaux sont en terre ou ont un talus en béton avec le fond en terre (figures 3.11-a, b).
- Rectangle : le revêtement de ces canaux peut être en béton armé, en béton léger ou en briques (figure 3.11-c).

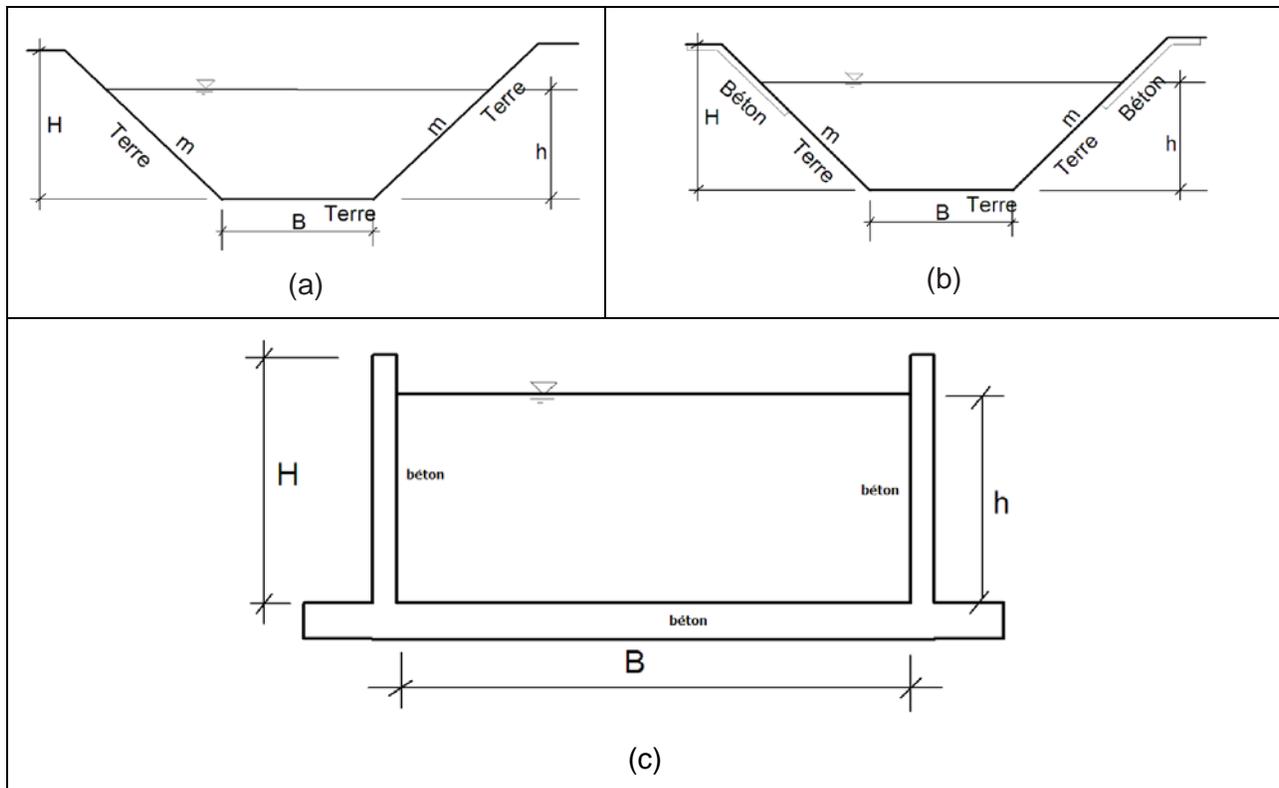


Figure 3.11 : Sections transversales des canaux d'irrigation et revêtement intérieur

3.3.3 Opération d'irrigation

Le réseau de canaux d'irrigation est construit de telle manière que l'eau puisse s'écouler par gravité des canaux de niveau supérieur vers ceux de niveau inférieur. Des vannes sont installées sur les différents types de canaux pour la régulation de l'ouverture et de la fermeture. Elles jouent un rôle dans les opérations d'irrigation. En effet, elles permettent d'alimenter les canaux de niveau inférieur puis les parcelles rizicoles en cas de nécessité. Pour ce faire, les vannes sont ouvertes pour irriguer les rizières par gravité en tenant compte du niveau initial d'eau dans les casiers rizicoles et de la phase de croissance de la plante (IPRE, 2004). Par conséquent, les volumes d'eau à la sortie des canaux secondaires dépendent de la demande en eau dans les différentes rizières du bassin versant. Dans la pratique, l'irrigation des parcelles s'effectue par les paysans, qui ouvrent et ferment les vannes des canaux secondaires en fonction des demandes en eau dans les parcelles. Il y a deux façons d'irriguer les rizières : (1) les vannes sont simultanément ouvertes pour irriguer toutes les parcelles au même moment; ou (2) les vannes sont ouvertes à tour de rôle pour distribuer l'eau par rotation et en tenant compte des besoins des parcelles. Dans les deux cas, les vannes sont fermées une fois que les niveaux d'eau souhaités dans les casiers rizicoles sont atteints.

La zone d'étude est divisée en plusieurs secteurs rizicoles (figure 3.12). Un canal est alors affecté à chaque secteur en tenant compte de la proximité du secteur avec le tronçon de canal. Ce canal sert à l'irrigation du secteur qui lui est affecté. Le tableau 3.5 résume les différents secteurs, les rizières, les canaux responsables de l'irrigation et les surfaces des rizières dans ces différents secteurs.

Tableau 3.5 : Canaux utilisés pour l'irrigation des différents secteurs avec les surfaces de rizières correspondantes (Source : IPRE, 2004)

Nom du secteur	Canal responsable de l'irrigation	Surface des rizières dans la saison sèche (ha)
Thai Nguyen	Canal principal	1 145
Song Cong	Canal principal	933
Phu Binh	Canal secondaire Est	882
Pho Yen	Canaux secondaires Centre et Ouest	2 652
Total		5 612

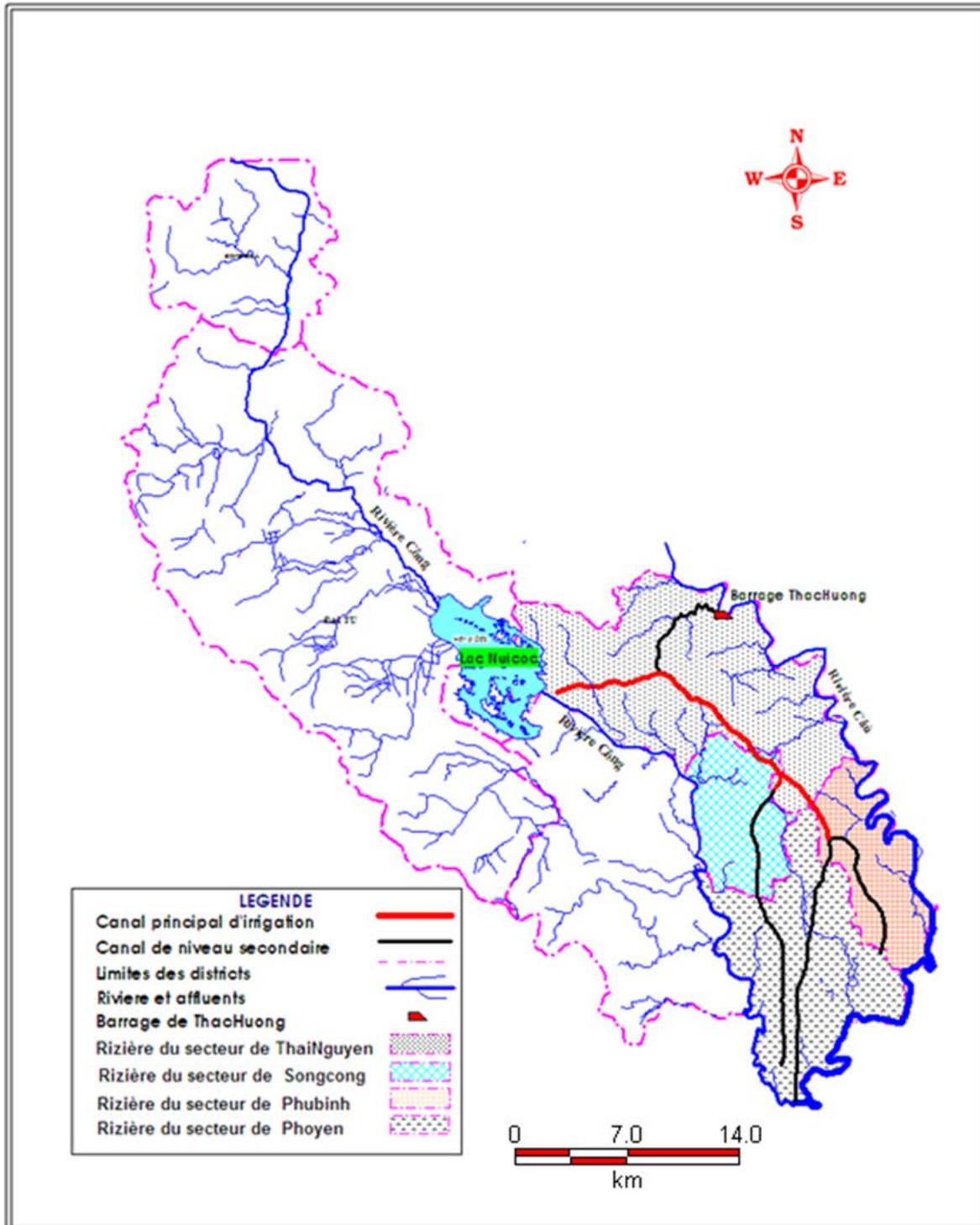


Figure 3.12 : Carte des différents secteurs rizicoles et des différents canaux dans le sous-bassin versant de la rivière Cong (Source : IPRE, 2008)

3.3.4 Rôle du lac Nuicoc

L'alimentation en eau du canal principal du réseau de canaux est assurée par le lac Nuicoc. Ce lac a été construit en 1973; sa première fonction a été de réguler les débits en aval durant la saison des pluies de 1974 à 1976. En 1977, une deuxième sortie a été mise en service pour : (i) fournir de l'eau nécessaire en saison sèche pour l'irrigation des rizières situées dans le sous-bassin aval et (ii) fournir de l'eau en fonction des besoins toute l'année pour d'autres besoins (industries, etc.). À partir de 1977, le lac Nuicoc disposait alors de deux sorties et jouait plusieurs rôles, dont celui de l'irrigation, sur la base du schéma de fonctionnement illustré à la figure 3.13.

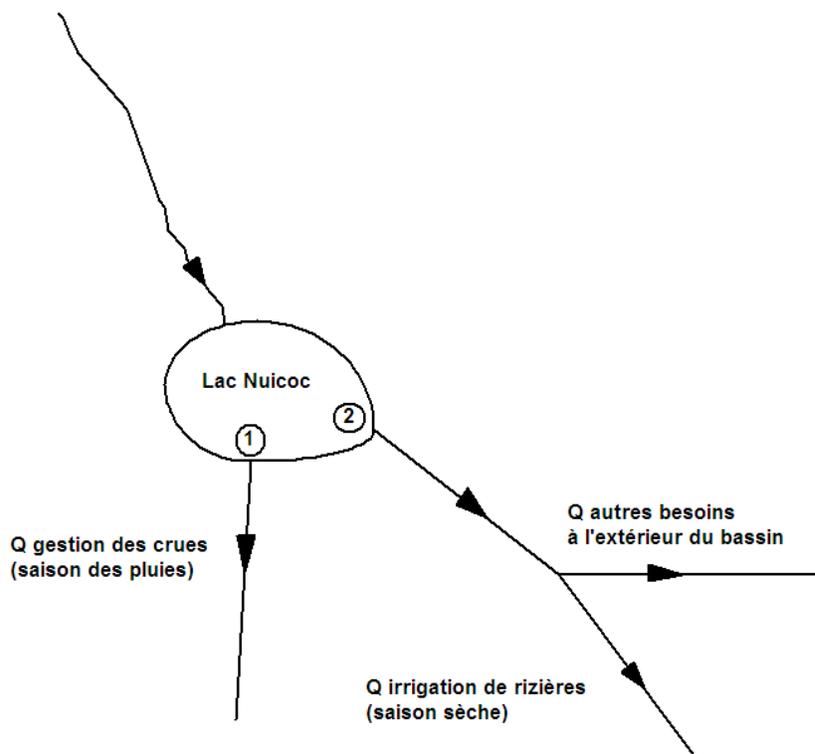


Figure 3.13 : Schéma simple d'opération du lac Nuicoc

Q : débits; 1, 2 : numéros des sorties du lac

3.4 Drainage en saison des pluies

Pendant la saison des pluies, les besoins en eau des rizières sont satisfaits par les précipitations. Par conséquent, les canaux ne servent plus à irriguer les parcelles de culture. À cause des caractéristiques de la pluie durant cette saison (nombre élevé de jours de pluie par mois, pluie de forte intensité sur de brèves durées), il faut procéder au drainage des eaux pour

éviter que les plantes ne soient submergées d'eau. La submersion des plantes peut conduire à une baisse du rendement. Cette opération est alors nécessaire, car elle permet d'abaisser le niveau d'eau dans les casiers rizicoles de manière à atteindre un niveau optimal correspondant à la phase de développement de la plante (IPRE, 2004). L'eau drainée peut alors suivre des chemins naturels (petits ruisseaux) ou aménagés (rigoles de drainage) pour rejoindre les affluents de la rivière ou la rivière elle-même.

L'opération de drainage dépend de la topographie du terrain et des ouvrages de drainage installés dans le bassin. Dans la partie en amont du lac, le drainage s'effectue par gravité, car la topographie en forme de terrasses avec des pentes plus ou moins prononcées est favorable à cette opération. Les exutoires des ruisseaux et rigoles de drainage croisent d'autres affluents de la rivière Cong. Dans la partie en aval du lac, la topographie est plus variée. Le drainage de l'eau excédentaire s'effectue alors par gravité et à certains endroits par des pompes (drainage dynamique, figure 3.14-a). Dans la pratique, le drainage gravitaire dans la zone d'étude s'effectue par ouverture dans la diguette servant à délimiter les casiers rizicoles (figure 3.14-b). Cette procédure permet de créer une sortie dans un ensemble de casiers de manière à faire baisser le niveau de l'eau. Toutes ces procédures sont résumées sous forme de recommandations par les pouvoirs publics de la province responsable de la gestion des eaux du bassin (IPRE, 2004; MRE, 1988).

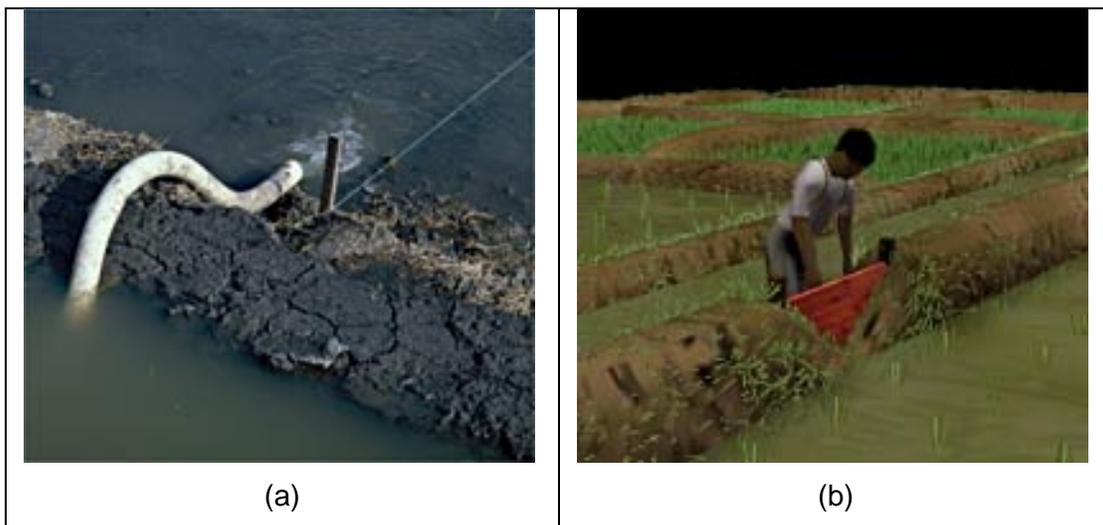


Figure 3.14 a- Drainage dynamique par pompage. b- Drainage gravitaire par ouverture dans une diguette qui délimite un casier (source : ADF, 2011).

3.5 Synthèse

Le bassin versant de la rivière Cong est un bassin versant sous climat tropical de type mousson. Il existe une saison sèche et une saison des pluies chaque année. La distribution des pluies et donc de l'écoulement en rivière n'est pas uniforme durant les mois de l'année. L'occupation du territoire est composée en partie de rizières, qui doivent être inondées d'eau pendant la culture, et d'autres terres agricoles, de milieux forestiers, d'eau, etc. Dans le bassin versant, les aménagements hydroagricoles (extension de rizières, construction du lac Nuicoc et de canaux d'irrigation) effectués entre les années 1972 et 1976 ont modifié le régime d'écoulement naturel dans le bassin. Par ailleurs, l'eau stockée dans le lac sert à irriguer non seulement les rizières, mais aussi à répondre à d'autres besoins comme les besoins des industries, l'adduction en eau potable dans les villes, etc. Ce bassin versant se présente comme une zone d'intérêt pour la mise en place d'un sous-modèle de rizière et d'un sous-modèle de gestion de l'irrigation ou des transferts d'eau du lac vers les points d'utilisation dans le bassin versant. La mise en place de tels modèles aidera à étudier l'impact d'aménagements possibles sur la réponse hydrologique du bassin versant.

4. Modèle des rizières et implémentation dans HYDROTEL

4.1 Introduction

GIBSI (Gestion Intégrée des Bassins versants à l'aide d'un Système Informatisé) est un système d'aide à la décision capable de simuler les principaux processus affectant l'évolution quantitative et qualitative de l'eau d'un bassin versant (Villeneuve *et coll.*, 1998; Rousseau *et coll.*, 2000). Il existe dans le système GIBSI quatre modèles de simulation : HYDROTEL pour les processus hydrologiques, RUSLE pour l'érosion, SWAT/EPIC pour les transports de contaminants et QUAL2E pour la qualité de l'eau en rivière et en lac. GIBSI permet d'analyser les impacts de scénarios d'usage de l'eau et de l'utilisation du territoire sur le régime hydrologique et la qualité de l'eau en tout point du réseau hydrographique (Rousseau *et coll.*, 2007). Développé par l'Institut National de la Recherche Scientifique (INRS), HYDROTEL est le modèle qui sera utilisé pour les simulations dans le cadre de cette recherche. Le choix de cet outil-modèle est justifié par les raisons suivantes : (1) il intègre déjà plusieurs sous-modèles de simulation des processus hydrologiques et (2) il est l'outil retenu pour les études dans le cadre du projet de GIRE du bassin versant de l'ensemble de la rivière Cau au Vietnam.

Dans ce chapitre, le modèle de simulation HYDROTEL sera présenté, incluant les principaux processus qu'il simule ainsi que ses structures spatiale et temporelle. Ensuite, le sous-modèle de rizière élaboré dans le cadre de cette thèse et implémenté dans HYDROTEL sera présenté. Sur la base des concepts répertoriés dans la littérature, des propositions seront faites pour modéliser le fonctionnement hydrologique d'une rizière. Des méthodes d'implémentation seront également présentées en suivant la logique de discrétisation spatio-temporelle adoptée dans HYDROTEL.

4.2 Méthodologie

4.2.1 Présentation du modèle hydrologique distribué HYDROTEL

HYDROTEL (Fortin *et coll.*, 1995), modèle hydrologique distribué à base physique, intègre six sous-modèles définis par différents algorithmes. Ces algorithmes permettent de simuler les processus hydrologiques suivants : l'interpolation des données météorologiques, l'évolution du couvert nival, l'évapotranspiration potentielle, le bilan d'eau vertical, l'écoulement sur la partie terrestre du bassin et l'écoulement par le réseau hydrographique (tableau 4.1).

Tableau 4. 1 : Processus simulés et algorithmes disponibles pour les simulations hydrologiques (Source: Fortin et Royer, 2004)

Processus hydrologiques	Algorithmes disponibles
1. Interpolation des données météorologiques	1.1 Polygones de Thiessen 1.2 Moyenne pondérée des trois stations les plus proches
2. Évolution du couvert nival	2.1 Méthode mixte (degrés-jours) - (bilan énergétique)
3. Évapotranspiration potentielle	3.1 Thornthwaite (1948) 3.2 Hydro-Québec 3.3 Linacre (1977) 3.4 Penman-Monteith (Monteith, 1965) 3.5 Priestley-Taylor (1972)
4. Bilan d'eau vertical	4.1 Bilan vertical en trois couches (BV3C)
5. Écoulement sur la partie terrestre du bassin	5.1 Onde cinématique
6. Écoulement par le réseau hydrographique	6.1 Onde cinématique 6.2 Onde diffusante

Les données d'entrée d'HYDROTEL sont fournies par un système d'information géographique (SIG), PHYSITEL, élaboré pour les besoins du modèle HYDROTEL. Ce SIG permet de traiter l'ensemble des données physiographiques du bassin versant d'étude au modèle HYDROTEL pour les simulations. Ces données sont : la topographie du bassin sous la forme d'un modèle numérique de terrain (MNT), le réseau hydrographique sous forme vectorielle, l'occupation du sol et le type de sol. Le modèle numérique de terrain est un maillage dans lequel on attribue à chaque maille une dimension donnée. On a choisi un maillage de 30 m x 30 m. Une altitude moyenne provenant de l'analyse de la topographie du bassin a été fixée pour chaque maille.

Structure spatiale de simulation

Dans HYDROTEL, la structure spatiale du bassin étudié est discrétisée en « Unités Hydrologiques Relativement Homogènes » ou UHRH (Fortin et Royer, 2004). Les quatre premiers processus hydrologiques d'HYDROTEL (interpolation des données météorologiques, évolution du couvert nival, évapotranspiration potentielle et bilan d'eau vertical) sont simulés au niveau des UHRH. Les UHRH sont donc des éléments de calcul répartis à l'intérieur d'un bassin versant. Cette approche permet de mieux prendre en compte la variabilité spatiale des caractéristiques physiographiques (topographie, occupation du sol, etc.) du bassin (Fortin et Royer, 2004).

Structure temporelle de simulation

HYDROTEL effectue les simulations en continu à l'intérieur d'une période donnée pour laquelle les données météorologiques sont fournies. Par conséquent, le temps est discrétisé en unités de calcul pour les besoins des simulations. Le pas de temps utilisé pour les simulations doit être un sous-multiple de 24 h : 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12 ou 24 h (Fortin *et coll.*, 1990, 1995, 2001, 2004 et 2007).

4.2.2 Intégration du sous-modèle « rizière » aux structures d'HYDROTEL

Processus hydrologiques en jeu

La structure physique du bassin versant de la rivière Cong montre qu'il existe un lac avec une sortie pour la régulation des crues et une deuxième sortie, qui est une prise d'eau pour un système de canaux d'irrigation des rizières. On peut modéliser un lac avec la version actuelle d'HYDROTEL. Mais le problème est que le lac Nuicoc possède de nombreuses particularités dont il faut tenir compte. Il n'est actuellement pas possible de tenir compte dans les simulations de plusieurs particularités propres à ce bassin versant comme : (1) le fonctionnement hydrologique des rizières, généralement différent de celui des autres terres agricoles non inondables; (2) les prélèvements réguliers du lac pour répondre à différents besoins en eau (irrigation, industries, etc.) dans le bassin versant; et (3) les canaux d'irrigation permettant de transporter l'eau du lac vers les points finaux d'utilisation. Par conséquent, pour les besoins de ce projet de thèse, il est nécessaire d'implémenter dans HYDROTEL une structure qui permettra de tenir compte de ces particularités du bassin versant.

Une couche « rizière », permettant de simuler les processus hydrologiques en jeu dans une rizière, et une couche « lac », qui permet de gérer les prélèvements d'eau et les niveaux d'eau dans le lac, ont été créées et permettront de tenir compte de ces spécificités à l'échelle du bassin versant. Une troisième couche (couche fictive), la couche de canaux d'irrigation, a également été définie et servira de couche intermédiaire entre les rizières et le lac (figure 4.1). Cette couche a pour rôle de servir au transfert d'eau du lac vers les points d'utilisation (rizières, industries, etc.)

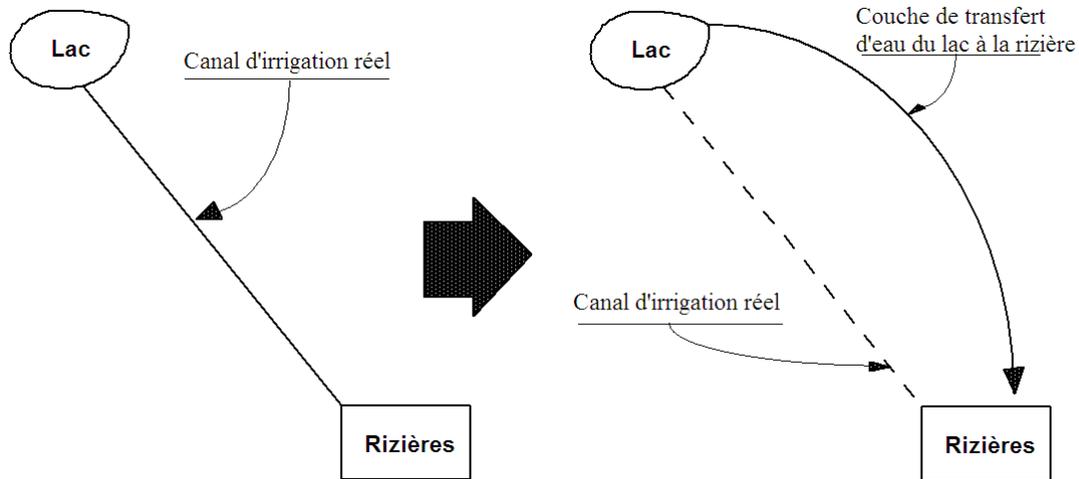


Figure 4.1 : Illustration des couches lac, rizière et canaux d'irrigation

Pour la structure spatiale des rizières, la règle de discrétisation en UHRH déjà existante dans HYDROTEL sera maintenue. Dans chaque UHRH, il faudra déterminer la fraction occupée par les rizières (α , figure 4.2) pour l'application des processus ayant lieu dans la couche de rizières.

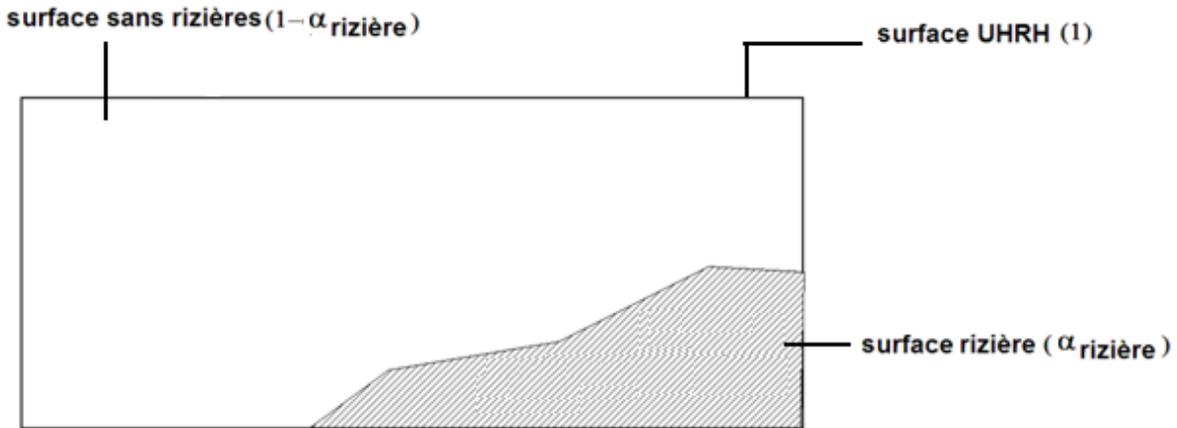


Figure 4.2 : Illustration de l'UHRH avec la surface $\alpha_{rizière}$ occupée par la rizière

Pour la structure spatiale du lac, dans HYDROTEL il existe un réseau vectoriel discrétisé en tronçons de rivières; le lac sera rattaché à ce réseau en tenant compte de sa géographie et des fonctions d'irrigation qu'il assure. Les détails du sous-modèle du lac seront exposés dans le chapitre 5.

Processus d'irrigation et de drainage excédentaire d'eau dans les rizières

Durant la période des pluies, la surface des rizières est à sa valeur maximale à cause des disponibilités en eau qui permettent de répondre aux besoins des rizières. Durant cette période, les pluies peuvent être intenses et peuvent durer une journée entière et quelques fois plusieurs journées. Il est alors nécessaire de drainer l'eau excédentaire des rizières pour assurer un bon rendement des plantes.

Par contre, en saison sèche, les pertes d'eau dans les rizières par infiltration et par évapotranspiration doivent être comblées par une quantité additionnelle d'eau provenant de l'irrigation à partir du lac Nuicoc, via le réseau des canaux d'irrigation. Cette opération permettra de maintenir la hauteur souhaitée dans la rizière.

4.2.3 Modifications adoptées dans le modèle HYDROTEL

Pour pouvoir effectuer les simulations avec HYDROTEL, les modèles « rizières » et « gestion du lac », dont les principes, équations et méthodes de résolution seront exposés plus loin, seront intégrés à la structure préexistante d'HYDROTEL. Ceci permettra de bénéficier des processus hydrologiques qu'HYDROTEL est déjà capable de simuler. Tout comme pour ces processus, les deux modèles à développer dans cette thèse seront intégrés sous forme de sous-modèles dans HYDROTEL. Pour cette intégration, plusieurs modifications ou adaptations sont nécessaires.

Modification dans le sous-modèle BV3C

La couche des rizières aura un impact sur l'infiltration sur chaque UHRH et donc sur les quantités d'eau qui seront affectées au ruissellement de surface et à l'écoulement souterrain à l'exutoire de l'UHRH. HYDROTEL utilise un sous-modèle nommé bilan vertical en trois couches BV3C (figure 4.3) pour déterminer les quantités d'eau à affecter au ruissellement de surface et à l'écoulement souterrain à l'exutoire de l'UHRH (Fortin *et coll.*, 1995). Cet algorithme, en l'état actuel, ne peut pas prendre en compte la classe d'occupation « rizière » et son fonctionnement. Des modifications dans les variables et les flux seront effectuées.

Infiltration

Selon Ricard (2008), BV3C permet de caractériser l'infiltration à partir de l'équation développée par Smith et Parlange (1978). Dans le fond des rizières, l'infiltration dépend du type de sol, de la couche de labour (Tuong *et coll.*, 2005) ainsi que de l'âge de la rizière (FAO, 1990; Khepar *et*

coll., 2000; Janssen et Lennartz, 2007). Sur la fraction de l'UHRH occupée par les rizières, le BV3C à appliquer sera alors une forme modifiée appelée « BV3C_modifié » (figure 4.3).

Évapotranspiration réelle

HYDROTEL estime l'évapotranspiration potentielle (ETP) à l'aide d'un des cinq sous-modèles spécifiques (tableau 4.1). Le riz est une culture inondée avec une caractéristique particulière, celle d'une évapotranspiration plus élevée que celle des plantes non inondées. La méthode adoptée dans cette thèse pour la détermination de l'évapotranspiration réelle du riz est celle d'Allen *et coll.* (1998) et de Someth *et coll.* (2009), exposée dans la revue de la littérature, qui permet de déterminer l'évapotranspiration réelle comme une fonction de l'évapotranspiration de référence et d'un coefficient de culture du riz. La quantité d'eau perdue par évapotranspiration réelle du riz étant plus élevée que celle des autres plantes, le bilan d'eau sera effectué à partir du « BV3C_modifié » pour la couche des rizières.

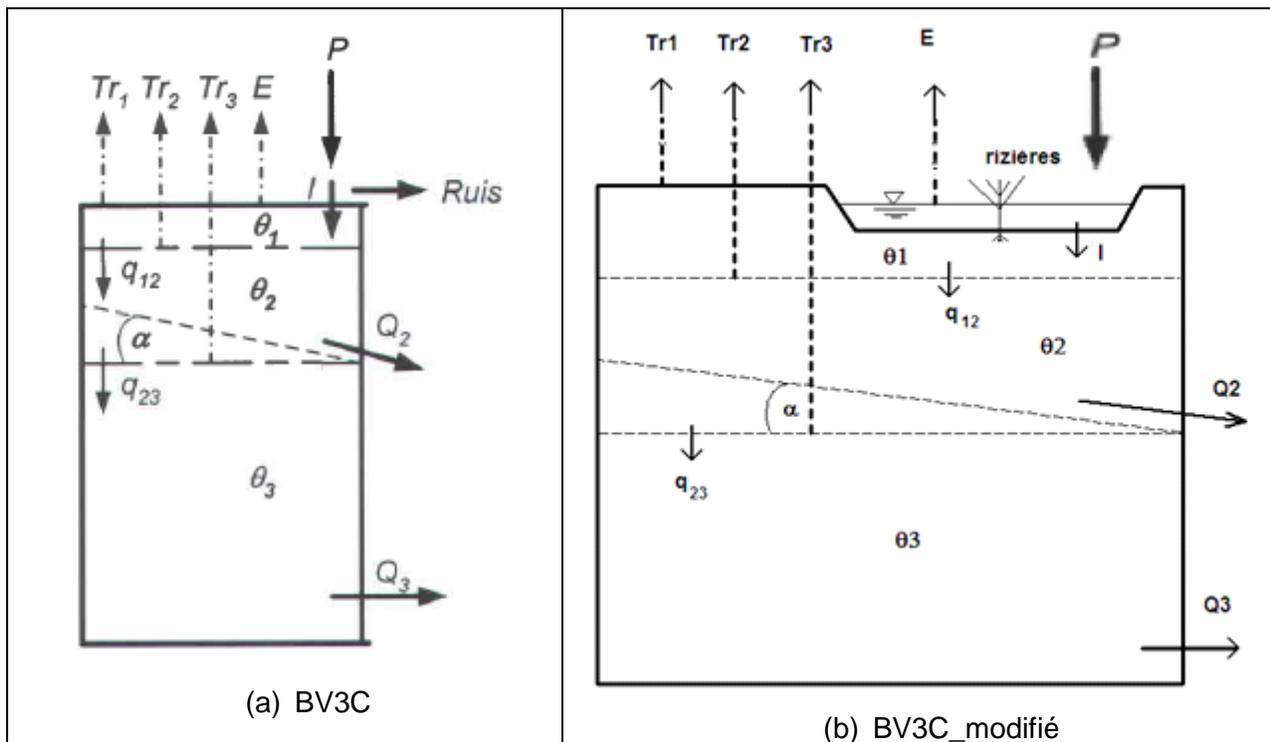


Figure 4.3 : (a) Schéma du bilan vertical en trois couches actuel; (b) Illustration du bilan vertical modifié en trois couches

Les variables sur cette figure sont présentées au tableau 4.2.

Teneur en eau

Les différentes teneurs en eau dans les trois couches du sol seront déterminées à partir des équations déjà présentes dans HYDROTEL (tableau 4.2). Dans le cas des rizières irriguées par

le lac, en tenant compte des quantités d'eau apportées par l'irrigation et des surfaces de rizières, les teneurs en eau peuvent être exprimées comme indiqué au tableau 4.2. L'apport en eau provenant de l'irrigation sera pris en compte dans l'expression de la teneur en eau de la première couche de sol.

Tableau 4. 2 : Équations du BV3C et du BV3C_modifié

BV3C actuel	BV3C_modifié
$\theta_{1f} = \theta_{1i} + \frac{\Delta t}{z_1} (P - q_{12} - E - Tr_1)$	$\theta_{1f} = \theta_{1i} + \frac{\Delta t}{z_1} (P + \alpha_{rizière} Irr - q_{12} - E - Tr_1)$
$\theta_{2f} = \theta_{2i} + \frac{\Delta t}{z_2 - z_1} (q_{12} - q_{23} - Tr_2 - Q_2)$	$\theta_{2f} = \theta_{2i} + \frac{\Delta t}{z_2 - z_1} (q_{12} - q_{23} - Tr_2 - Q_2)$
$\theta_{3f} = \theta_{3i} + \frac{\Delta t}{z_3 - z_2} (q_{23} - Tr_3 - Q_3)$	$\theta_{3f} = \theta_{3i} + \frac{\Delta t}{z_3 - z_2} (q_{23} - Tr_3 - Q_3)$

Avec :

i et f : indices faisant respectivement référence à la teneur en eau θ au début et à la fin du pas de temps;

1, 2, 3 : indices faisant référence aux première, deuxième et troisième couches du sol (figure 4.3);

$\alpha_{rizière}$: fraction de l'UHRH occupée par les rizières (figure 4.2);

Irr : eau provenant de l'irrigation (m);

q_{12} , q_{23} : écoulements verticaux entre les couches (m);

Q_3 : écoulement de base de la troisième couche (m²);

Q_2 : débit retardé (m²).

E : évaporation (m);

Tr_1 , Tr_2 , Tr_3 : valeurs de transpiration entre chaque couche en fonction de leur teneur en eau (m) ;

P : précipitation (m).

Écoulements souterrains horizontaux

HYDROTEL représente les écoulements horizontaux, qui alimentent le réseau hydrographique, par le débit hypodermique dans la deuxième couche du sol (Q_2) et le débit de base dans la troisième couche (Q_3). Selon Fortin *et coll.*, 1995, dans BV3C, ces variables sont exprimées par

l'équation de Richards. Q_2 est calculé en fonction de la gravité, parallèle à la pente, et Q_3 est une fonction de la teneur en eau de la troisième couche du sol. L'écoulement souterrain horizontal, Q_2 et Q_3 , seront automatiquement mis à jour sur chaque UHRH avec modification de la teneur en eau de chaque couche.

Modification dans l'écoulement sur la partie terrestre

Dans HYDROTEL, l'écoulement à l'exutoire d'une UHRH est basé sur les équations de Saint-Venant avec l'algorithme d'onde cinématique. Le débit de ruissellement à l'exutoire dépend de la lame d'eau en provenance du modèle BV3C et des coefficients de Manning, selon la classe d'occupation du sol, via un hydrogramme géomorphologique de référence (Moussa, 1991, 1996, 1997 et Fortin et Royer, 2004). En présence de rizières, les variables dans le bilan d'eau à la surface d'une UHRH, notamment celles liées au processus de stockage d'eau dans une rizière et de drainage de l'eau excédentaire, seront influencées par la lame d'eau présente à la surface d'une UHRH. Il sera alors nécessaire de recalculer la lame d'eau à la surface de l'UHRH dans BV3C; la nouvelle lame servira à la simulation.

4.2.4 Nouveau schéma de simulation implémenté dans HYDROTEL

À partir de la structure de simulation dans HYDROTEL (Fortin *et coll.*, 1995), un organigramme présentant les sous-modèles de rizières et de gestion du lac expose la synthèse des liens entre les données et les différents sous-modèles (figure 4.4). Cette structure permet de mieux appréhender, en fonction de l'irrigation, du drainage des rizières et de la gestion de l'eau du lac, comment le sous-modèle des rizières devra s'insérer au sein de l'architecture actuelle d'HYDROTEL.

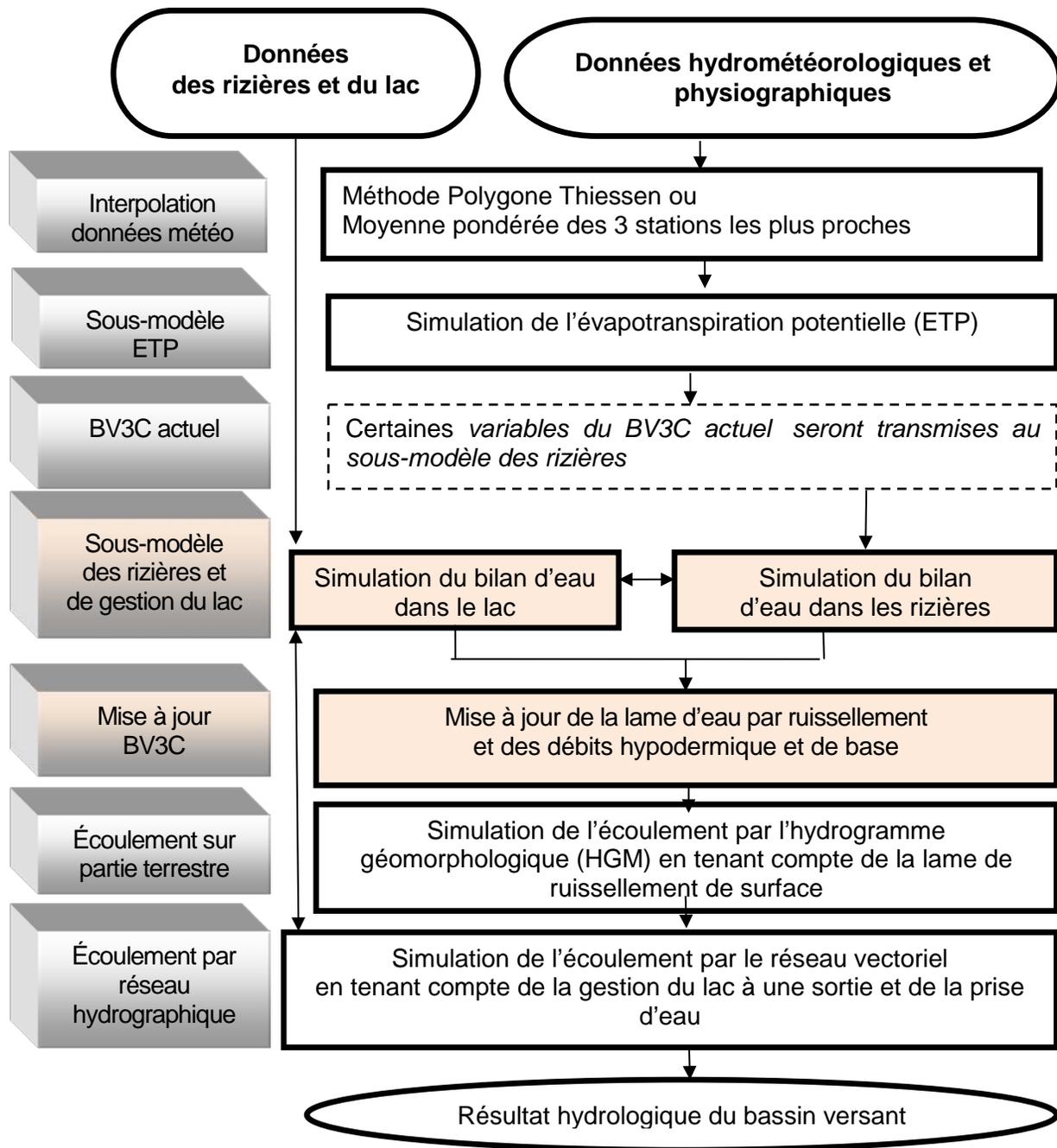


Figure 4.4 : Nouvelle structure implémentée dans le modèle HYDROTEL (les cases rosées correspondent aux modifications apportées au modèle dans cette thèse)

4.3 Caractéristiques des rizières présentées dans le sous-modèle des rizières

Dans le bassin versant d'étude, les rizières sont cultivées durant deux rotations chaque année, en saison sèche et puis en saison des pluies. Pour chaque rotation de riz, il faut souligner qu'il existe une différence de 10 jours entre les dates de début de la rotation dans une saison donnée en amont et en aval du lac (IPRE, 2008). Cependant, le décalage de 10 jours sera considéré comme négligeable dans un contexte de gestion intégrée par bassin versant.

Les phases de croissances du riz dans un bassin versant peuvent être considérées comme étant au nombre de trois (IPRE, 2008). Il s'agit des principales phases de chaque rotation : la phase végétative, qui dure de 45 à 50 jours selon la saison, la phase de reproduction, d'une durée de 45 à 50 jours selon la saison, et la phase de maturation, d'une durée de 30 jours (figures 4.5 et 4.6).

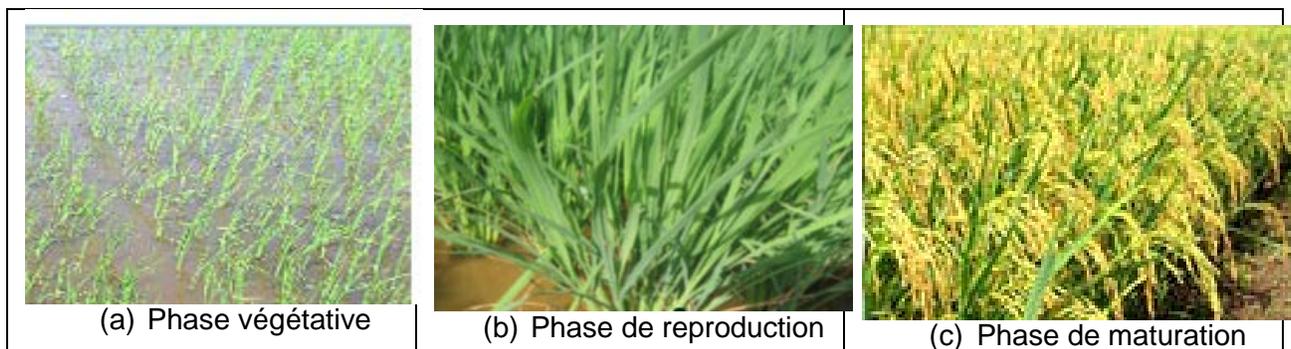


Figure 4.5 : Développement du riz dans chaque période de croissances (Source : VRKB, 2013)

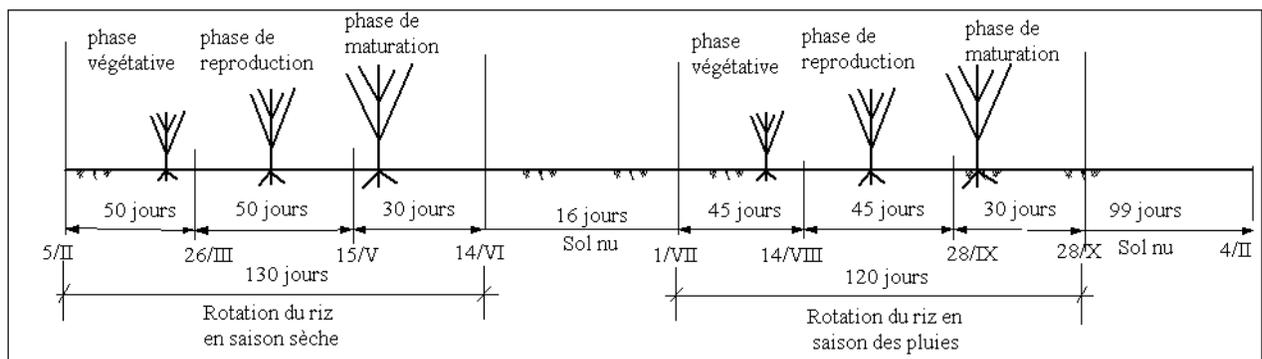


Figure 4.6 : Illustration des stades de croissances du riz

(les symboles 5/II, 26/III, etc., correspondent respectivement aux dates du 5 février et du 26 mars)

Pour la gestion en eau dans la rizière, des travaux comme ceux de Vaesen *et coll.* (2000) et de Chen *et coll.* (2002) permettent d'avoir des valeurs de référence à utiliser. La hauteur d'eau dans la rizière fluctue entre un seuil d'eau minimal et un seuil maximal. Le seuil minimal d'eau est la hauteur d'eau minimale nécessaire pour éviter que les plantes se retrouvent en état de stress hydrique (manque d'eau) et le seuil maximal est la valeur idéale de hauteur recommandée pour éviter que les plantes soient submergées. En deçà du minimum et au-delà du maximum, la productivité de la plante pourrait être affectée. Ces deux valeurs correspondent aux limites pour lesquelles il faut : (1) stocker de l'eau dans les rizières par irrigation ou par ruissellement de surface (cas du seuil minimal) ou (2) procéder au drainage (cas du seuil maximal). Les valeurs adoptées correspondent aux couples suivants : (0,02; 0,1) m; (0,02; 0,07) m; (0,02; 0,1) m et (0,02; 0,1) m, respectivement pour la préparation du sol, la phase végétative, la phase de reproduction et celle de maturation (tableau 4.3).

Tableau 4.3 : Hauteurs d'eau utilisées dans les rizières pour les simulations

Limites de la hauteur d'eau dans la rizière	Préparation du sol	Phase végétative	Phase de reproduction	Phase de maturation
Seuil d'eau minimal (m)	0,02	0,02	0,02	0,02
Seuil d'eau maximal (m)	0,1	0,07	0,1	0,1

À part les phases de croissance du riz, deux autres caractéristiques du riz sont nécessaires pour les simulations, soit la profondeur racinaire (VRKB, 2013) et l'indice foliaire. La profondeur racinaire intervient dans l'estimation de l'évapotranspiration de référence afin de déterminer l'épaisseur de la couche de sol qui sera affectée par le prélèvement d'eau du sol par les racines de la plante. L'indice foliaire, quant à lui, est défini par la surface de feuille exprimée par unité de surface du sol. Cet indice intervient également dans le calcul de l'évapotranspiration de la plante. La profondeur racinaire du riz dépend de la période de croissance (figure 4.5). En tenant compte de la phase de croissance, les valeurs considérées sont : 0 m; 0,05 m; 0,1 m et 0,2 m, respectivement pour les phases de préparation du sol, végétative, de reproduction et de maturation. Quant à l'indice foliaire, selon Asrar *et coll.* (1984), Fortin *et coll.* (1990 et 1995) et Bréda (1999), il peut être calculé par l'indice de végétation DVI (Normalized Difference Vegetation Index) provenant de données de télédétection. Pour le riz, Kuwagata *et coll.* (2008)

ont montré que l'indice foliaire du riz varie entre 0,05 et 1,5. Ces données sont nécessaires pour les simulations avec le modèle HYDROTEL (Fortin et Royer, 2004).

4.4 Concepts et implémentation du sous-modèle des rizières

4.4.1 Concepts du modèle de rizières

À partir de la revue de la littérature (Azamathulla *et coll.*, 2008; Gupta *et coll.*, 2008; Masumoto *et coll.*, 2008; Someth *et coll.*, 2009), le principe de base adopté pour le sous-modèle de rizières est celui qui consiste à assimiler une rizière à un réservoir et à exprimer l'équation de continuité sous la forme de variations de l'emmagasinement. La figure 4.7 résume les processus hydrologiques dans la rizière.

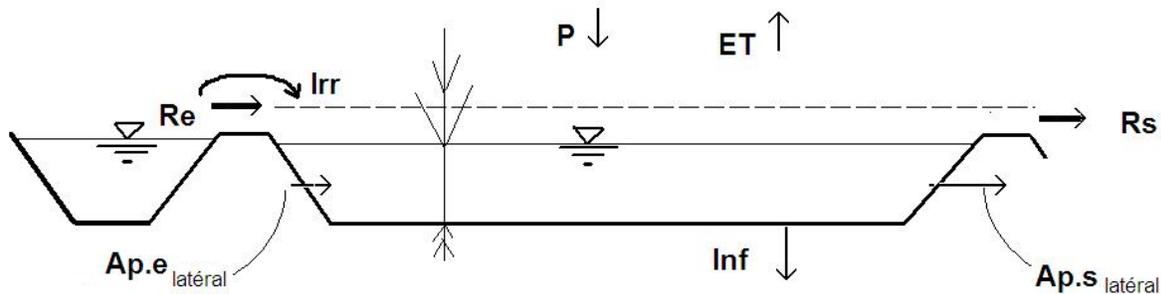


Figure 4.7 : Illustration des variables du bilan de masse à l'échelle d'un casier rizicole

La variation de l'emmagasinement (ΔV) s'exprime par :

$$\frac{\Delta V}{A} = \Delta H = (P + Irr + Re + Ap.e_{latéral}) - (Inf + ET + Rs + Ap.s_{latéral}) \quad (\text{Éq. 4.1})$$

Avec : A : surface de rizière (m^2);

$\Delta V, \Delta H$: variation du volume (m^3) et de la hauteur d'eau (m) dans la rizière;

Irr : irrigation (m);

P : précipitations (m);

Re : ruissellement de surface en entrée (m);

$Ap.e_{latéral}$: apports latéraux souterrains (m);

ET : évapotranspiration (m);

Inf : infiltration (m);

$Ap.s_{latéral}$: pertes latérales souterraines (m);

Rs : ruissellement de surface en sortie (m).

Dans cette équation, deux variables (Irr et Rs) sont influencées par les prises de décision en lien avec les seuils de hauteurs maximale et minimale définies pour la rizière (voir tableau 4.3). Une contrainte supérieure (seuil maximal ou optimal) a été définie pour la hauteur d'eau dans une rizière en fonction du stade de croissance de la plante. Elle permettra d'éviter une submersion des plantes en saison des pluies et une utilisation rationnelle de l'eau en saison sèche, qui est principalement la période d'irrigation :

$$h \leq h_{opt}^k \quad (\text{Éq. 4.2})$$

Une contrainte inférieure (seuil minimal ou critique) pour la hauteur d'eau dans la rizière a également été définie en fonction du stade de croissance du riz afin d'éviter que la plante ne se retrouve en état de stress hydrique en cas de baisse continue du niveau d'eau. C'est le seuil à partir duquel le besoin d'irrigation est nécessaire pour assurer une bonne croissance de la plante et assurer une bonne productivité de la culture :

$$h \geq h_{crit}^k \quad (\text{Éq. 4.3})$$

Avec : k : stade de la plante dans son cycle de croissance;

h : hauteur d'eau dans la rizière (m);

h_{crit} : seuil critique de la profondeur d'eau dans la rizière (m);

h_{opt} : seuil optimal de la profondeur d'eau dans la rizière (m).

4.4.2 Algorithme implémenté pour le sous-modèle des rizières

4.4.2.1 Implémentation des rizières dans HYDROTEL

Selon la philosophie du modèle hydrologique distribué HYDROTEL (Fortin *et coll.*, 1995), le sous-modèle des rizières devra être implémenté pour une simulation selon les règles de discrétisation spatiale habituelles (UHRH) et au pas de temps journalier :

- (i) Implémentation selon la structure spatiale des UHRH :

Les processus hydrologiques dans une rizière seront intégrés dans la structure d'HYDROTEL selon la figure 4.8.

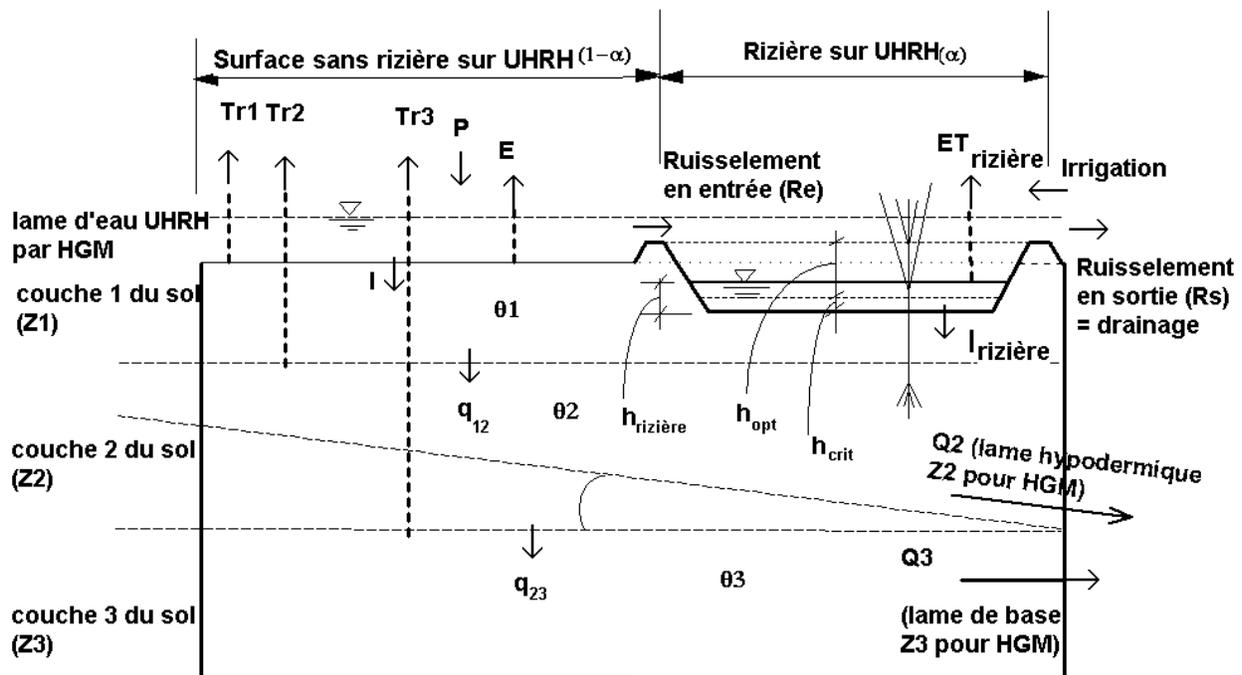


Figure 4.8 : Illustration des processus hydrologiques sur une UHRH avec une classe d'occupation rizière

Les variables de la figure 4.8 sont présentées dans le tableau 4.4.

Tableau 4.4 : Définition des variables de la figure 4.8

Variables	Unités	Définition
$\alpha_{rizière}$	%	Fraction des rizières sur l'UHRH
$h_{rizière}$	m	Hauteur d'eau sur la rizière
h_{opt}	m	Hauteur optimale
h_{crit}	m	Hauteur critique
$ET_{rizière}$	m	Évapotranspiration du riz
$I_{rizière}$	m	Infiltration au fond de la rizière
Rs	m	Ruissellement qui sort de la rizière
$R.e$	m	Ruissellement qui entre dans la rizière
Irr	m	Irrigation
Z_1, Z_2, Z_3	m	Profondeur des couches 1, 2 et 3
$\theta_1; \theta_2; \theta_3$		Teneur en eau dans les couches 1, 2 et 3
P	m	Précipitation
Tr_1, Tr_2, Tr_3	m	Transpiration des trois couches
E	m	Évaporation du sol nu
I	m	Infiltration
q_{12}	m	Écoulement vertical entre les couches 1 et 2
q_{23}	m	Écoulement vertical entre les couches 2 et 3
$Q_{2,3}$	m ²	Écoulement latéral des couches 2 et 3

(ii) Implémentation selon la structure temporelle

Les données météorologiques disponibles sont fournies au pas de temps journalier. Le pas de temps retenu pour les simulations des processus hydrologiques dans les rizières est également une journée.

4.4.2.2 Algorithme du bilan d'eau dans une rizière

À partir de l'équation de base 4.1, le bilan d'eau dans un casier rizicole s'exprime par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} h^i &= h^{i-1} + [P^i + Irr^i + R.e^i + Ap.e^i - Inf_{rizière}^i - ET^i - R.s^i - Ap.s^i] \\ &= h^{i-1} + P^i + Irr^i - Inf_{rizière}^i - ET^i + [R.e^i - R.s^i] + [Ap.e^i - Ap.s^i] \end{aligned} \quad (\text{Éq. 4.4})$$

Avec :

- h^{i-1} : hauteur d'eau dans la rizière au jour $i-1$ (m);
- h^i : hauteur d'eau dans la rizière au jour i (m);
- P^i : précipitation au jour i (m);
- Irr^i : apport d'eau par irrigation dans la rizière au jour i (m);
- $R.e^i$: lame d'eau stockée par ruissellement de surface dans la rizière au jour i (m). Fortin *et coll.* (1995), Fortin et Royer (2004), ont défini que, sur la surface de l'UHRH, une lame d'eau de ruissellement est déterminée comme étant la différence entre la pluie et l'infiltration. Une portion de cette lame d'eau provenant du ruissellement est stockée dans la rizière selon la fraction occupée des terres par les rizières dans l'UHRH. Le reste du ruissellement sur l'UHRH rejoint directement le réseau hydrographique par l'entremise d'un hydrogramme géomorphologique (Fortin *et coll.*, 1995). Ainsi, la variable $R.e^i$ est calculée selon l'équation suivante :

$$R.e^i = \alpha_{(rizière)} R.e_{(i)}^{UHRH} \quad (\text{Éq. 4.5})$$
 - $\alpha_{(rizière)}$: fraction de la surface de l'UHRH occupée par les rizières;
 - $R.e_{(i)}^{UHRH}$: lame d'eau de ruissellement calculée par BV3C dans HYDROTEL (m) pour cette UHRH;
- $R.s^i$: lame d'eau nécessaire au drainage d'une rizière pour maintenir la hauteur d'eau dans la rizière à la hauteur optimale selon la période de croissance du riz. Dans HYDROTEL (Fortin *et coll.*, 1995), l'écoulement à la surface de l'UHRH rejoint directement le réseau hydrographique par l'entremise d'un hydrogramme géomorphologique. Pour l'implémentation du sous-modèle de rizières, la quantité d'eau de drainage ($R.s$) est ajoutée à la lame de ruissellement sur l'UHRH préalablement calculée par HYDROTEL.

- $Ap.e^i$ et $Ap.s^i$: infiltration latérale en entrée et en sortie de la rizière au jour i . Selon le théorème de la conservation de la masse, l'écoulement souterrain dans chaque couche du sol d'une UHRH comportant une aire de rizière peut être calculé de la manière suivante :

$$Ap.e_{(i)} - Ap.s_{(i)} = \alpha_{(rizière)} \left[\frac{(h_{opt} - h_1)}{h_2} Hyp_{(i)}^{UHRH} + \frac{(h_{opt} - h_1 - h_2)}{h_3} Hbase_{(i)}^{UHRH} \right] \text{(Éq. 4.6)}$$

- $\alpha_{(rizière)}$: fraction de surface des rizières sur l'UHRH;
- h_{opt} : hauteur optimale d'eau (m);
- $h_1; h_2; h_3$: épaisseurs des couches 1, 2 et 3 dans le sous-modèle BV3C (m);
- $Hyp_{(i)}^{UHRH}$: lame d'eau (m) dans l'écoulement hypodermique vers la deuxième couche selon le BV3C (Fortin *et coll.*, 1995; Fortin et Royer, 2004);
- $Hbase_{(i)}^{UHRH}$: lame d'eau (m) dans l'écoulement de base dans la troisième couche par BV3C (Fortin *et coll.*, 1995; Fortin et Royer, 2004).

- $Inf_{rizière}^i$: infiltration verticale dans la rizière au jour i . Le processus d'infiltration varie selon l'état du sol, à savoir selon que le sol est inondé ou non inondé.
 - Dans la phase de sol non inondé : l'infiltration sur les rizières est déterminée selon la simulation d'infiltration de l'UHRH par le BV3C :

$$Inf_{rizière}^i = Inf_{S1}^{UHRH} \text{(Éq. 4.7)}$$

- Dans la phase de sol inondé : dans HYDROTEL (Fortin *et coll.*, 1995; Fortin et Royer, 2004), l'infiltration à l'échelle de l'UHRH est simulée selon la loi de Darcy. Ainsi, selon Fortin *et coll.*, 1995, on peut adopter un taux d'infiltration correspondant à la conductivité hydraulique à saturation de la première couche de sol. Mais celle-ci ne tient pas compte de l'influence du labour du sol. L'équation adaptée dans cette thèse pour calculer l'infiltration considère cette variable comme une fonction du type de sol et de la couche de labour (Tuong *et coll.*, 2005) ainsi que du stade de croissance des rizières (FAO, 1990; Khepar *et coll.*, 2000; Janssen et Lennartz, 2007). L'équation suivante a été adoptée :

$$Inf_{rizière}^i = K_{inf}^i * Inf_{S1}^{UHRH} \text{(Éq. 4.8)}$$

Avec $K_{inf(i)}$: gradient de charge hydraulique qui tient compte de l'influence du labour de la rizière. Cette variable est appelée coefficient d'infiltration des rizières. Il s'agit d'un paramètre d'ajustement du modèle.

Inf_{S1}^{UHRH} : infiltration dans la première couche de sol dans l'UHRH.

- ET^i : évapotranspiration dans une rizière au jour i . Son estimation est obtenue à partir de l'évaporation potentielle et doit tenir compte de l'état de la rizière au cours de l'année. Ainsi, l'évapotranspiration dans une rizière est calculée en fonction de l'état du sol. Selon la figure 4.6, il existe trois états possibles du sol dans une rizière au cours de l'année :

(i) État du sol inondé avec rizière qui correspond à la période de culture du riz, avec le coefficient de culture du riz qui tient compte de la période de croissance du riz :

$$ET^i = K_{rizière}^k ETP_{UHRH}^i \quad (\text{Éq. 4.9})$$

Avec

- k : stade de la plante dans son cycle de croissance (1, 2 ou 3);
- $K_{rizière}^k$: coefficient cultural du riz;
- ETP_{UHRH}^i : évapotranspiration potentielle sur l'UHRH au jour i calculée par HYDROTEL (m).

(ii) État du sol inondé sans riz, ce qui correspond aux trois phases suivantes : (1) période de repos du sol avec eau (2) phase de préparation du sol en saison des pluies et (3) phase de préparation du sol en saison sèche (voir figure 4.6). L'évaporation est alors celle du sol nu

Les travaux de Fortin et Royer (2004a) démontrent cependant que cette approche, plus complexe, ne permet pas une amélioration significative des simulations menées à un pas de temps journalier. Ainsi, la simplification suivante a été adoptée pour une rizière :

$$ET^i = ETP_{UHRH}^i \quad (\text{Éq. 4.10})$$

(iii) État du sol non inondé sans rizière, qui correspond à la phase de repos du sol en saison sèche. L'évaporation réelle dans ce cas est fonction de l'ETP et de l'humidité du sol au jour i :

$$ET^i = ETP_{UHRH}^i \quad (\text{Éq. 4.11})$$

Dans l'équation 4.4, les sous-modèles actuels de HYDROTEL permettent de déterminer toutes les variables sauf trois, à savoir: h^i , Irr^i et $R.s^i$.

4.4.2.3-Conditions nécessaires pour la gestion de l'irrigation et du drainage dans la rizière

Le bilan d'eau dans la rizière selon l'équation 4.4 doit être contraint par les règles de gestion de l'irrigation et du drainage des rizières pour chaque période de croissance. Ainsi, la double inégalité suivante devra être vérifiée en tout temps :

$$h_{crit}^k \leq h^i \leq h_{opt}^k \quad (\text{Éq. 4.12})$$

Avec:

h^i : hauteur d'eau dans la rizière au jour i (m);

h_{crit}^k : hauteur critique d'eau dans la rizière durant la période de croissance k (m);

h_{opt}^k : hauteur optimale d'eau dans la rizière durant la période de croissance k (m).

4.4.3 Simulation des processus hydrologiques dans les rizières

4.4.3.1 Résolution des équations dans HYDROTEL

Dans l'équation 4.4, on doit déterminer à chaque pas de temps les valeurs des inconnues qui sont Irr^i , $R.s^i$ et h^i tandis que les autres variables sont fournies par HYDROTEL ou par d'autres calculs :

- D'abord, au premier pas de temps $i-1$, la hauteur d'eau initiale dans la rizière est connue (valeur initiale).
- Ensuite, on vérifie les conditions suivantes :
 - La condition 1 pour calculer le volume d'eau d'irrigation : Si $h^{i-1} \leq h_{crit}^k$ alors l'irrigation est nécessaire sur une hauteur d'eau de :

$$Irr^i = h_{opt}^k - h_{crit}^k \quad (\text{Éq. 4.13})$$

- La condition 2 pour calculer l'irrigation : Si $h^{i-1} > h_{crit}^k$ alors :

$$Irr^i = 0 \quad (\text{Éq. 4.14})$$

- La condition 3 pour déterminer la quantité d'eau excédentaire : Si $h^{i-1} > h_{opt}^k$ alors un drainage d'eau excédentaire est nécessaire:

$$R.s^i = h^{i-1} - h_{opt}^k \quad (\text{Éq. 4.15})$$

- La condition 4 pour déterminer la quantité d'eau excédentaire : Si h^{i-1} est inférieure à h_{opt}^k alors:

$$R.s^i = 0 \quad (\text{Éq. 4.16})$$

- Enfin, pour chaque pas de temps, la hauteur d'eau dans la rizière est calculée à partir du bilan de masse (voir équation 4.4).

Pour rappel, la définition des variables est présentée au tableau 4.4 à la section 4.3.2.1.

4.4.3.2- Mise à jour des variables dans HYDROTEL

L'utilisation d'un concept de couches (p. ex. présence d'une couche de rizières dans une UHRH) amène à apporter des modifications dans les différentes variables pour tenir compte du stockage d'eau dans une rizière ou du drainage d'eau excédentaire sur une UHRH. L'algorithme de simulation du fonctionnement des rizières intégré dans HYDROTEL permet de trouver les valeurs inconnues des variables associées aux processus hydrologiques des rizières. Ainsi, des modifications sont apportées aux différentes lames d'eau initialement calculées par HYDROTEL pour tenir compte de l'effet ou de la présence des rizières sur une UHRH. En d'autres termes, ces rizières modifient certaines variables du modèle HYDROTEL pour simuler le fonctionnement hydrologique des rizières :

- **La lame d'eau à la surface (ruissellement de surface) de l'UHRH** : cette lame sera modifiée par la lame d'eau stockée dans la rizière ($R.e$) et par la lame d'eau de drainage éventuel de la rizière ($R.s$). On recalcule alors la lame d'eau de ruissellement à la surface de l'UHRH à chaque pas de temps :

$$R.e_{UHRH_nouvelle}^i = R.e_{UHRH}^i - \alpha_{rizière} \times R.e_{UHRH}^i + \alpha_{rizière} \times R.s^i \quad (\text{Éq. 4.17})$$

Avec :

- $R.e_{UHRH}^i$: valeur initiale calculée par l'algorithme actuel de BV3C;
 - $R.e_{UHRH_nouvelle}^i$: nouvelle lame d'eau sur l'UHRH mise à jour et devant servir au calcul de l'hydrogramme géomorphologique pour l'écoulement vers l'exutoire de l'UHRH;
 - $\alpha_{rizière} \times R.e_{UHRH}^i$: stockage d'eau dans la rizière;
 - $\alpha_{rizière} \times R.s^i$: lame d'eau disponible pour le drainage (cas des pluies).
- **Lame d'eau dans la deuxième couche** : Celle-ci sera influencée par : (i) l'infiltration qui change en fonction des conditions comme le labour du sol et le degré de saturation du

sol; et (ii) la quantité d'eau d'infiltration provenant de la rizière en saison sèche (négligeable). Dans HYDROTEL, la nouvelle valeur mise à jour est la suivante :

$$Hyp_{UHRH_nouvelle}^i = Hyp_{UHRH}^i - \alpha_{rizière} \times (1 - K_{inf_{rizière}}) \quad (\text{Éq. 4.18})$$

- **Lame d'eau dans la troisième couche** : le processus de l'écoulement est automatiquement simulé à partir du débit provenant de la couche supérieure et de la teneur en eau dans la couche 3.

4.4.4 Organigramme

Une synthèse des variables utilisées dans le sous-modèle des rizières est présentée au tableau 4.5.

Tableau 4.5 : Variables dans le code du sous-modèle des rizières

Variables	Unités	Définition
i	j	Jour (jour de l'année)
$\alpha_{rizière}$		Fraction de la superficie occupée par des rizières dans l'UHRH
IF		Indice foliaire
PR		Profondeur racinaire
k		Stade de croissance du riz
h_{opt}^k	m	Hauteur optimale au stade de la plante k
h_{crit}^k	m	Hauteur critique au stade de la plante k
$K_{rizière}^k$		Coefficient cultural au stade de la plante k
K_{inf}^k		Coefficient d'infiltration au stade de la plante k
p^i	m	Précipitation au jour i
Inf_{UHRH}^i	m	Infiltration sur l'UHRH au jour i
ETP_{UHRH}^i	m	Évapotranspiration potentielle sur l'UHRH au jour i
$R.e_{UHRH}^i$	m	Lame d'eau de ruissellement à la surface de l'UHRH au jour i
$R.e^i$	m	Ruissellement de surface en entrée dans la rizière au jour i
Inf^i	m	Infiltration verticale au fond de la rizière au jour i
ET^i	m	Évapotranspiration du riz au jour i
Irr^i	m	Irrigation au jour i
$R.s^i$	m	Hauteur excédentaire (drainage) au jour i
h^i	m	Hauteur d'eau dans la rizière au jour i
V_m	m	Volume mort du lac (pour le sous-modèle de gestion du lac; voir section 5.3)
$R.e_{UHRH_nouvelle}^i$	m	Nouvelle lame d'eau à la surface de l'UHRH au jour i ou mise à jour de la lame d'eau à la surface de l'UHRH après stockage dans les rizières dans l'UHRH
Hyp_{UHRH}^i	m	Lame d'eau dans la 2 ^e couche de l'UHRH au jour i
$Hyp_{UHRH_nouvelle}^i$	m	Nouvelle lame d'eau dans la 2 ^e couche de l'UHRH au jour i

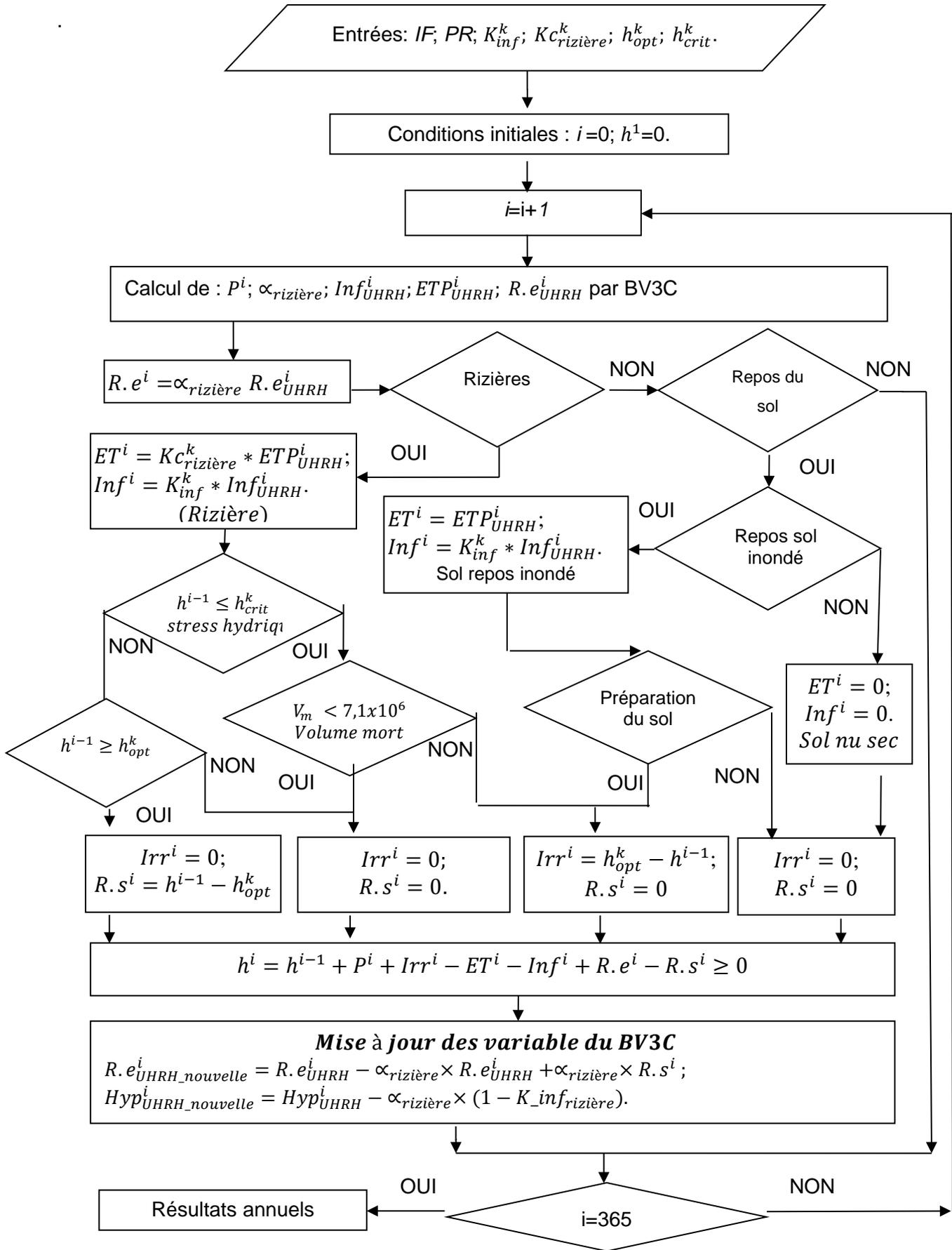


Figure 4.9 : Organigramme implémenté dans HYDROTEL

4.5 Synthèse

Le modèle HYDROTEL (Fortin *et coll.*, 1995) a été présenté dans ce chapitre. Dans le cas d'étude du bassin versant de la rivière Cong, la simulation des processus hydrologiques dans les rizières a nécessité l'introduction de nouveaux concepts. Un nouveau schéma de la structure de simulation dans HYDROTEL a permis d'intégrer les processus hydrologiques des rizières et d'irrigation. L'implémentation des sous-modèles a nécessité des modifications tout en suivant la structure initiale d'HYDROTEL.

Le sous-modèle des rizières qui a été développé est un modèle à base physique. Il est basé sur le principe de conservation de la masse. Les algorithmes d'implémentation du sous-modèle des rizières et la résolution des équations ont été présentés dans ce chapitre. Aux paramètres d'ajustement d'HYDROTEL existant dans sa version initiale, deux paramètres d'ajustement supplémentaires ont été introduits qui sont propres aux rizières : le coefficient de culture du riz K_c , intervenant dans le calcul de l'évapotranspiration du riz, et le coefficient d'infiltration des rizières K_{inf} , intervenant dans le calcul de l'infiltration dans les rizières.

5. Modèle de gestion du lac et implémentation dans HYDROTEL

5.1 Introduction

Dans le bassin versant de la rivière Cong, la culture la plus importante est la culture du riz. La culture du riz demande d'abondantes quantités d'eau. Pour satisfaire ces besoins en eau, un réservoir artificiel et un système de canaux d'irrigation ont été construits entre 1973 et 1976. La mise en service du réservoir s'est effectuée en 1977. Actuellement, le lac est utilisé à différentes fins. Il sert à l'alimentation industrielle et domestique pendant toute l'année. En saison des crues, il est utilisé pour la régulation des débits. En saison sèche, il sert à l'irrigation des rizières tant à l'extérieur qu'à l'intérieur du bassin et fournit un débit de service au barrage Thachuong. La réalisation de cet ouvrage-réservoir a grandement modifié l'écoulement de la rivière par rapport à l'écoulement naturel. On peut croire qu'actuellement les ressources en eau dans ce bassin versant sont exploitées au maximum. La répartition de la ressource entre les différents consommateurs a créé des conflits. En raison des différentes demandes, la demande en eau pour les rizières n'est pas garantie, ce qui a pour effet de réduire le rendement de la production en riz. Il nous apparaît donc comme nécessaire d'évaluer l'impact sur le développement rizicole des autres demandes en eau et de la gestion du lac pour les satisfaire.

Dans le modèle HYDROTEL, il existe des fonctions permettant de gérer des lacs, des barrages ou des prises d'eau, mais ces fonctions ne sont pas adaptées à la problématique de l'irrigation. Et ce, particulièrement, en ce qui a trait à la gestion du lac Nuicoc. Il faut donc développer des fonctionnalités à ajouter à HYDROTEL pour pouvoir gérer le lac. Il est évident que ces fonctionnalités devraient être intégrées en tenant compte des protocoles et des procédures qui y sont déjà implantées.

5.2 Gestion du lac et opération d'irrigation

5.2.1 Gestion du lac et opération d'irrigation

Le bassin versant de la rivière Cong couvre une superficie de 905 km² (IPRE, 2004 et 2008). Dans ce chapitre, on veut connaître l'impact du réservoir sur le régime d'écoulement naturel de la rivière et la capacité du réservoir à satisfaire les besoins en eau pour la culture du riz en période sèche. Ainsi, la période retenue s'étend de 1961 à 2009, soit une période de 49 ans. La période s'arrête en 2009, car nous ne disposons pas de données après cette année. Le choix de cette période est justifié par le fait qu'elle inclut la période durant laquelle des aménagements

d'infrastructures (construction de lacs artificiels, de canaux d'irrigation, etc.) ont été réalisés sur le territoire du bassin, ce qui a modifié les conditions d'écoulement naturel. Ces aménagements ont été réalisés à partir de 1973 pour irriguer les rizières en période sèche, ce qui a permis d'augmenter le nombre annuel de rotations de culture de riz à partir de 1977.

5.2.2 Gestion du lac

5.2.2.1 Paramètres principaux du lac Nuicoc

Durant la saison des pluies, la surface du lac est d'environ 25 km² avec un niveau d'eau maintenu en général à 46,2 m. Cette surface varie d'une saison à l'autre dans l'année. L'exutoire du lac comprend deux sorties (figure 5.1) : (i) un seuil déversoir dont la crête est à un niveau de 41,2 m (figure 5.2) au-dessus duquel sont installées cinq portes d'une largeur de cinq mètres et d'une hauteur de huit mètres. On soulève ces portes pour laisser écouler l'eau afin de réguler le niveau du lac en cas de nécessité et principalement pendant la saison des pluies; (ii) l'autre sortie est constituée de deux vannes situées à une altitude de 34 m. Ces deux vannes d'un diamètre de 1,7 m servent à la gestion des demandes en eau (figure 5.2).

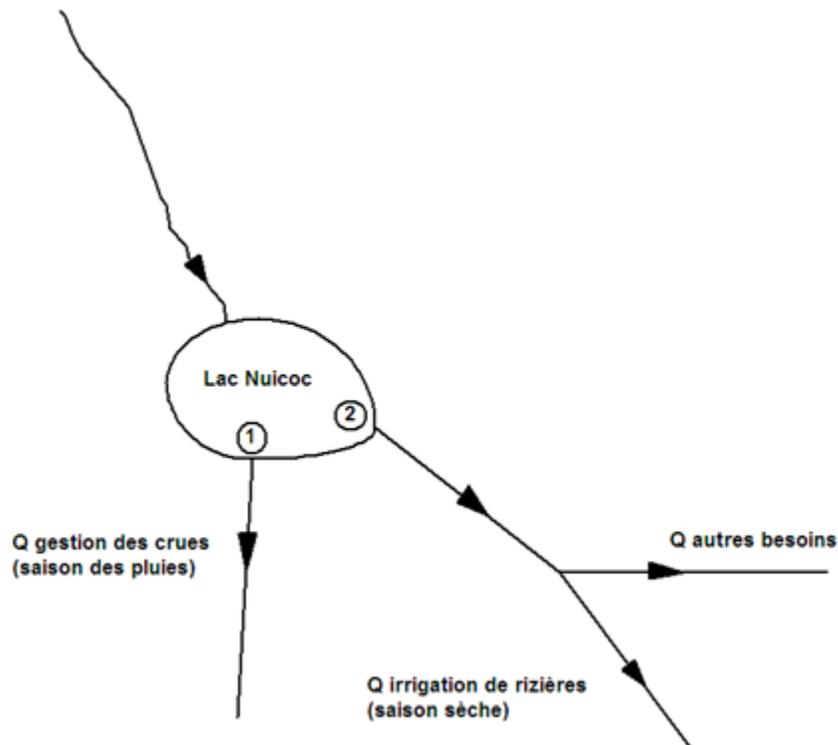


Figure 5.1 : Schéma simple d'opération du lac Nuicoc

Q : débits; (1) : déversoir et (2) : vannes d'irrigation et des autres besoins.

Le niveau de gestion a été fixé à 46,2 m lors de la conception, ce qui correspond à un volume de $175 \times 10^6 \text{ m}^3$ (figure 5.2). Le volume utile du lac pour les services de consommation tels que l'irrigation, l'alimentation des industries et le soutien au barrage Thachuong est de $167,9 \times 10^6 \text{ m}^3$. Lors de la conception, on a aussi imposé que le niveau minimal du lac ne devait pas être inférieur à 34 m. Ainsi le volume mort du lac est de $7,1 \times 10^6 \text{ m}^3$, ce qui correspond au niveau d'eau de 34 m. Ces données vont permettre de définir les contraintes de volume et/ou de niveau pour gérer l'exploitation du réservoir. Si l'on veut connaître l'évolution du niveau du lac au cours de sa période d'exploitation, on doit disposer d'une relation hauteur vs volume. À l'inverse, si l'on s'intéresse au volume en fonction du niveau d'eau dans le lac, on doit disposer d'une relation volume vs hauteur.

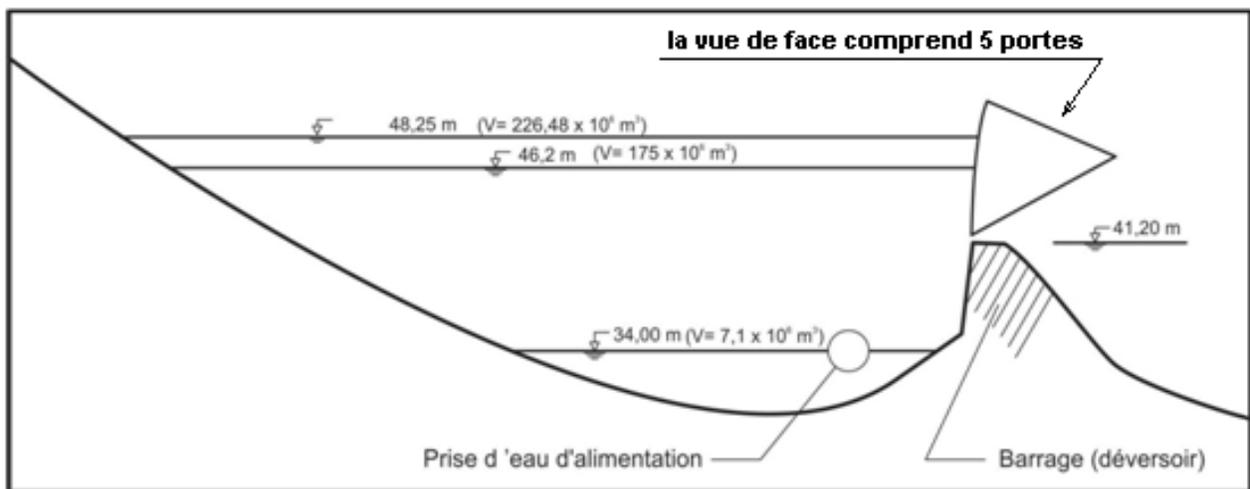


Figure 5.2 : Illustration des paramètres du lac Nuicoc

Selon Ngo (2013) et selon les données disponibles à partir de la carte des courbes de niveau dans le bassin versant, les données relatives au niveau et au volume du lac sont présentées aux tableaux A.5.1 et A.5.3 en Annexe.

Deux relations permettent de tenir compte de l'évolution du volume et du niveau d'eau dans le lac :

- (i) Le volume du lac varie en fonction de son niveau. La relation qui unit ces deux quantités physiques est exprimée par l'équation 5.1 :

$$y = -8715,91 \times 10^{-6}x^3 + 1,97 x^2 - 102,03x + 1542,28 \quad (\text{Éq.5.1})$$

où x correspond au niveau en m et y est le volume en 10^6 m^3 .

La courbe illustrant cette relation est présentée à la figure 5.3. On retrouve au tableau A.5.1 en Annexe les données qui ont été utilisées pour établir cette courbe et aux fins de comparaison les valeurs obtenues (simulées) à partir de cette équation.

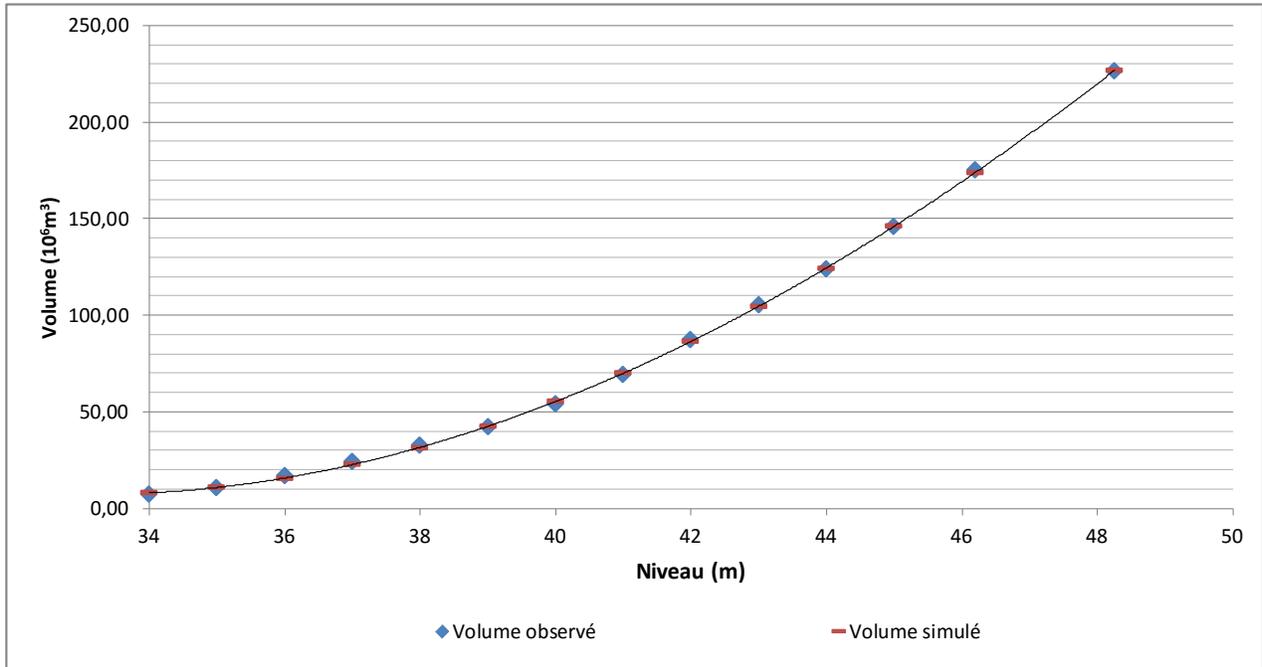


Figure 5.3 : Courbe de la relation volume-niveau

À partir de la relation volume vs niveau, on va déterminer la surface moyenne du lac (tableau A.5.2 en Annexe), qui varie en fonction de son élévation. La relation qui unit ces deux quantités physiques est exprimée par l'équation 5.2 et la figure 5.4 :

$$y = -7,1510^{-3} x^3 + 0,86 x^2 - 32,74x + 399,88 \quad (\text{Éq. 5.2})$$

où x correspond au niveau en m et y est la surface du lac en km^2 .

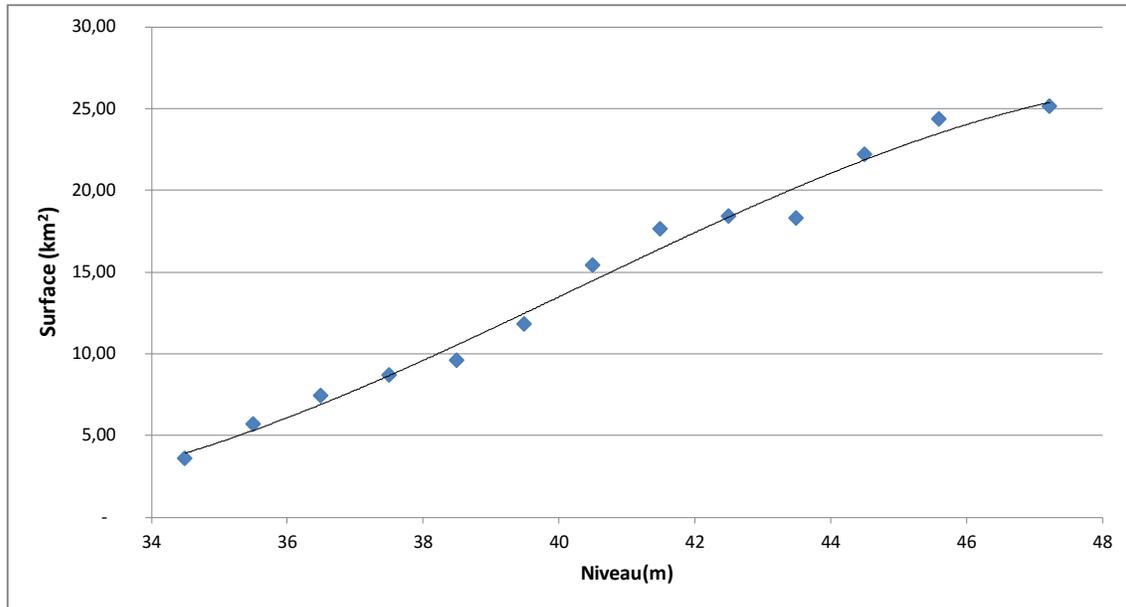


Figure 5.4 : Courbe de la relation surface moyenne-niveau

- (ii) Le niveau du lac varie en fonction de son volume. La relation qui associe ces deux quantités physiques est exprimée par l'équation 5.3 :

$$y = -1,38 \cdot 10^{-6}x^4 + 7,98 \cdot 10^{-6}x^3 - 1691,5610^{-6}x^2 + 0,20x + 32,94 \quad (\text{Éq. 5.3})$$

où : y est le niveau en m et x est le volume en 10^6 m^3 .

La courbe représentant cette relation est présentée à la figure 5.5. On retrouve au tableau A.5.3 en Annexe les données qui ont été utilisées pour établir cette courbe et, aux fins de comparaison, les valeurs obtenues (simulées) à partir de cette équation.

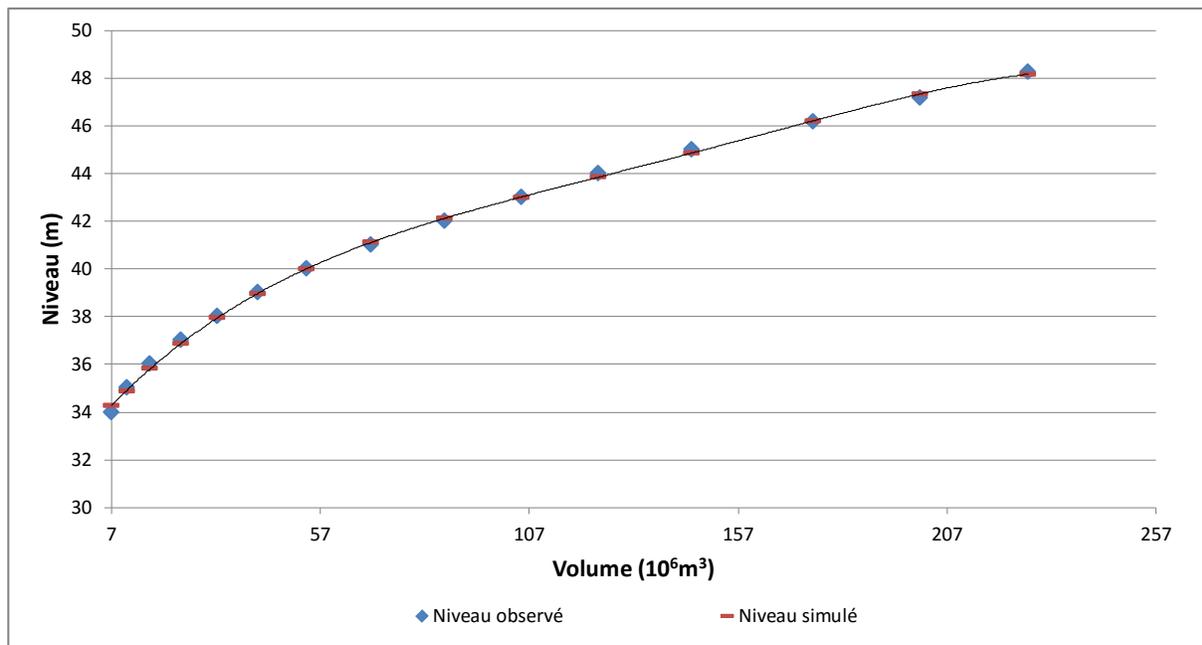


Figure 5.5 : Courbe de la relation niveau-volume

5.2.2.2 Gestion du déversoir

Le rôle du déversoir est de réguler le niveau d'eau durant la saison des pluies lorsque celui-ci dépasse le seuil pour le barrage, soit afin de maintenir un niveau d'eau maximal de 46,2 m. Le volume d'eau utile correspondant à ce niveau d'eau de $168 \times 10^6 m^3$ et permet de satisfaire les besoins de consommation. Exceptionnellement, le niveau d'eau du lac peut s'élever jusqu'à 48,25 m, ce qui correspond à un volume de $226,48 \times 10^6 m^3$. À ce niveau, le déversoir laisse passer un débit de $830 m^3/s$, ce qui correspond au débit de conception $Q^{1\%}$, c'est à dire une fois dans cent ans (Henk *et coll.*, 2005; IPRE, 2004 et 2008).

5.2.2.3 Gestion des vannes d'irrigation pour la satisfaction des besoins de consommation

Selon IPRE (2004 et 2008), le lac Nuicoc a été conçu pour différentes raisons. Il sert à l'irrigation de rizières à l'intérieur (quatre secteurs agricoles au total; voir figure 3.12 dans la section 3.3.3) et à l'extérieur du bassin versant de la rivière Cong. Il sert également à alimenter en eau les industries de la ville de Thai Nguyen avec un débit de $7,2 m^3/s$ (Henk *et al.*, 2005) et le barrage Thachuong, situé sur la rivière Cau et ayant un impact à l'extérieur du bassin versant étudié.

Les différents usages du lac sont répartis au fil des saisons. En saison sèche, l'irrigation des rizières situées à l'intérieur comme à l'extérieur du bassin versant nécessite un apport provenant

du lac. Il en est de même pour l'alimentation du barrage Thachuong. Par contre, en ce qui concerne le barrage, les débits d'eau utilisés varient d'un mois à l'autre. Les besoins en eau des industries basées à Thai Nguyen sont satisfaits par le lac avec un débit constant durant quelques heures/jour, et ceci pendant toute l'année, autant durant la saison sèche que durant la saison des pluies.

La répartition des débits d'eau fournis par le lac pour chacun de ces usages est la suivante :

(i) Consommation industrielle

Selon Henk *et coll.* (2005), à partir de la conception initiale du lac Nuicoc, celui-ci fournit un débit constant de $7,2 \text{ m}^3/\text{s}$ à l'industrie tout au long de l'année. Cependant, selon IPRE (2004 et 2008), le débit utilisé à des fins industrielles serait maintenant de $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ en raison d'une diminution de la production industrielle dans la région.

(ii) Alimentation du barrage Thachuong

Selon Henk *et coll.* (2005), pendant les trois mois de la période d'étiage en saison sèche, la quantité d'eau sur la rivière Cau ne suffit plus pour répondre aux besoins d'irrigation des rizières situées à l'extérieur du bassin versant étudié. Alors l'eau nécessaire à l'irrigation de ces rizières est fournie à partir du lac, au barrage Thachuong. Les données relatives à ce besoin d'irrigation en janvier, février et mars, qui sont les mois de culture du riz en période sèche, sont respectivement de $9,2 \text{ m}^3/\text{s}$, $7,1 \text{ m}^3/\text{s}$ et $4,3 \text{ m}^3/\text{s}$.

(iii) Irrigation des rizières du bassin versant à l'étude

Le réseau de canaux d'irrigation employé pour la riziculture est construit de telle manière que l'eau puisse s'écouler par gravité des canaux de niveau supérieur vers ceux de niveau inférieur. Des vannes sont installées sur les différents canaux pour gérer l'approvisionnement en eau des rizières. Celles-ci jouent un rôle crucial dans les opérations d'irrigation. En effet, elles permettent d'alimenter les canaux de niveau inférieur puis les parcelles rizicoles en cas de nécessité. Les vannes sont ouvertes pour irriguer les rizières par gravité en tenant compte du niveau initial d'eau dans les casiers rizicoles et de la phase de croissance de la plante (IPRE, 2004). Par conséquent, les volumes d'eau à la sortie des canaux secondaires dépendent de la demande en eau dans les différentes rizières du bassin versant. Dans la pratique, l'irrigation des parcelles est faite par les paysans qui ouvrent et ferment manuellement les vannes des canaux secondaires en fonction de la demande en eau dans les différentes parcelles agricoles. On peut procéder de deux façons différentes pour irriguer les rizières: (1) les vannes sont simultanément ouvertes pour irriguer toutes les parcelles au même moment; (2) les vannes sont ouvertes à tour de rôle

pour distribuer l'eau par rotation et en tenant compte des besoins des parcelles. Dans les deux cas, les vannes sont fermées une fois que les niveaux d'eau souhaités dans les casiers rizicoles sont atteints.

La région à l'étude est divisée en plusieurs secteurs rizicoles (figure 3.12 de la section 3.3.3). Un canal est affecté à chaque secteur en tenant compte de la proximité du secteur avec le tronçon de canal. Ce canal sert à l'irrigation du secteur qui lui est affecté. Le tableau 3.4 de la section 3.3.3, présenté précédemment, résume les différents secteurs, les canaux responsables de l'irrigation de chacun des secteurs agricoles et les surfaces occupées par les rizières dans ces différents secteurs.

5.3 Concept et implémentation de la gestion du lac

5.3.1 Concept d'écoulement en lac

Selon Fortin *et coll.* (1995) et Fortin et Royer (2004), le modèle d'écoulement en lac dans HYDROTEL est exprimé par deux formules : (i) un bilan de masse sur l'ensemble du lac et (ii) une relation entre le débit sortant du lac et la hauteur d'eau sur le seuil.

Dans le cas d'étude, il existe deux sorties : (i) un déversoir et (ii) une sortie pour la vanne d'irrigation. Les équations qui expriment le bilan de masse dans le lac s'expriment par:

$$\Delta V_{lac} = V_e - V_p - V_{cs} - V_s \quad (\text{Éq. 5.4})$$

Où : ΔV_{lac} : variation du volume (m³);

V_e : volume entrant dans le lac (m³);

V_p : pertes par infiltration et par évaporation (m³);

V_{cs} : volume des consommations - irrigation, industries, villes (m³);

V_s : volume sortant du lac (m³).

Certaines contraintes sont imposées au niveau de l'eau dans le lac. En effet, la hauteur dans le réservoir devrait respecter la relation suivante:

$$H_{lac} \leq 46,2 \text{ m} \quad (\text{Éq. 5.5})$$

Cependant, le niveau d'eau peut atteindre 48,25 m dans un contexte de gestion de crues exceptionnelles. De plus, à la sortie du lac où se situe la vanne d'irrigation, le niveau minimal devrait respecter la contrainte suivante :

$$H_{lac} \geq 34,0 \text{ m} \quad (\text{Éq. 5.6})$$

5.3.2 Algorithme implémenté pour la gestion du lac

Le processus de gestion du lac implémenté dans la structure du modèle HYDROTEL est présenté à la figure 5.6.

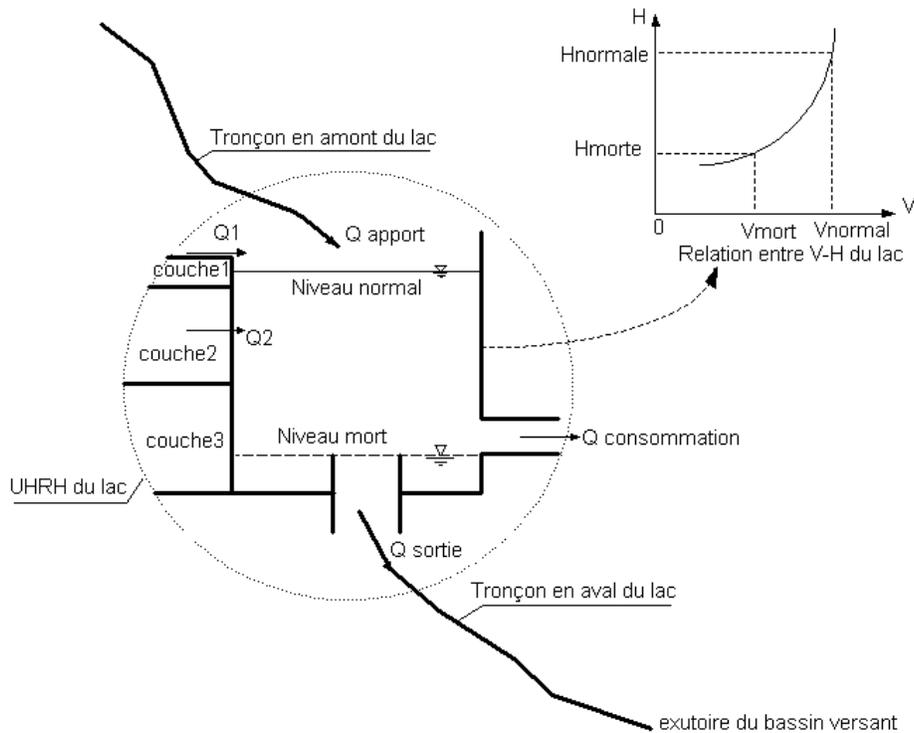


Figure 5.6 : Illustration de la gestion du lac dans HYDROTEL

Q_1 : débit de ruissellement arrivant au lac; Q_2 : débit provenant de l'écoulement hypodermique du reste de l'UHRH; couches 1, 2 et 3 : numéros des couches selon le concept de découpage en couches d'HYDROTEL

5.3.2.1 Bilan d'eau dans le lac

À partir de l'équation de base 5.4, le bilan d'eau dans le lac qui a été incorporé au modèle HYDROTEL s'écrit de la façon suivante:

$$V_{lac}^i = V_{lac}^{i-1} + (V_e^i - V_p^i) - V_s^i - V_{cs}^i \quad (\text{Éq. 5.7})$$

Où:

- V_{lac}^{i-1} : volume d'eau du lac à la fin du jour $i-1$ (m^3);
- V_{lac}^i : volume d'eau du lac au jour i (m^3);
- V_p^i : volume des pertes par évaporation et par infiltration d'eau du lac au jour i (m^3); les pertes par infiltration étant considérées comme négligeables, ce terme n'exprime que :

$$V_p^i = ET^i \times S_{lac}^i \quad (\text{Éq. 5.8})$$

- ET^i : perte au jour i par évaporation dans le lac, qui sera calculée par l'algorithme du BV3C (m);
- S_{lac}^i : surface du lac au jour i , qui sera déterminée par l'équation de la relation surface vs élévation du lac (m^2) (éq. 5.2);
- V_e^i : quantité d'eau provenant du tronçon en amont du lac et des UHRH avoisinants du lac pendant le jour i (m^3);

$$V_e^i = (Q_{ap}^i + Q_1^i + Q_2^i) \times \Delta t \quad (\text{Éq. 5.9})$$

- Q_{ap} : débit apporté par le tronçon de rivière en amont du lac (m^3/s) (figure 5.6);
- Q_1 : débit de ruissellement qui arrive directement au lac (m^3/s) (figure 5.6);
- Q_2 : débit provenant de l'écoulement hypodermique (m^3/s) (figure 5.6);
- Δt : pas de temps (s).
- V_s^i : quantité d'eau sortant par le déversoir vers le tronçon en aval du lac le jour i (m^3);
- V_{cs}^i : quantité d'eau prélevée du réservoir le jour i pour répondre aux trois besoins de consommations :

$$V_{cs}^i = (1 + K_p)(V_{ind}^i + V_{br}^i + V_{riz}^i) \quad (\text{Éq. 5.10})$$

Où :

- K_p : coefficient moyen journalier de pertes d'eau dans les canaux d'irrigation. Ce coefficient permet de tenir compte des pertes par évaporation, par infiltration, par débordement, etc.
- V_{ind}^i : quantité d'eau prélevée le jour i pour répondre aux besoins des industries (m^3);
- V_{br}^i : quantité d'eau prélevée le jour i pour alimenter le barrage Thachuong (m^3);
- V_{riz}^i : quantité d'eau prélevée le jour i pour l'irrigation des rizières intérieures et extérieures au bassin versant à l'étude. Cette valeur est calculée comme suit :

$$V_{riz}^i = V_{r_i}^i + V_{r_e}^i \quad (\text{Éq. 5.11})$$

Où

- $V_{r_i}^i$: volume d'eau nécessaire pour l'irrigation des rizières à l'intérieur du bassin versant;
- $V_{r_e}^i$: volume d'eau nécessaire pour l'irrigation des rizières à l'extérieur du bassin versant.

Dans le sous-modèle qui a été développé dans cette thèse pour tenir compte des besoins en eau des rizières, on ne considère que les besoins en eau des rizières qui sont à l'intérieur du bassin versant. Pour déterminer la quantité d'eau d'irrigation nécessaire pour alimenter les

rizières extérieures au bassin versant, on fait les hypothèses suivantes : (i) les rizières à l'extérieur du bassin sont soumises aux mêmes conditions climatiques que celles à l'intérieur du bassin; (ii) les conditions de sol et la topographie sont aussi sensiblement les mêmes; et (iii) les règles de gestion des cultures et les besoins en eau sont identiques à celles des parcelles à l'intérieur du bassin. Ainsi, pour la gestion du réservoir, les besoins en eau des parcelles à l'extérieur du bassin versant qui sont irriguées par le même réseau de canaux d'irrigation (et non pas par le barrage Thachuong) seront considérés comme identiques, par unités de surface, à ceux des parcelles à l'intérieur du bassin. On utilisera alors un coefficient des besoins défini de la façon suivante :

$$K_c^r = \frac{S_e^r}{S_i^r} \quad (\text{Éq. 5.12})$$

Où :

- K_c^r : proportion de la surface des rizières extérieures par rapport à celles intérieures au bassin versant;
- S_e^r : surface des rizières à l'extérieur du bassin versant (ha);
- S_i^r : surface des rizières à l'intérieur du bassin versant (ha).

Pour les besoins de la gestion du réservoir, on doit tenir compte du volume d'eau nécessaire pour l'irrigation des rizières extérieures et intérieures. Ce volume est établi selon l'équation suivante :

$$V_{riz} = V_{r,i}(1 + K_c^r) \quad (\text{Éq. 5.13})$$

Où :

V_{riz} : volume total d'eau nécessaire pour irriguer les rizières à l'extérieur et à l'intérieur du bassin versant;

$V_{r,i}$: volume d'eau nécessaire pour irriguer les rizières à l'intérieur du bassin versant.

5.3.2.2-Conditions nécessaires pour la gestion du volume dans le lac

La gestion de l'eau dans le lac se fait sur la base de deux périodes annuelles. On stocke d'abord l'eau pendant la période des pluies. On doit s'assurer que le niveau du lac ne dépasse pas le niveau maximal utilisé en général pour la gestion, qui correspond au critère de conception, soit le niveau 46,2 m. Ce niveau est défini comme le niveau normal de gestion. Pendant la période sèche, on utilise l'eau pour répondre aux différents besoins de la région.

Comme les besoins dépassent largement les apports (provenant essentiellement des pluies, rares en saison sèche) pendant cette période, on vide le lac au fil des jours. Selon les critères de conception et d'aménagement de ce plan d'eau, on doit respecter un niveau minimal, soit 34 m. À ces deux niveaux correspondent des volumes dans le réservoir soit $175 \times 10^6 \text{ m}^3$ au niveau 46,2 m et $7,1 \times 10^6 \text{ m}^3$ au niveau 34 m. Le volume au niveau 34 m est appelé volume mort du lac.

Ainsi, le bilan d'eau du lac réalisé selon l'équation 5.4 doit être contraint selon la règle d'opération annuelle du lac qui est définie par l'équation 5.14 :

$$7,1 \times 10^6 \text{ m}^3 = V_m \leq V_{lac}^i \leq V_n = 175 \times 10^6 \text{ m}^3 \quad (\text{Éq. 5.14})$$

Où :

- V_m : volume mort du lac (m^3);
- V_n : volume normal du lac (m^3);
- V_{lac}^i : volume du lac au jour i (m^3).

Dans la gestion du lac, étant donné que l'on effectue le bilan des volumes, si l'on veut évaluer le niveau d'eau du lac à chaque pas de temps de simulation (jour), on doit utiliser une relation hauteur vs volume.

5.3.2.3-Relation hauteur vs volume caractéristique du lac

La relation hauteur vs volume a été définie auparavant par l'équation 5.3; on la réécrit ci-dessous sous la forme où elle sera utilisée dans l'algorithme de gestion du lac :

$$H_{lac}^i = A_1(V_{lac}^i)^4 + B_1(V_{lac}^i)^3 + C_1(V_{lac}^i)^2 + D_1(V_{lac}^i) + E_1 \quad (\text{Éq. 5.15})$$

Où :

$A_1 = -1,38 \times 10^{-6}$; $B_1 = 7,98 \times 10^{-6}$; $C_1 = -1691,56 \times 10^{-6}$; $D_1 = 0,20$; et $E_1 = 32,94$.

La relation élévation vs surface a été définie auparavant par l'équation 5.2; on la réécrit ci-dessous sous la forme où elle sera utilisée dans l'algorithme de gestion du lac :

$$S_{lac}^i = A_2(H_{lac}^i)^3 + B_2(H_{lac}^i)^2 + C_2(H_{lac}^i) + D_2 \quad (\text{Éq. 5.16})$$

Où : $A_2 = -7,15 \times 10^{-3}$; $B_2 = 0,86$; $C_2 = -32,74$; et $D_2 = 399,88$.

5.3.3 Mode opérationnel pour la simulation de la gestion du lac

Afin d'assurer une simulation rationnelle de la gestion du lac, on va débiter la gestion au 1^{er} janvier, comme ce sera le cas pour le reste de l'algorithme de simulation hydrologique des rizières. On sait que généralement à cette date, le lac est plein, c'est-à-dire qu'il a atteint au moins sa cote de gestion normale qui est de 46,2 m. Ainsi, pour démarrer la simulation, on fait l'hypothèse que le lac a atteint sa cote de gestion normale.

Si l'on se reporte aux équations 5.7; 5.14 et 5.15, les valeurs à calculer à chaque pas de temps i par le sous-modèle de gestion du lac sont V_{lac}^i ; H_{lac}^i ; V_s^i ; les autres valeurs sont fournies par HYDROTEL ou par le gestionnaire.

- D'abord, au premier pas de temps, qui correspond au 1^{er} janvier de l'année, le lac est plein et donc le volume du lac est à la valeur de volume normal;
- Ensuite, à chaque pas de temps suivant, on va vérifier si les volumes résiduels dans le lac respectent les contraintes de gestion. Les valeurs inconnues seront déterminées après avoir vérifié les deux contraintes suivantes :

(i) Si $V_{lac}^i \leq V_m = 7,1 \times 10^6 m^3$, alors aucun prélèvement d'eau ne sera effectué dans le lac. Par conséquent,

$$V_s^i = 0 \text{ et } V_{cs}^i = 0$$

(ii) Si $V_{lac}^i \geq V_n = 175 \times 10^6 m^3$ alors

$$V_s^i = V_{lac}^i - V_n = V_{lac}^i - 175 \times 10^6 m^3$$

Dans ce cas, il s'agit de faire évacuer l'excédent d'eau par le déversoir pour que le niveau d'eau dans le réservoir revienne à son niveau normal.

Le respect de ces contraintes et les calculs réalisés à partir des équations décrites précédemment permettent à chaque pas de temps de déterminer le volume d'eau du lac. En utilisant l'équation 5.15, on détermine la valeur d'élévation du niveau d'eau dans le lac correspondant au volume résiduel.

5.3.4 Organigramme

La définition des variables est résumée dans le tableau 5.1 et l'organigramme est présenté à la figure 5.7.

Tableau 5.1 : Définition des variables présentées dans l'organigramme

Variables	Unités	Définition
i	j	Jour julien (jour de l'année, $i = 1$ à 365)
$A_1; B_1; C_1; D_1; E_1$	-	Coefficients intervenant dans l'équation 5.15
$A_2; B_2; C_2; D_2$	-	Coefficients intervenant dans l'équation 5.16
Δt	s	Pas de temps (86 400 s)
V_n	m^3	Volume normal du lac ($175 \times 10^6 m^3$)
V_m	m^3	Volume mort du lac ($7,1 \times 10^6 m^3$)
V_e	m^3	Volume journalier à l'entrée du lac (tronçon amont)
V_p	m^3	Volume des pertes par évaporation
V_s	m^3	Volume journalier d'eau à la sortie du lac (tronçon aval)
V_{ind}	m^3	Besoins journaliers d'eau pour les industries
V_{riz}	m^3	Volume journalier d'eau d'irrigation des rizières
$V_{r.e}$	m^3	Volume journalier d'eau d'irrigation des rizières à l'extérieur
$V_{r.i}$	m^3	Volume journalier d'eau d'irrigation des rizières à l'intérieur
V_{br}	m^3	Support journalier du barrage Thachuong
V_{cs}	m^3	Volume total journalier d'eau pour les différentes consommations
Q_{ap}^j	m^3/s	Débit journalier d'eau d'apport du tronçon amont du lac
Q_{UHRH}^j	m^3/s	Débit journalier d'eau en provenance du reste de l'UHRH du lac
ET^j	m	Hauteur journalière d'eau évaporée du lac
S_{lac}^j	m^2	Surface du lac au jour i
H_{lac}^j	m	Élévation du niveau d'eau dans le lac au jour i
$H_{réf}$	m	Élévation de référence
V_{lac}^j	m^3	Volume d'eau dans le lac le jour i
h_{lac}^j	m	Hauteur d'eau au jour i sur le tronçon du lac dans le réseau vectoriel d'HYDROTEL
q^j	m^3/s	Débit journalier du tronçon en aval du lac dans le réseau vectoriel d'HYDROTEL
K_c		Fraction entre les surfaces des rizières à l'extérieur et à l'intérieur du bassin versant à l'étude
K_p		Coefficient de pertes d'eau dans les canaux d'irrigation

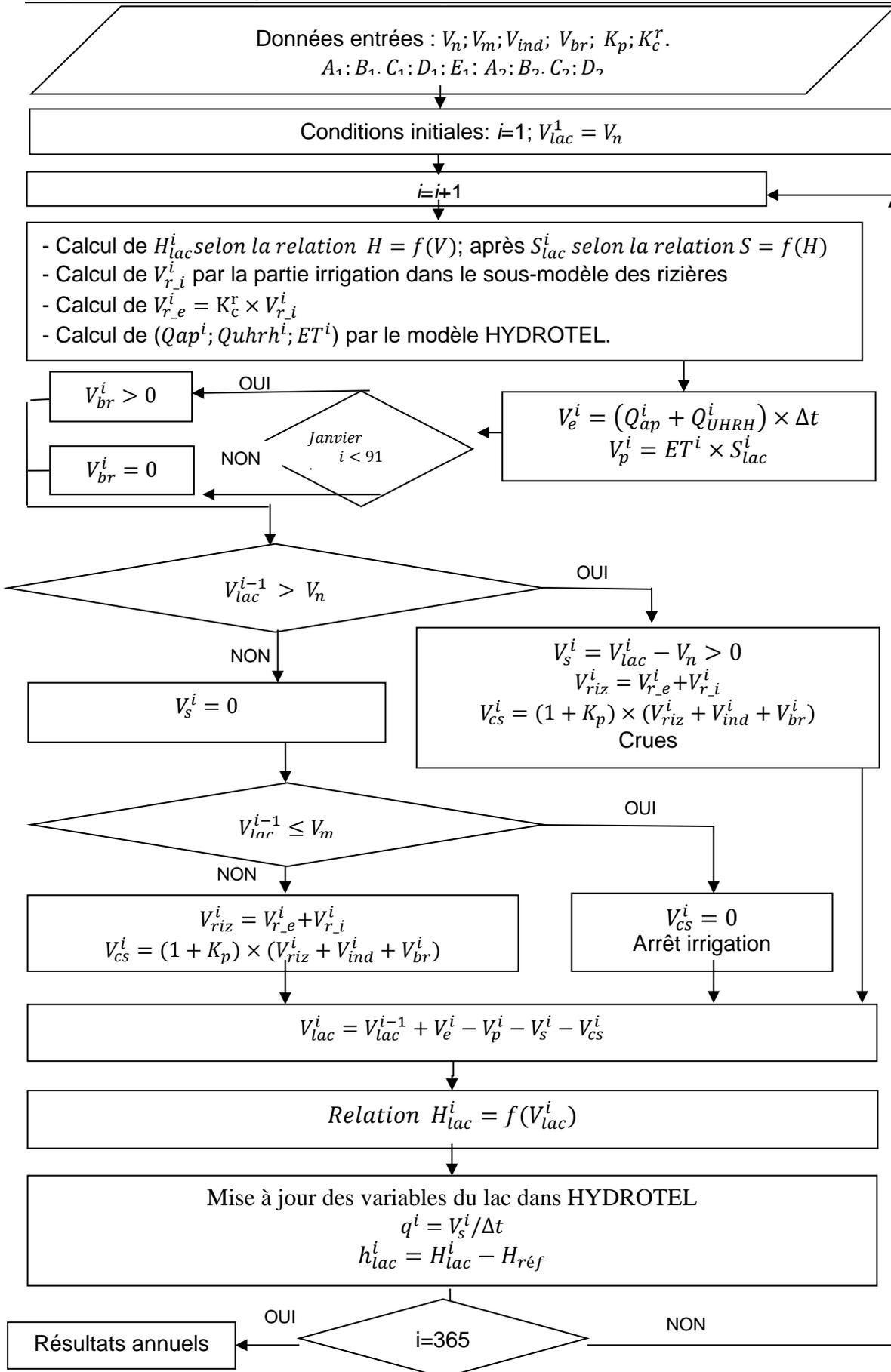


Figure 5.7 : Organigramme

5.3.5 Données d'entrée

(a) Calcul des besoins en eau des industries

Selon les données disponibles dans IPRE (2004 et 2008), le débit nécessaire pour satisfaire les besoins industriels est défini à partir des données de conception du réservoir. Ce débit a été fixé à $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ pour une période d'utilisation de 8 heures par jour ce qui correspond à $34\,560 \text{ m}^3/\text{j}$. Ainsi, la quantité totale d'eau utilisée par les industries devrait être de 12,614 millions de m^3 par an.

(b) Calcul de la quantité d'eau nécessaire pour alimenter le barrage Thachuong

Selon Henk (2005) et IPRE (2004 et 2008), le débit d'alimentation du barrage est de $9,2 \text{ m}^3/\text{s}$ en janvier, $7,1 \text{ m}^3/\text{s}$ en février et $4,3 \text{ m}^3/\text{s}$ en mars. Ainsi, la quantité totale d'eau prélevée du lac pour alimenter le barrage Thachuong est de 53,334 millions de m^3 par année. Pour la période entre le 1^{er} janvier et le 31 mars, la quantité journalière moyenne d'eau retirée du lac correspond à $592\,608 \text{ m}^3/\text{j}$. Pour les autres mois de l'année, aucune eau n'est puisée pour ces besoins.

(c) Détermination des surfaces des rizières pour l'irrigation

Les surfaces de rizière couvertes par le système des canaux d'irrigation qui sont utilisés pour les simulations sont tirées de deux sources. D'abord celles fournies par IPRE (2004 et 2008) et celles que l'on retrouve dans les travaux de Hoang (2014). La surface totale des rizières à l'intérieur et à l'extérieur du bassin versant est évaluée à 7 833 ha (Hoang, 2014) (figure 3.12 dans la section 3.3.3).

On retrouve à la figure 3.5 (section 3.2.5), les limites du bassin versant de la rivière Cong, qui correspond à la zone d'étude définie dans cette thèse. Ces limites ont été déterminées à partir de la carte topographique.

En utilisant les limites du bassin versant et la carte des rizières du bassin versant de la rivière Cau réalisée par Hoang (2014), on a pu déterminer la répartition des rizières à l'intérieur du bassin et celles à l'extérieur. Ainsi, la surface des rizières à l'intérieur du bassin versant est de 2 612 ha et celle des rizières à l'extérieur du bassin versant est de 5 221 ha. Dans ce cas, le coefficient K_c^r , qui représente la proportion entre la surface des rizières à l'extérieur et à l'intérieur, est de 1,99.

5.4 Synthèse

Le réservoir du lac Nuicoc a été mis en opération pour répondre à plusieurs besoins en eau : alimentation industrielle; irrigation des rizières à l'intérieur et à l'extérieur du bassin versant de la rivière Cong; alimentation complémentaire du barrage Thachuong à l'extérieur du bassin versant en saison sèche; et régulation des crues en saison des pluies. Le sous-modèle de gestion du lac a été développé sur le principe du bilan d'eau. Le lac-réservoir a deux sorties : une qui sert pour la régulation des crues et l'autre pour satisfaire les besoins en eau.

Les paramètres qui interviennent dans la gestion du volume d'eau du lac sont : les précipitations, les apports en amont, les besoins en irrigation calculés par le sous-modèle de rizières et les autres consommations. Le modèle de gestion du lac et le modèle de rizières permettront de prendre en compte ces différents paramètres.

Pour effectuer le sous-modèle de gestion du lac, les données nécessaires sont : (i) les données de géométrie du lac, du volume utile, du volume mort et la capacité de transport du canal principal; (ii) les demandes en eau pour maintenir un débit minimal en rivière, pour l'industrie, pour le barrage Thachuong et pour le besoin des rizières à l'extérieur et à l'intérieur du bassin versant.

Un paramètre de calage qui a été présenté est le coefficient des pertes en eau dans les canaux d'irrigation. Dans la procédure de gestion du lac, le sous-modèle permet d'optimiser d'abord l'irrigation en fonction de la capacité maximale de transport du canal principal. La quantité d'eau nécessaire pour satisfaire l'ensemble des besoins est alors retirée du lac et les résultats obtenus sont établis par le bilan d'eau du lac.

6. Reconstitution du régime d'écoulement naturel de la rivière

6.1 Introduction

Selon l'évolution du bassin versant, avant 1973, les aménagements hydrauliques n'ayant pas encore été effectués, la rivière Cong avait un régime d'écoulement naturel. Le riz n'était cultivé qu'en saison des pluies; pendant la saison sèche, à cause du déficit pluviométrique, les surfaces inondables étaient occupées par d'autres plantes nécessitant moins d'eau pour leur croissance.

Dans le bassin versant de la rivière Cong, les données hydrométriques disponibles s'étalent sur la période allant de 1961 à 1976. Après avoir considéré la qualité des données, on soupçonne qu'un processus d'interception de l'écoulement a débuté à partir de 1971. Nous avons donc retenu la période de 1961 et 1970 pour caler le modèle HYDROTEL afin de reconstruire le régime d'écoulement naturel de la rivière. Par ailleurs, étant donné que le riz n'était pas cultivé en saison sèche pendant cette période, la reconstitution du régime d'écoulement naturel de la rivière permettra de déterminer la valeur des paramètres du modèle HYDROTEL en saison sèche. En revanche, le fonctionnement hydrologique des rizières sera pris en compte dans HYDROTEL en saison des pluies et, en saison sèche, les surfaces rizicoles seront considérées identiques, d'un point de vue fonctionnement hydrologique, aux autres surfaces agricoles.

L'objectif poursuivi dans ce chapitre est de procéder au calage du modèle avant les aménagements hydrauliques (reconstitution du régime d'écoulement naturel de la rivière). À partir des paramètres calés, une analyse des résultats par saison sera faite en détail.

6.2 Méthodologie

6.2.1 *Choix des sous-modèles dans HYDROTEL*

Les choix des algorithmes d'HYDROTEL sélectionnés pour la simulation de l'hydrologie du bassin versant sont résumés au tableau 6.1.

Tableau 6.1 : Algorithmes sélectionnés pour les simulations hydrologiques

Processus hydrologiques	Choix d'algorithmes
1- Interpolation des données météorologiques	Polygones de Thiessen
2- Évapotranspiration potentielle	Thornthwaite (1948)
3- Bilan d'eau vertical	Bilan vertical en trois couches (BV3C)
4- Écoulement sur la partie terrestre du bassin	Onde cinématique
5- Écoulement par le réseau hydrographique	Onde cinématique

Pour reconstituer le régime d'écoulement de la rivière, la méthode de Thornthwaite a été adoptée pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP), puisque les données observées de température disponibles sont des données moyennes journalières.

Le calcul de l'ETP par la méthode de Thornthwaite se fait à partir de l'équation suivante :

$$E = \frac{16.2}{30.4} L_j \left(\frac{10T}{I} \right)^A \quad (\text{Éq.6.1})$$

Avec :

E : évapotranspiration potentielle de Thornthwaite en mm/j;

L_j : coefficient d'ajustement tenant compte de la longueur du jour et de la latitude;

T : température moyenne journalière de l'air sur l'UHRH en °C;

I : indice thermique de Thornthwaite;

A : exposant déterminé à partir de l'indice thermique I .

Dans cette étude, l'indice thermique annuel sera déterminé par l'équation 6.2 (Fortin *et coll.*, 1995). La méthode de calcul est effectuée en utilisant : (i) la valeur des températures moyennes journalières sur le bassin versant, obtenue par le sous-modèle des polygones de Thiessen; (ii) le calcul de la température moyenne mensuelle :

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_{mm}}{5} \right)^{1.514} \quad (\text{Éq. 6.2})$$

Avec : I : indice thermique annuel et T_{mm} : température moyenne mensuelle (°C).

6.2.2 Données d'entrée du modèle

La mise en œuvre du modèle HYDROTEL nécessite l'application préalable du logiciel PHYSITEL (Turcotte *et coll.*, 2001 et 2008; Royer *et coll.*, 2006) pour le traitement de plusieurs

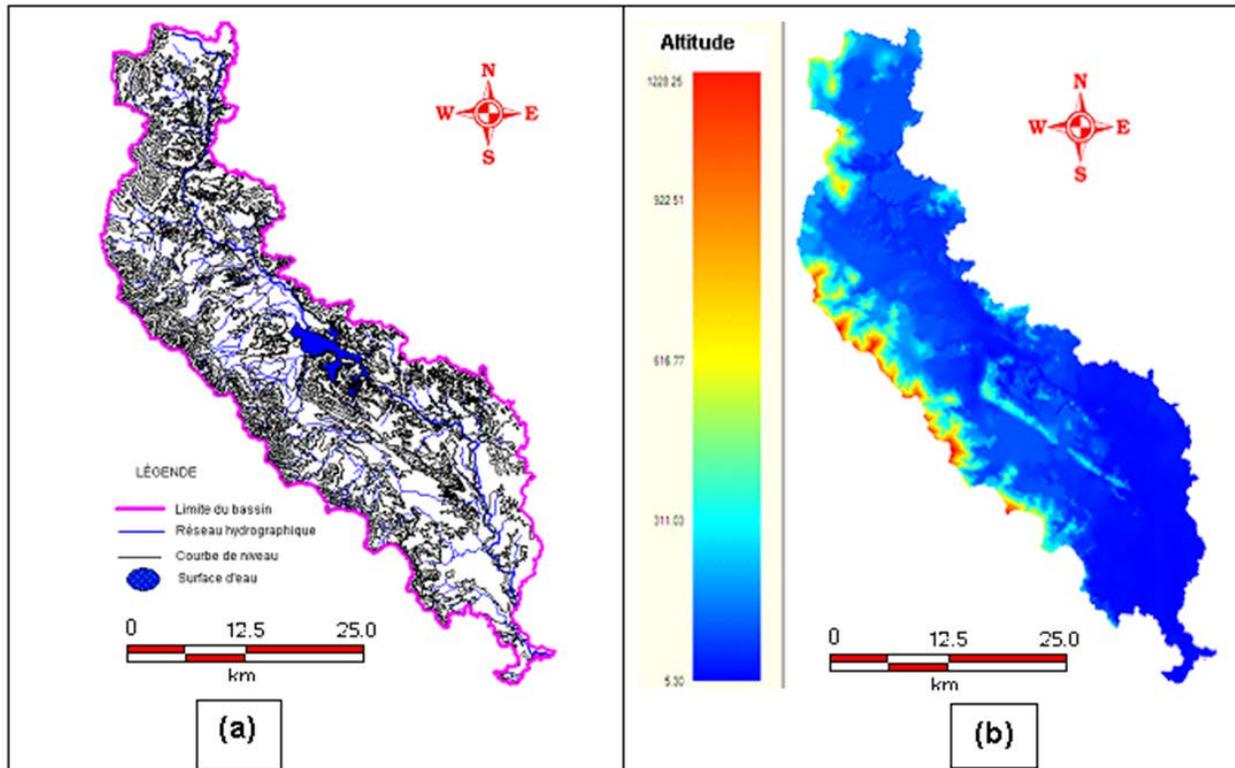
données nécessaires en entrée du modèle HYDROTEL. Ces données d'entrée, traitées sous forme vectorielle ou matricielle, sont le réseau hydrographique, la carte d'occupation du territoire, la carte des types de sols, le modèle numérique de terrain et les unités spatiales de calcul.

Tel que mentionné précédemment, le bassin versant de la rivière Cong est un sous-bassin de la rivière Cau, qui est la grande zone d'étude dans le cadre du projet de GIRE de la rivière Cau. Ainsi, la structure des données sur le bassin versant de la rivière Cong sera traitée de la même manière que sur le bassin versant de la rivière Cau.

Dans le cas du bassin versant de la rivière Cong, et compte tenu de l'objectif de ce chapitre de la thèse, qui est de reconstituer le régime d'écoulement naturel de la rivière Cong, les traitements de données ont été effectués sur des cartes correspondant à la période qui précède la construction du lac Nuicoc. Il est important de préciser que certaines données n'étant que partiellement disponibles, ou non disponibles, compte tenu de la période, des hypothèses ont été nécessaires pour reconstituer l'ensemble des données requises. Nous avons considéré que ces hypothèses n'avaient qu'un impact limité sur les résultats de reconstitution du régime d'écoulement naturel.

- **Topographie**

La carte topographique est une donnée nécessaire puisque son traitement permet d'obtenir le modèle numérique de terrain (MNT). La carte topographique la plus ancienne disponible est une carte de 1979 à l'échelle 1/50 000, avec des courbes de niveau équidistantes de 20 m et le tracé des surfaces d'eau libres. Le traitement de la carte topographique a été effectué à partir d'ArcGIS afin d'obtenir un modèle numérique de terrain du bassin versant avec une résolution de 30 m. La carte topographique initiale et le résultat du traitement sous forme de MNT sont présentés sur la figure 6.1. Sur la partie maintenant occupée par le lac, il n'existe pas de données topographiques puisque la carte a été produite en 1979 (soit après la mise en eau du lac). Pour reconstituer la topographie naturelle avant le début de la construction du lac, en 1973, une technique d'interpolation dans ArcGIS a été utilisée sur la base des données disponibles à l'extérieur de la surface du lac. Les données manquantes, situées sous la surface du lac, ont ainsi été complétées.



**Figure 6.1 : Carte topographique du bassin versant de la rivière Cong
(a) Courbes de niveau (b) Traitement en modèle numérique de terrain (MNT)**

- **Réseau hydrographique**

Le réseau hydrographique du bassin versant de la période d'avant la construction du lac provient de la carte topographique à l'échelle 1/50 000 qui a été produite en 1979. Mais sur cette carte, on ne retrouve pas le tronçon de rivière dans la région maintenant occupée par le lac. Alors, une hypothèse a été émise pour créer un réseau hydrographique complet, afin de connecter l'écoulement naturel de l'amont du lac vers l'aval du lac. Les traitements nécessaires pour obtenir le réseau hydrographique sous forme vectorielle ont été appliqués à partir de PHYSITEL. Le réseau vectoriel ainsi obtenu est présenté sur la figure 6.2.

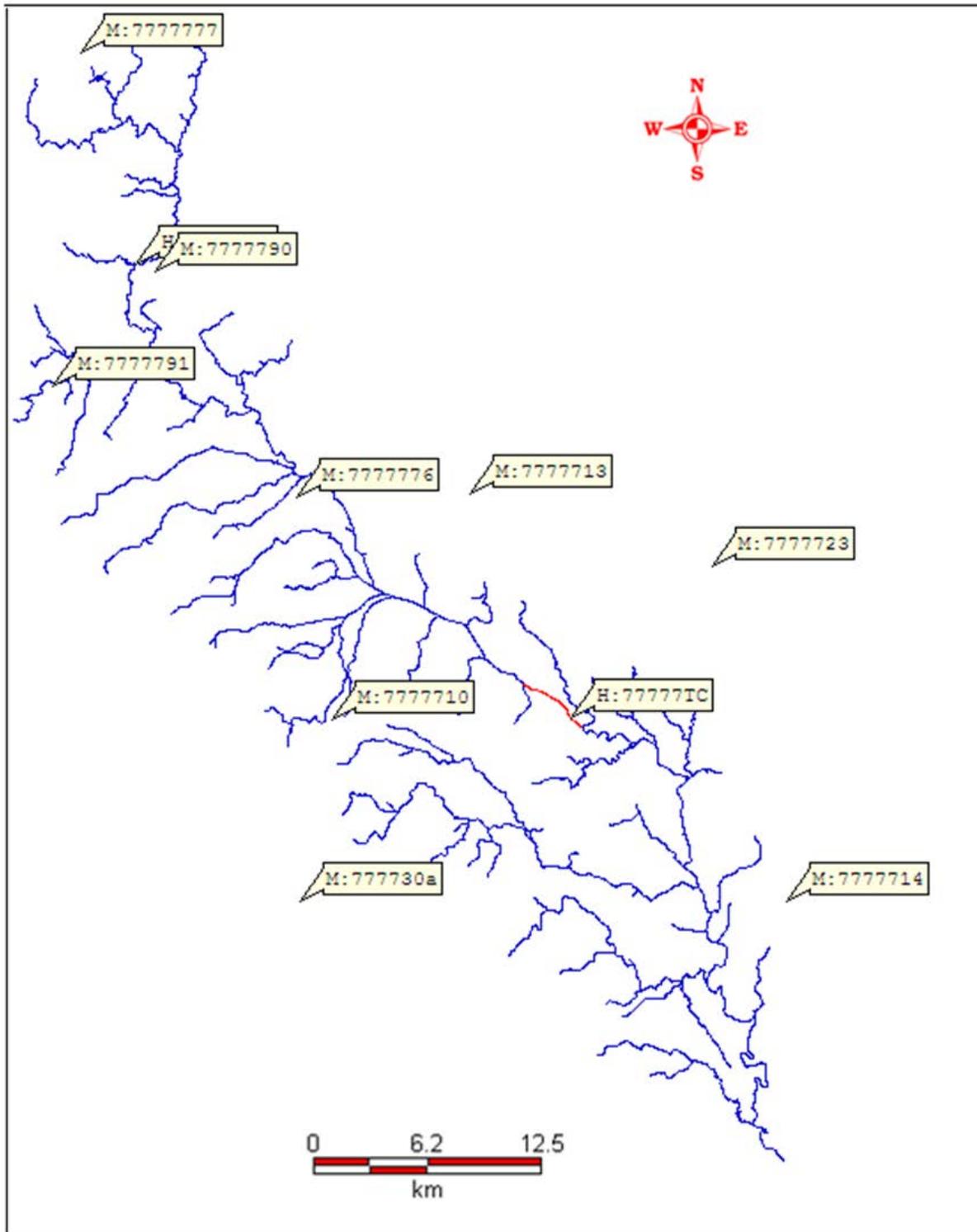


Figure 6.2 : Carte du du réseau hydrographique

(Les numéros commençant par M correspondent aux stations météorologiques et ceux commençant par H sont les stations hydrométriques)

- **Occupation du sol**

La carte de l'occupation du territoire n'étant pas disponible pour la période retenue, celle-ci a été reconstituée à partir de la carte topographique de la période d'étude et d'hypothèses supplémentaires sur l'occupation du territoire. En effet, la carte topographique de l'époque présentait les surfaces forestières, les zones agricoles et les plans d'eau. Par ailleurs, une partie des plans d'eau (lacs) a été convertie en rizières (surfaces agricoles), soit 2 368 ha de la surface des plans d'eau. Cette hypothèse se base sur les caractéristiques naturelles, avant la construction du lac, en déterminant les zones où les apports en eau et les conditions de type de sol étaient propices à la culture du riz. Ainsi, suite à la construction du lac, la surface des rizières passe de 11 463 ha à 13 832 ha. En ce qui concerne les autres classes d'occupation du territoire (milieu urbain, arbustes, etc.), celles-ci proviennent soit d'informations tirées de la carte topographique avant l'année de mise en service du lac (1977), soit d'hypothèses supplémentaires. Même si une reconstitution de l'occupation du territoire a été nécessaire pour des raisons de manque de données, il faut préciser que le niveau de précision des résultats de cette carte d'occupation du territoire pourrait avoir une influence sur les résultats de simulation de l'écoulement naturel. Cependant, l'hypothèse a été faite que l'influence du niveau de précision de la carte sur les résultats de simulation de l'écoulement naturel n'était pas d'une portée telle que les résultats de simulation hydrologique puissent être notablement affectés.

La carte d'occupation du territoire est présentée sur la figure 6.3.

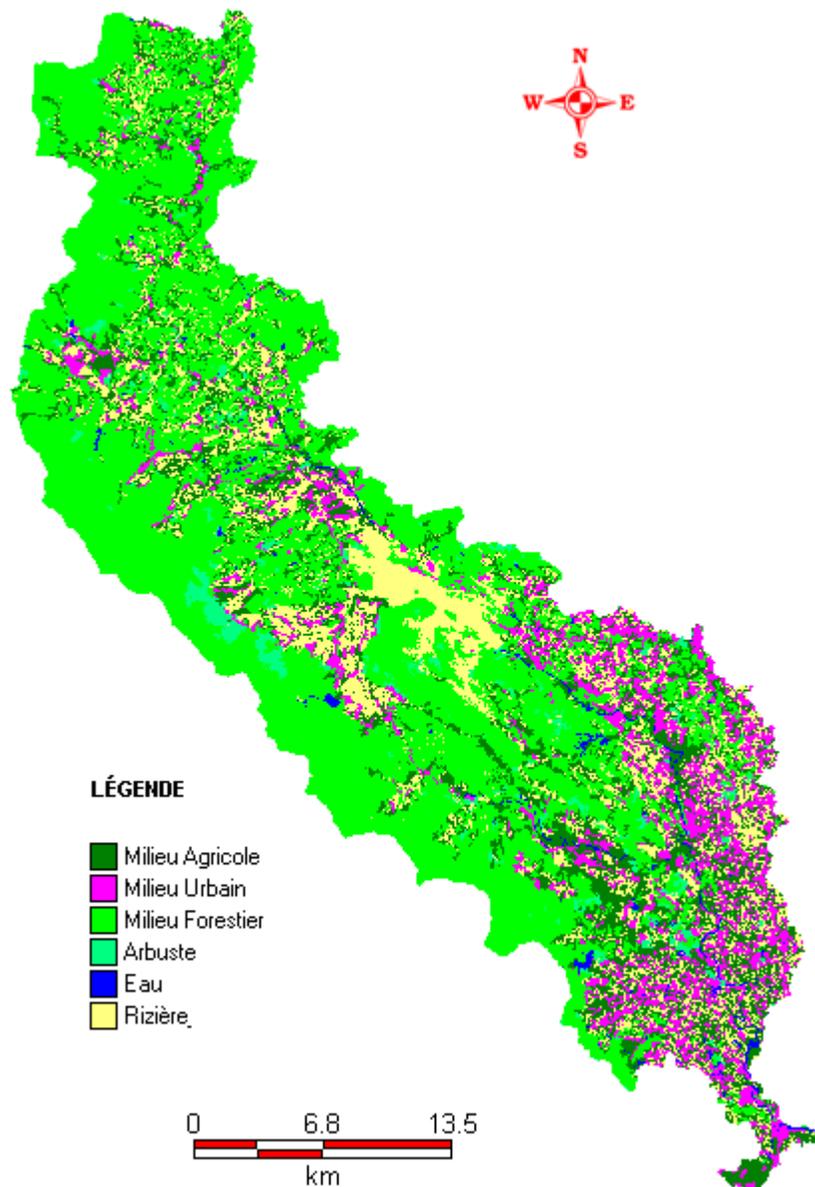


Figure 6.3 : Carte d'occupation du territoire reconstituée pour le bassin versant de la rivière Cong avant la construction du lac (1961-1970)

- **Types de sols**

Les types de sols dans le bassin versant ont été considérés comme n'ayant pas évolué entre la période qui précède la construction du lac (1961-1970) et la période actuelle (2003). Ainsi, la carte des types de sols disponible dans le cadre du projet a été utilisée comme donnée d'entrée. Il s'agit de la carte des types de sols obtenue à partir de la base de données du projet de gestion de la rivière Cau. Cette carte des types de sols a subi un traitement selon la

nomenclature de PHYSITEL, logiciel de SIG utilisé en appui à HYDROTEL, et les types de sols vont du sable (sand) à l'argile (clay) (figure 6.4).

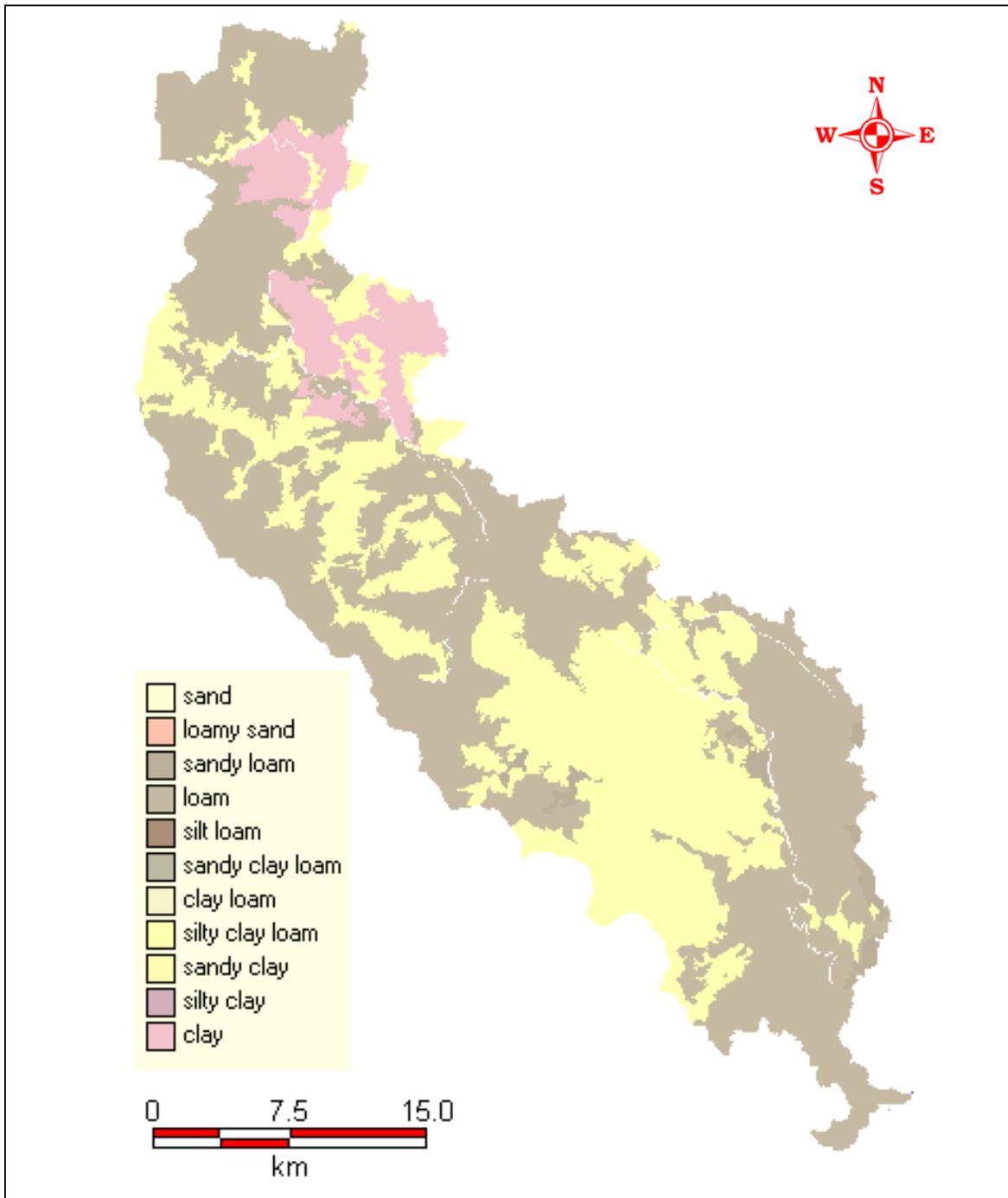


Figure 6.4 : Traitement des données de type de sol pour le bassin versant de la rivière Cong (1961-1970)

(Source : projet de GIEBV de la rivière Cau au Vietnam)

- **Indice foliaire et profondeur racinaire**

Pour le calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR) journalière au cours des simulations hydrologiques, l'indice foliaire (IF) et la profondeur racinaire (PR) sont nécessaires. Ces deux variables, qui interviennent dans la procédure de calcul de l'ETR, doivent être déterminées pour chacune des classes d'occupation du sol. Pour les rizières en saison sèche, ces données sont identiques à celles des autres milieux agricoles. En saison des pluies, les valeurs d'indice foliaire des surfaces rizicoles ont été considérées comme variant entre 0,5 et 3,0 en fonction du stade de croissance la plante (Yoshio *et coll.*, 1998; Kuwagata *et coll.*, 2008). Les valeurs de profondeur racinaire, quant à elles, varient entre 0,05 et 0,20 cm (IRRI, 2009, <http://www.knowledgebank.irri.org/>). En ce qui concerne les valeurs d'IF et de PR adoptées pour les autres classes d'occupation, elles sont présentées dans le tableau 6.2. Les valeurs d'IF et de PR en saison sèche sur la classe de rizières sont les mêmes que sur la classe du milieu agricole. Dans la saison des pluies, les valeurs d'IF et de PR sur la classe de rizières est plus faible que sur la classe de milieu agricole.

Tableau 6.2 : Données des indices foliaires et profondeurs racinaires adaptées en fonction du stade de croissance de la plante

Période		Dates	Indices foliaires (IF)		P profondeurs racinaires (PR)#	
			Milieu agricole	Rizières	Milieu agricole	Rizières
Saison sèche	Préparation du sol	21/1-4/2	3	3	0,5	0,5
	Phase végétative	5/2-26/3	3	3	0,5	0,5
	Phase production	27/3-15/5	3	3	0,5	0,5
	Phase maturation	16/5-14/6	3	3	0,5	0,5
Saison des pluies	Préparation du sol	21/6-30/6	3	0,5	0,5	0
	Phase végétative	1/7-14/8	3	2	0,5	0,05
	Phase production	15/8-28/9	3	3	0,5	0,1
	Phase maturation	29/9-28/10	3	1	0,5	0,2

- **Indice thermique annuel**

Les valeurs obtenues pour l'indice thermique de Thornthwaite, intervenant dans le calcul de l'ETP, sont présentées au tableau 6.3.

Tableau 6.3 : Détermination des valeurs de l'indice thermique annuel de Thornthwaite

Mois	$T_{mm}(^{\circ}\text{C})$	$(T_{mm}/5)^{1,514}$
Janvier	15	5,28
Février	18	6,95
Mars	20	8,16
Avril	20	8,16
Mai	25	11,44
Juin	25	11,44
Juillet	26	12,13
Aout	26	12,13
Septembre	25	11,44
Octobre	22	9,42
Novembre	20	8,16
Décembre	16	5,82
Indice thermique annuel (I)		110,52

- **Données météorologiques**

Les données météorologiques enregistrées à 12 stations (tableau A.6.2 en Annexe), dont la répartition spatiale se trouve à la figure 6.2, ont été utilisées pour mettre en œuvre les simulations hydrologiques. Les variables météorologiques disponibles aux différentes stations sont : la température moyenne journalière, la pluviométrie journalière, l'humidité moyenne journalière et le nombre d'heures d'ensoleillement. Plusieurs données de pluie journalière font parfois défaut dans la série disponible pour différentes raisons (manque de rigueur dans la collecte de données, mauvaise qualité des instruments, pertes de données, etc.). Ainsi, lorsqu'il manque des données, celles-ci ont été interpolées selon différentes méthodes, p. ex. à partir de la carte des isohyètes (figure 3.4; section 3.2.3).

La variation temporelle des pluies journalières (calcul par la méthode des polygones Thiessen) est présentée à la figure 6.5.

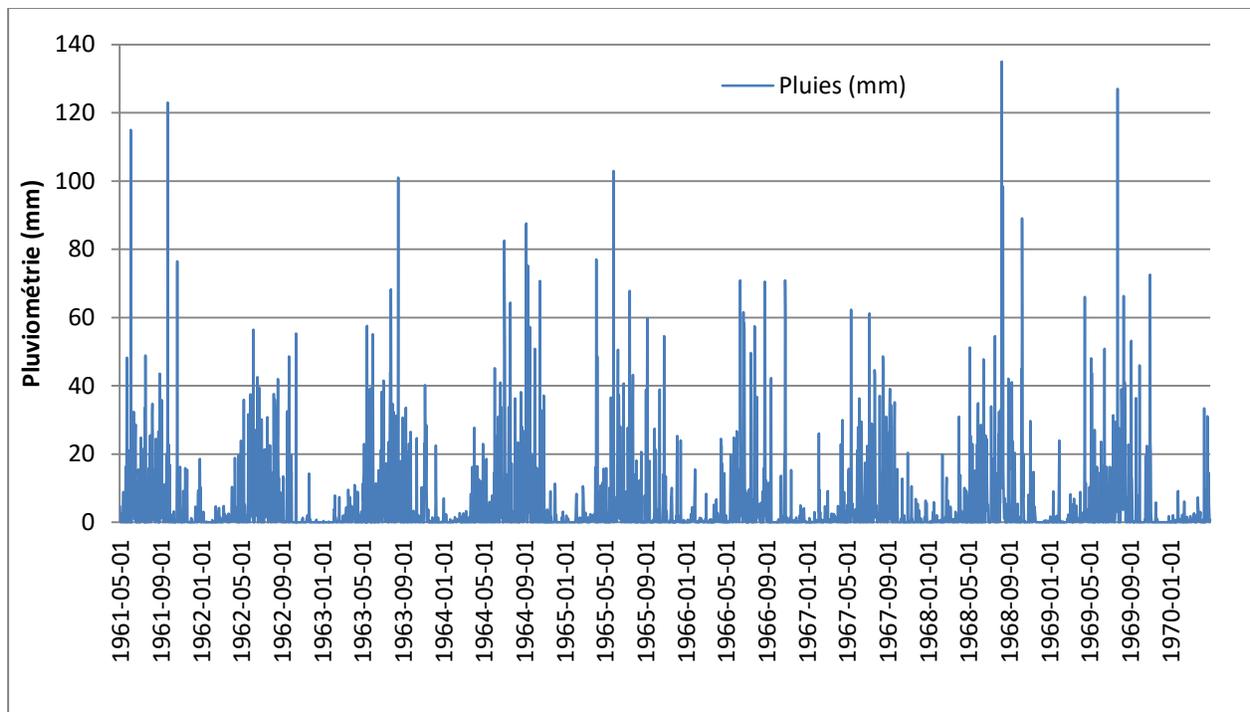


Figure 6.5 : Pluviométrie journalière sur le bassin versant de la rivière Cong

- **Données hydrométriques**

Pour le calage et la validation du modèle, des données observées de débits sont nécessaires. Dans cette étude de reconstitution de l'écoulement, les données observées à deux stations hydrométriques sont disponibles (figure 6.2). L'une des stations est celle de Nuihong, située à (105°33'; 21°43') et l'autre, nommée station de Tancuong, se situe à (105°44'; 21°32'). Compte tenu de la mauvaise qualité des données observées à la station Nuihong (incohérence entre l'hydrogramme et les précipitations), seules les données de la station Tancuong ont été utilisées pour le calage du modèle HYDROTEL.

L'hydrogramme de la station de Tancuong (figure 6.6) montre des pointes de débits correspondant aux crues, en saison des pluies, et une période d'écoulement de faible écoulement ou d'étiage, correspondant à la saison sèche.

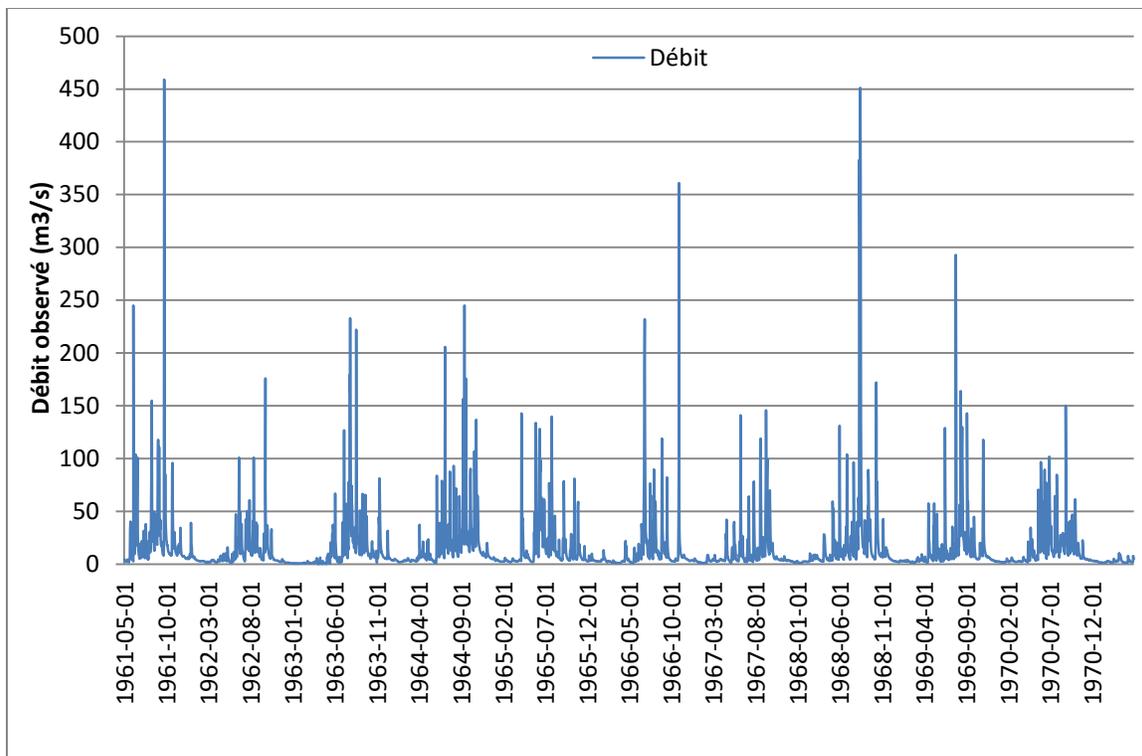


Figure 6.6 : Données observées à la station Tancuong entre 1961 et 1970

- **Discretisation du bassin versant dans PHYSITEL**

Avant d'effectuer les simulations hydrologiques, il est nécessaire de subdiviser le bassin versant, à partir de PHYSITEL, en unités élémentaires de simulation qui sont les Unités Hydrologiques Relativement Homogènes (UHRH) (Fortin et Royer, 2004). La taille d'UHRH déterminée par PHYSITEL dépend du choix d'un seuil, en nombre de mailles (Indarto, 2008). Dans la thèse, quelques valeurs ont été testées (résumées au tableau 6.4) pour déterminer le nombre de tronçons et le nombre d'UHRH. Finalement, un seuil de 2 800 mailles par UHRH a été choisi, ce qui a conduit au découpage du bassin versant de 958 km² en 192 UHRH et 182 tronçons pour simuler l'hydrologie du bassin versant.

Tableau 6.4 : Détermination des seuils

Seuil en nombre de mailles par UHRH	Nombre de tronçons	Nombre d'UHRH
1 000	487	499
2 000	237	248
2 600	200	210
2 800	182	192
3 000	170	180
3 650	140	150
4 850	106	115

6.2.3 Périodes d'analyse

La période de simulation s'étend de 1961 à 1970. Celle-ci sera divisée en deux périodes, dont l'une servira au calage et l'autre à la validation. La première période, de 1961-1965, a servi au calage des paramètres du modèle et la deuxième période, celle de validation du modèle, va de 1966 à 1970. Pour chacune des trois saisons suivantes, une simulation a été faite : la saison sèche, la saison des pluies et toute l'année. Les objectifs poursuivis en tenant compte des différentes périodes sont les suivants :

- (i) la simulation en saison sèche a permis de caler et de valider le modèle dans une période sans culture de riz. Cela a permis de déterminer des valeurs de paramètres pour cette saison. Les meilleures valeurs déterminées pour certains paramètres de calage serviront à effectuer un second calage, celui de la saison des pluies;
- (ii) la simulation en saison des pluies a permis de déterminer les valeurs des paramètres de calage en incluant ou non le fonctionnement hydrologique des rizières. Cela a permis d'analyser l'impact des rizières sur l'hydrologie du bassin versant;
- (iii) la simulation durant l'année entière a permis d'analyser la pondération de la performance du modèle par saison sur le comportement général du bassin versant.

6.2.4 Calage du modèle et critère d'analyse

L'objectif du calage d'un modèle est de déterminer les valeurs des paramètres du modèle de sorte que le modèle reproduise au mieux le comportement général du bassin à l'étude (Villeneuve *et coll.*, 1998). La méthode de calage du modèle HYDROTEL est un ajustement manuel en appréciant les courbes simulées et observées et en calculant les valeurs des indicateurs de performance. Selon Fortin *et coll.* (1995), plusieurs critères servent à estimer la performance du modèle. Chaque critère joue un rôle particulier dans le processus de jugement. En général, trois critères, soit le coefficient de Nash-Sutcliffe (NASH), la racine carrée de l'écart quadratique moyen (RCEQM) et l'erreur relative sur le volume d'écoulement total sont, utilisés.

Ces indicateurs de performance du modèle s'expriment à partir des équations suivantes :

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum_{i=1}^N (\bar{Q} - Q_{obs})^2} \quad (\text{Éq. 6.3})$$

$$RCEQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{N^2}} \quad (\text{Éq. 6.4})$$

Avec:

N : nombre de valeurs observées;

Q_{sim} : débits simulés (m^3/s);

Q_{obs} : débits observés (m^3/s);

\bar{Q} : valeur moyenne des débits observés (m^3/s).

Une comparaison entre le bilan mensuel d'eau simulé et celui observé a aussi été effectuée lors du calage du modèle. Cette comparaison est exprimée par le critère de l'erreur relative sur le volume d'écoulement total:

$$ERSVET = \frac{V_{sim} - V_{obs}}{V_{obs}} 100 \% \quad (\text{Éq. 6.5})$$

Avec :

V_{sim} : Volume total simulé (m^3);

V_{obs} : Volume total observé (m^3).

Pour l'analyse des résultats de simulation, une valeur de 1 pour le critère de Nash-Sutcliffe signifie que les simulations coïncident exactement avec les observations. Par contre, une valeur inférieure ou égale à 0 signifie que la simulation est moins bonne pour représenter les valeurs

observées que la moyenne des observations. Pour la RCEQM, celle-ci permet de mesurer si la simulation a tendance à surestimer ou à sous-estimer les apports. L'objectif est d'obtenir une valeur proche de 0. Enfin, la valeur de l'ERSVET recherchée est celle qui est proche de 0.

6.3 Résultat

6.3.1 Calage du modèle

- Pour les résultats qualitatifs

La figure 6.7 présente les deux courbes de débits simulées et observées pour la période de calage de 1961-1965. Chaque année, les pics des crues simulées et observées sont un peu différents. En général, ces deux courbes se superposent assez bien.

Pour des raisons de clarté et de précision, la courbe de simulation et d'observation d'une année a été présentée à la figure A.6.2 en Annexe. L'observation visuelle de cette courbe montre que la simulation reproduit généralement bien les observations, sauf les pics correspondant aux crues en saison des pluies. Autrement, en périodes des crues au début et à la fin de saison des pluies, la courbe de débits simulés est toujours au-dessus de celle des débits observés. Dans la saison sèche avec le cas sans rizière, la concordance entre les deux courbes est de loin meilleure qu'au cours de la saison des pluies. Une autre comparaison est présentée pour le bilan des volumes mensuels entre l'observation et la simulation (figure 6.8). Chaque année, en saison des pluies, les volumes simulés sont plus élevés que les volumes observés, en revanche en saison sèche les volumes simulés sont proches des volumes observés.

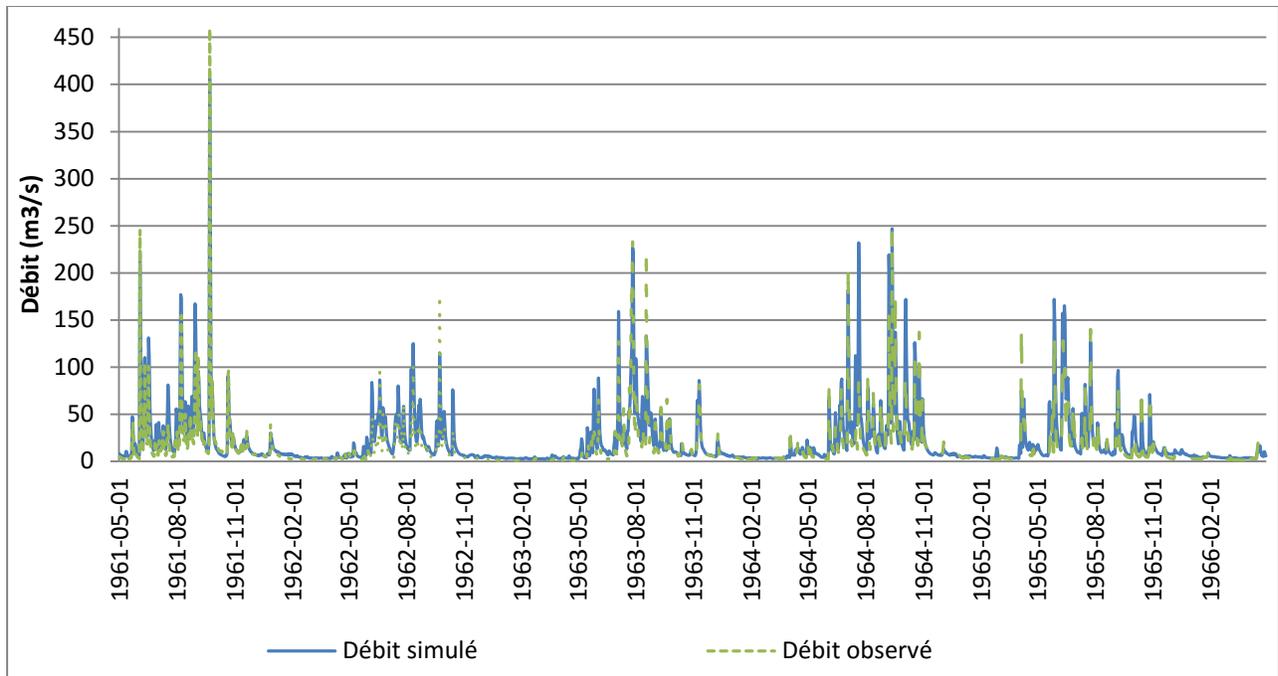


Figure 6.7 : Résultat de calage du modèle sans rizière entre 1961 et 1966

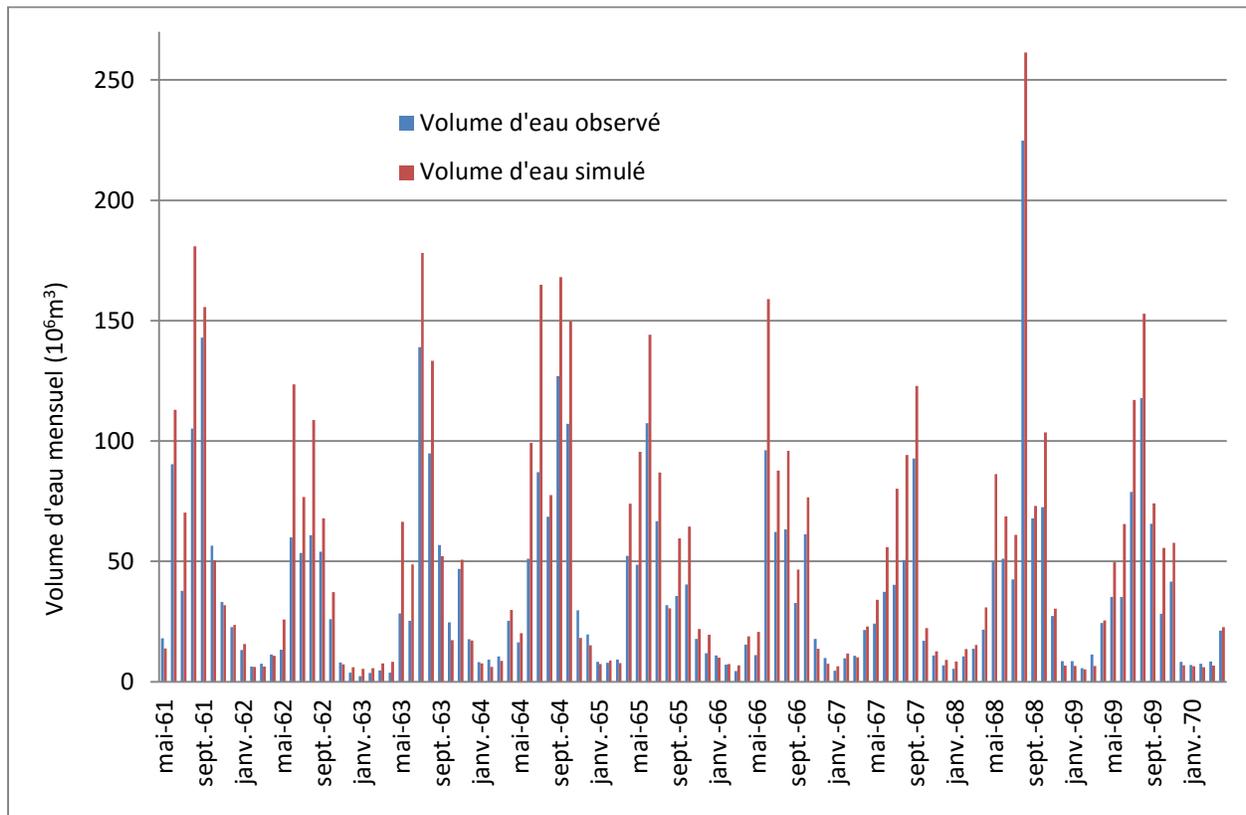


Figure 6.8 : Volume total mensuel de l'écoulement

- Valeur des indicateurs de performance du modèle :

Les indicateurs de performances du modèle, donnés dans le tableau A.6.1 en Annexe, montrent que, dans la période de calage, le NASH est de 0,72; la RCEQM est de 0,32 (m³/s) et l'ERSVET est 37,8 %. Ces indicateurs de performance du modèle sont acceptables compte tenu des données utilisées.

- Paramètres de calage du modèle :

Le calage a utilisé comme valeurs initiales celles obtenues dans le cadre des travaux de modélisation hydrologique du bassin versant de la rivière Cau (Nguyen, 2012). Les valeurs finales obtenues pour les paramètres calés sur le bassin versant de la rivière Cong sont présentées au tableau 6.5

Tableau 6.5 : Valeurs des paramètres de calage

Paramètres	Unité	Valeurs initiales	Valeurs finales
Indice thermique annuel de Thornthwaite (I)	adimensionnel	110	110
Latitude moyenne du bassin versant (L_m)	degrés.minutes	21,25	21,25
Facteur de déphasage (j_d)	jour	80	80
Coefficient multiplicatif d'optimisation de l'ETP (K_{OP})	adimensionnel	0,93	1,2
Épaisseur de la couche 1 (Z_1)	m	0,13	0,13
Épaisseur de la couche 2 (Z_2)	m	1,0	1,0
Épaisseur de la couche 3 (Z_3)	m	3,2	3,5
Humidité relative initiale dans Z_1 (φ_{Z1})	%	0,7	0,7
Humidité relative initiale dans Z_2 (φ_{Z2})	%	0,9	0,9
Humidité relative initiale dans Z_3 (φ_{Z3})	%	0,9	0,9
Coefficient d'extinction (CE)	adimensionnel	0,6	0,6
Coefficient de recession (CR)	m/h	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$
Coefficient multiplicative d'optimisation de l'assèchement (CA)	adimensionnel	1	1
Variation maximale de l'humidité relative par pas de temps (VM)	adimensionnel	0,3	0,3
Coefficient Manning des milieux forestiers ($n_{forestier}$)	$m^{-1/3}/s$	0,3	0,3
Coefficient de Manning de l'eau (n_{eau})	$m^{-1/3}/s$	0,03	0,03
Coefficient de Manning des autres milieux (n_{autre})	$m^{-1/3}/s$	0,1	0,1
Lame d'eau de référence ($L_{réf}$)	m	0,0006	0,0006
Coefficient d'optimisation de la rugosité (K_{rug})	adimensionnel	1	1
Coefficient d'optimisation des largeurs des rivières (K_{Lriv})	adimensionnel	1	1

6.3.2 Analyse des résultats en fonction des saisons

Une fois le calage jugé acceptable dans les conditions du bassin versant pour les différentes périodes, il faut procéder à la validation du modèle HYDROTEL. Pour la période de validation (1966-1970), les résultats sont présentés aux figures 6.8 et 6.9. Les indicateurs de performance

(tableau A.6.1 en Annexe) démontrent que les meilleures valeurs obtenues pour les paramètres du modèle ont permis d'obtenir des résultats de validation de bonne qualité.

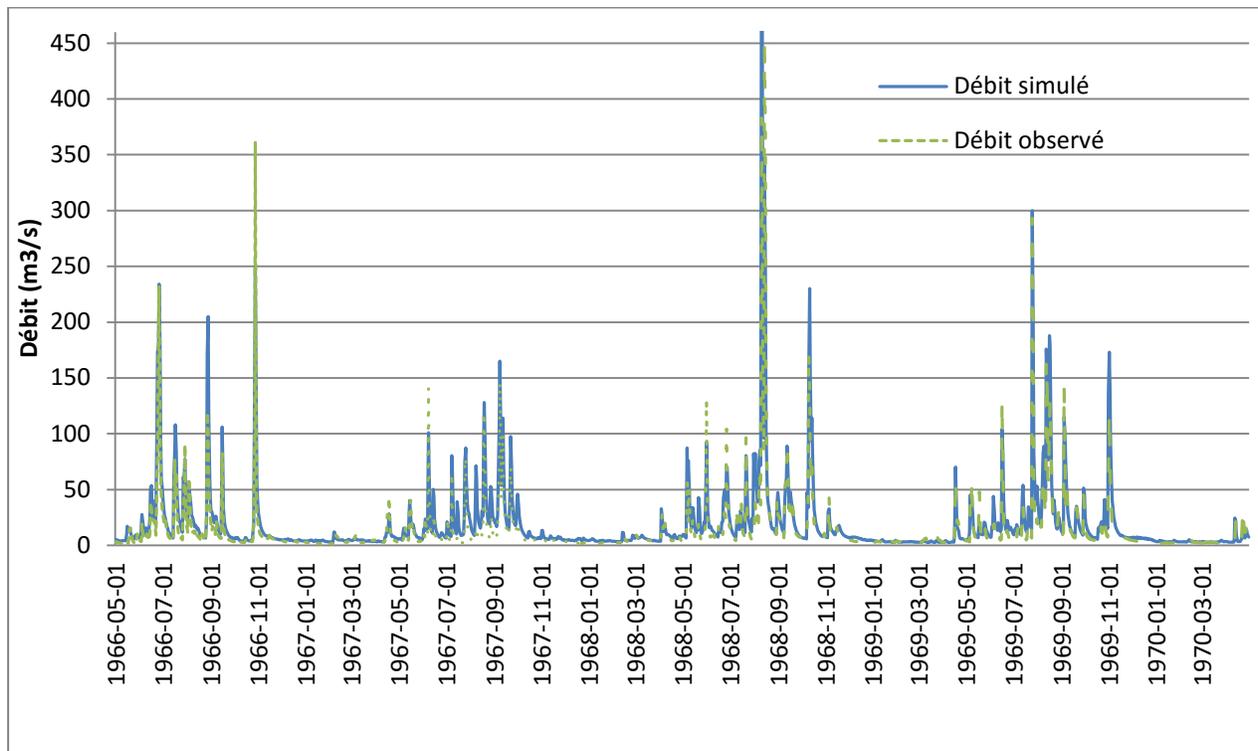


Figure 6.9 : Résultat de la validation du modèle sans rizière pour la période entre 1966 et 1970

Les valeurs obtenues pour les trois indicateurs de performance du modèle sont résumées au tableau 6.6. L'analyse de ces résultats en tenant compte des saisons montre que :

- Les valeurs de NASH correspondant aux périodes sèches restent élevées et varient entre 0,77 et 0,86. En revanche, les NASH en saison des pluies, qui varient entre 0,56 et 0,77, sont plus faibles. Cette observation se répète chaque année, comme on peut le voir sur l'exemple illustré aux figures A.6.1 et A.6.2 en Annexe. Exceptionnellement, dans les deux saisons des années 1962 et 1964, le NASH est très petit, ce qui provient probablement du fait qu'il existe des éléments de changement pendant ces deux années qui n'ont pas pu être pris en compte dans le modèle en raison du manque de données à ce sujet
- La valeur de RCEQM dans la saison des pluies est plus loin de zéro que dans la saison sèche. En saison sèche, la valeur de RCEQM varie entre 0,14 et 0,57 (0,91 en 1966-1967), mais, en saison des pluies, elle varie entre 0,75 et 2,2.
- Les valeurs d'ERSVET sont plus petites en saison sèche qu'en saison des pluies. Ceci est illustré à la figure 6.8.

En bref, ces indicateurs de performance indiquent que les paramètres du modèle HYDROTEL sont satisfaisants pour représenter la condition sans rizières en saison sèche (1961-1970) dans le bassin versant. Dans la saison des pluies, saison durant laquelle le riz est cultivé dans les zones inondables, ce qui entraîne un changement du fonctionnement hydrologique du bassin versant, il est nécessaire de tenir compte des rizières dans les simulations avec le modèle HYDROTEL pour améliorer la qualité des simulations.

Tableau 6.6 : Indicateurs de performance du modèle sans rizière par saison et toute l'année

Période	NASH			RCEQM (m ³ /s)			ERSVET (%)		
	Année	Saison des pluies	Saison sèche	Année	saison des pluies	Saison sèche	Année	saison pluies	Saison sèche
1961-1962	0,86	0,85	0,83	0,68	1,35	0,31	31,1	33,0	-3,0
1962-1963	0,52	0,39	0,45	0,57	1,14	0,14	62,3	56,1	37,9
1963-1964	0,75	0,71	0,83	0,70	1,38	0,28	28,6	34,9	-11,7
1964-1965	0,53	0,41	0,83	1,02	2,00	0,57	33,4	40,4	4,4
1965-1966	0,75	0,70	0,83	0,53	1,04	0,24	36,0	33,4	16,3
1966-1967	0,77	0,75	0,75	0,74	1,44	0,91	34,8	36,8	-0,5
1967-1968	0,74	0,71	0,85	0,5	1,00	0,4	34,1	34,3	14,7
1968-1969	0,77	0,75	0,89	1,1	2,20	0,41	36,8	41,5	2,5
1969-1970	0,92	0,92	0,75	0,41	0,75	0,39	-0,4	-4,7	-11,8
Moyenne	0,73	0,69	0,78	0,69	1,37	0,41	33,0	34,0	5,4

6.4 Synthèse

Ce chapitre a permis : (i) la modélisation du bassin versant avant la construction du lac; et (ii) le calage et la validation des paramètres du modèle sans rizière. Étant donné le manque de données, la modélisation du bassin versant a nécessité des hypothèses concernant la carte d'occupation du sol, la carte topographique; le réseau hydrographique et l'évolution du bassin versant. Parmi ces hypothèses, une hypothèse sur la conversion de 2 368 ha d'eau en rizières a été nécessaire et cela pourrait avoir une influence sur les résultats du modèle. Cependant, l'ajustement des paramètres de calage permet de compenser les erreurs éventuelles induites par cette hypothèse. Le calage effectué sur la période entre 1961 et 1966 montre que les indicateurs de performance du modèle sont globalement acceptables, sauf l'ERSVET (38 %) : le NASH est de 0,72 et la RCEQM est de 0,32 (m³/s). Il apparaît que l'ERSVET nécessite d'être

améliorée. La validation a été réalisée sur la période de 1966 à 1970 et les valeurs suivantes ont été obtenus pour les indicateurs de performance : NASH de 0,78; RCEQM de 0,38; et ERSVET de 35,7 %. L'analyse des résultats simulés a montré que les valeurs des indicateurs de performance du modèle en saison sèche sont bonnes. En revanche, les indicateurs de performance sont moins bons en saison des pluies. Les résultats simulés montrent que le fait de ne pas inclure le fonctionnement hydrologique des rizières dans le modèle HYDROTEL ne permet pas d'obtenir de bons résultats. Cela justifie la nécessité d'inclure un sous-modèle de rizières

7. Calage du modèle et études d'impacts de scénarios d'aménagement sur l'hydrologie du bassin versant

7.1 Introduction

Pour effectuer l'analyse d'impact des rizières et de l'irrigation sur le régime hydrologique de la rivière, il faut caler HYDROTEL avec les sous-modèles des rizières et de gestion du lac. Le calage des sous-modèles de rizière et de gestion du lac Nuicoc nécessite deux approches alternatives en l'absence de données observées de débits à l'exutoire du bassin versant après la fermeture des stations d'observation hydrométriques. Les alternatives de calage utilisées pour le sous-modèle de rizière dépendent de la saison (saison des pluies et saison sèche). En effet, certaines données nécessaires à l'une des alternatives de calage sont disponibles en saison des pluies et les autres données le sont une autre partie de l'année.

Une fois le calage du modèle effectué, cela permettra d'obtenir un état dit de « référence » du bassin versant. Il sera possible d'utiliser le modèle calé afin d'analyser comment différents aménagements agricoles dans le bassin versant pourraient affecter son hydrologie. En effet, en appui aux politiques d'augmentation des quantités de riz produites, des aménagements (p.ex. augmentation des surfaces de rizières) seront nécessaires et il est important d'analyser l'impact de ces aménagements sur l'hydrologie du bassin versant pour appuyer la prise de décision.

Par conséquent, une fois le modèle HYDROTEL calé et validé en tenant compte des sous-modèles de rizières et de gestion du lac, il sera possible d'analyser l'impact des aménagements hydroagricoles futurs sur le débit de la rivière et sur le volume de l'écoulement de surface. Ainsi, en appui au processus de mise en œuvre de la GIRE dans le bassin versant de la rivière Cong, le principal objectif de ce chapitre est d'évaluer les impacts d'aménagements hydroagricoles sur la réponse du bassin versant. Pour ce faire, la méthode générale consiste à considérer un état de référence du bassin versant et à comparer celui-ci avec un état modifié en vue d'en déduire les impacts probables. Cette analyse nécessitera de définir :

- les conditions météorologiques : elles seront définies de manière à tenir compte des variabilités interannuelles et intersaisonnière dans le bassin versant;
- les scénarios : ils concernent les aménagements agricoles possibles, à savoir l'extension des rizières et la réaffectation temporaire de rizières en terres agricoles;

- les critères d'analyse d'impacts : il s'agit de définir les critères et variables hydrologiques à considérer pour comparer les scénarios.

7.2 Calage du modèle des rizières en saison des pluies

Suite à la construction et à la mise en service du réservoir Nuicoc en 1973, la dernière station hydrologique située en aval du lac encore en service dans le bassin versant, Tancuong, a été fermée. Les données observées de débits en rivière ne sont alors plus disponibles pour servir au calage des sous-modèles de rizières selon la méthode traditionnelle (simulation et comparaison des débits simulés avec les débits observés). Ainsi, certaines hypothèses ont dû être considérées. Tout d'abord, la riziculture est également pratiquée dans le bassin versant de la rivière Cau en saison des pluies et on considère que les caractéristiques (pluviométrie, température, types de sols, etc.) de ce bassin versant peuvent être considérées comme similaires à celles du bassin versant de la rivière Cong. Par ailleurs, la riziculture pratiquée dans le bassin versant de la rivière Cau suit les mêmes règles que celle pratiquée dans le bassin versant de la rivière Cong (dates de culture, hauteur de drainage des casiers rizicoles, etc.). Par conséquent, en saison des pluies, le calage du sous-modèle de rizières sera réalisé à partir des débits à l'exutoire du bassin versant de la rivière Cau et les valeurs des paramètres seront appliquées au bassin versant de la rivière Cong. Dans le bassin versant de la rivière Cau, des données observées sont disponibles à la station Giabay (exutoire du bassin versant) pour la période d'étude retenue et seront utiles pour le calage.

7.2.1 Données de calage et de validation

Indices foliaires et profondeurs racinaires

Dans le projet du bassin versant de la rivière Cau, la simulation hydrologique a utilisé une carte d'occupation du sol de 2003 (Nguyen, 2012). Les travaux de Hoang (2014) ont permis d'obtenir une carte d'occupation du sol représentant la situation de 2009. Contrairement à la carte de 2003, dans laquelle il n'existe qu'une seule couche pour l'ensemble des surfaces agricoles, celle de 2009 comprend une classe « rizière » et une classe pour les autres surfaces agricoles. Les valeurs d'indice foliaire et de profondeur racinaire des rizières et des autres surfaces agricoles sont résumées dans le tableau 7.1. Comme il s'agit du bassin versant de la rivière Cau, le riz n'est pas cultivé en saison sèche par manque de réservoir pour l'irrigation. Par conséquent,

durant cette période et pour des raisons de continuité dans les données d'entrée préalablement aux simulations, les rizières sont converties en d'autres milieux agricoles; les valeurs d'indice foliaire et de profondeurs racinaires des rizières et des autres milieux agricoles sont alors identiques.

Tableau 7.1 : Valeurs des indices foliaires et des profondeurs racinaires

Jours juliens	Dates	Indice foliaire (IF)		Profondeur racinaire (PR)	
		Rizière	Milieu agricole	Rizière	Milieu agricole
1	1/1-14/6	3	3	0,5	0,5
181	15/6-30/6	0,5	3	0,05	0,5
201	1/7-20/7	0,5	3	0,05	0,5
226	21/7-14/8	2	3	0,1	0,5
256	15/8-13/9	3	3	0,2	0,5
266	14/9-28/9	3	3	0,2	0,5
281	29/9-8/10	3	3	0,2	0,5
291	9/9-18/9	2	3	0,2	0,5
301	19/9-28/10	1	3	0,2	0,5
365	29/10-31/12	0	3	0	0,5

Période de calage et de validation

La carte d'occupation du territoire avec la classe rizière a été réalisée sur la base d'images satellitaires et de mesures de terrain de 2006 à 2009 (Hoang, 2014). Ainsi, le calage du sous-modèle de rizières en saison des pluies a été réalisé à partir des données de débits disponibles dans la même période dans le bassin versant de la rivière Cau. Même si cette période peut être considérée comme courte au regard des conditions optimales en matière de quantité de données pour le calage, elle est supposée suffisante pour obtenir un modèle acceptable pour l'aide à la décision. En effet, en matière de gestion intégrée par bassin versant, une situation de référence acceptable suffit pour analyser l'impact d'aménagements sur l'hydrologie d'un bassin versant.

Par conséquent, la période du 1/1/2006 au 31/12/2007 a été retenue pour le calage et celle allant du 1/1/2008 au 31/12/2009 servira à la validation. La figure 7.2 présente une synthèse des données observées à la station Giabay pendant la période 2006-2009; la localisation de cette station est présentée à la figure 7.1.

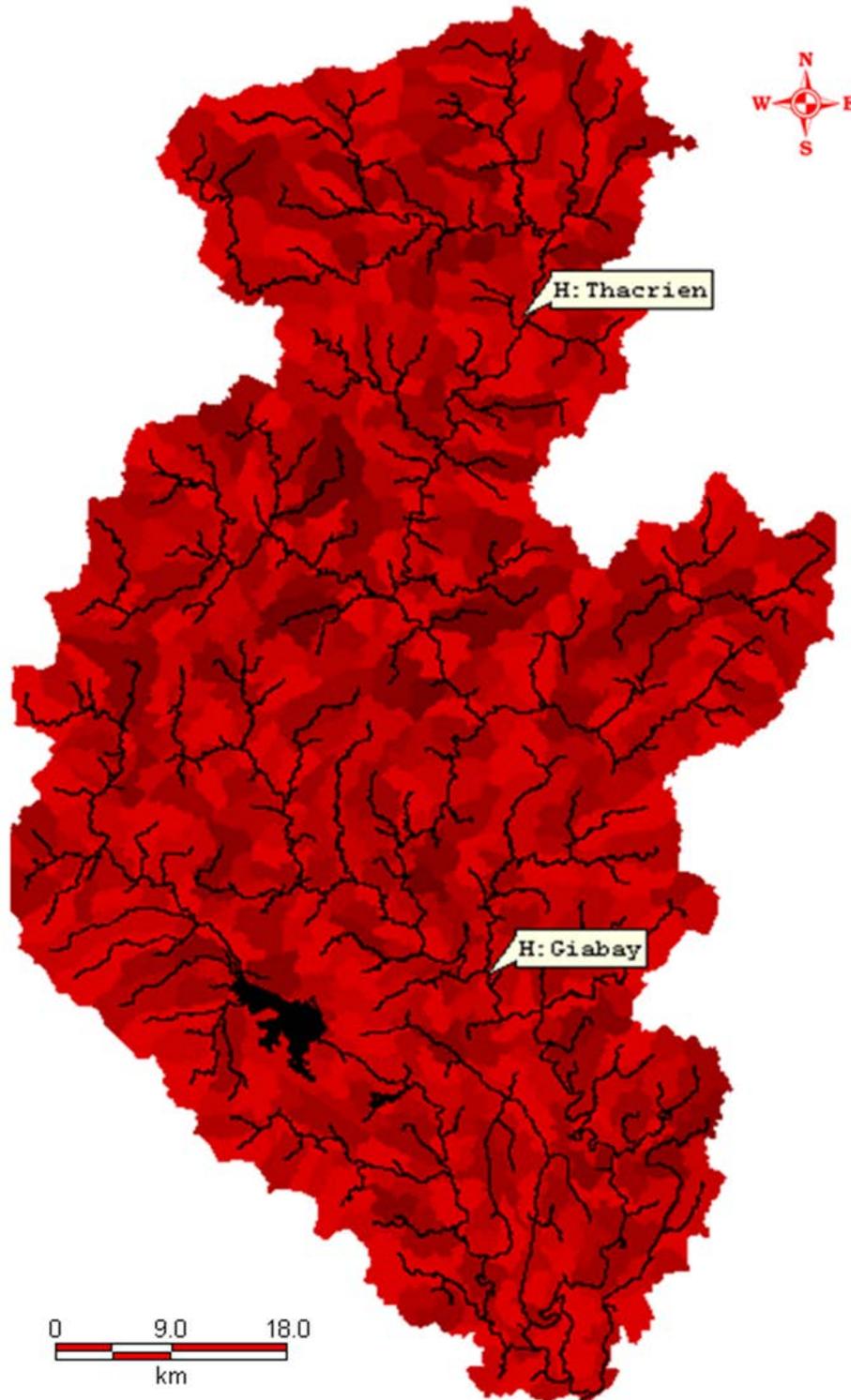


Figure 7.1 : Station Giabay sur le bassin versant de la rivière Cau

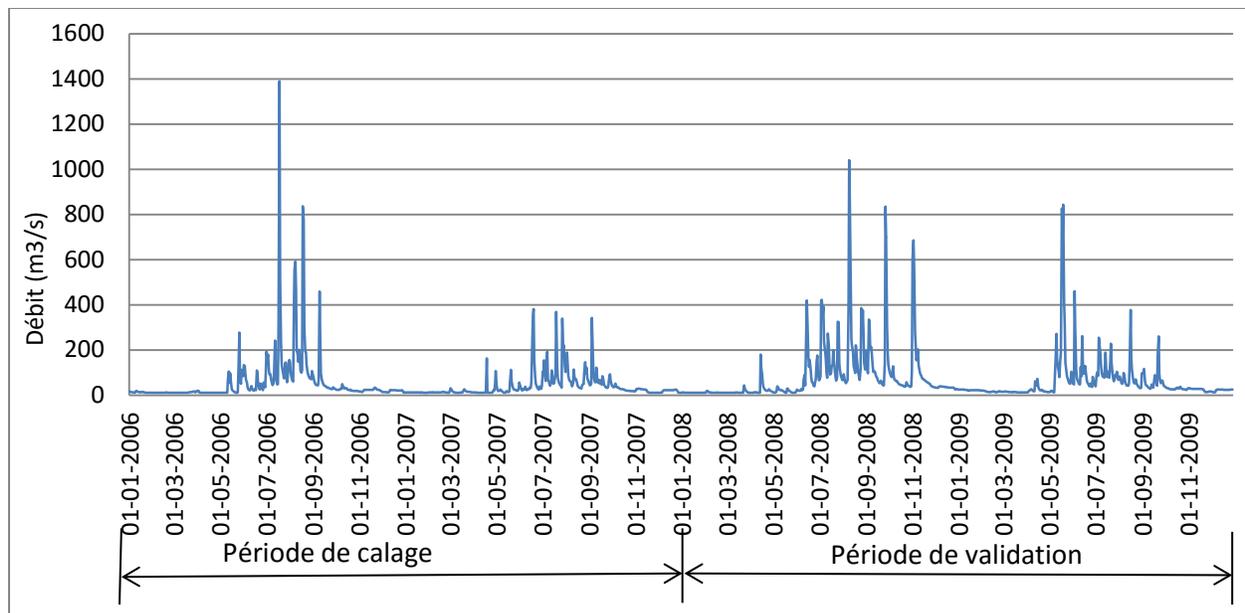


Figure 7.2 : Débits observés à la station Giabay

7.2.2 Paramètres de calage intervenant dans les processus hydrologiques dans les rizières

Les deux paramètres intervenant dans le sous-modèle des rizières pour l'ajustement des débits en rivière sont le paramètre d'infiltration K_{inf} , qui intervient dans le processus d'infiltration au fond des rizières, et le coefficient de culture K_c , servant à ajuster l'évapotranspiration dans les rizières (voir section 4.3.2.2). Pour l'ajustement, la procédure adoptée est celle d'un ajustement en deux étapes : d'abord l'ajustement des paramètres du modèle HYDROTEL à partir des travaux de Nguyen (2012), ensuite l'ajustement des paramètres intervenant dans le sous-modèle de rizières. Une valeur initiale de K_c de 1,3 a été utilisée, sur la base de données de la littérature pour les différentes étapes de croissance (Allen *et coll.*, 1998; Le, 2011). Ainsi, les valeurs ajustées de K_c varient entre 0,7 et 1,3 selon chaque stade de croissance (tableau 7.2). Pour la valeur initiale du paramètre d'infiltration K_{inf} , celle-ci a été déterminée en tenant compte des caractéristiques hydrauliques des sols et des valeurs de la littérature (Tuong *et coll.*, 2005). Ainsi, K_{inf} varie entre 0,5 et 0,9 et cela en fonction des saisons et aussi en fonction du stade de croissance de la plante (tableau 7.2). À partir des valeurs obtenues pour le bassin versant de la rivière Cau, celles adoptées pour le bassin versant de la rivière Cong sont également présentées dans le tableau 7.2, compte tenu des similitudes entre les deux bassins versants d'un point de vue types de sols, météorologie, etc.

Les valeurs de K_c et de K_{inf} en saison des pluies dans les deux bassins versants sont identiques. En saison sèche, les rizières sont irriguées par le lac Nuicoc dans le bassin versant de la rivière

Cong. Des valeurs ont été adoptées pour K_c et K_{inf} en se basant sur les caractéristiques de la saison sèche (p. ex. le caractère sec de la saison et du sol entraîne une augmentation de l'infiltration par rapport à la saison des pluies, l'évapotranspiration est plus faible en saison sèche qu'en saison des pluies, etc.).

Tableau 7.2 : Paramètres ajustés du sous-modèle des rizières

Période		Dates	Bassin versant de Cau		Bassin versant de Cong	
			K_c	K_{inf}	K_c	K_{inf}
Saison sèche	Préparation du sol	21/1-4/2			0,9	0,9
	Phase végétative	5/2-26/3			1	0,8
	Phase de reproduction	27/3-15/5			1,2	0,7
	Phase maturation	16/5-14/6			1	0,6
Saison des pluies	Préparation du sol	21/6-30/6	1	0,5	1	0,5
	Phase végétative	1/7-14/8	1,05	0,6	1,05	0,6
	Phase de reproduction	15/8-28/9	1,3	0,7	1,3	0,7
	Phase de maturation	29/9-28/10	1	0,8	1	0,8

7.2.3 Résultats

Les hydrogrammes simulés, en tenant compte du fonctionnement hydrologique des rizières, et observés en période de culture du riz en saison des pluies dans le bassin versant de la rivière Cau sont présentés à la figure 7.3. Ces résultats montrent que les courbes de débits simulés et observés se superposent assez bien. Les pics principaux des crues de simulation et d'observation ont la même l'amplitude; il existe une seule différence plus marquée de pic simulé le 15/7/2007. Les décalages entre les deux courbes de débits simulés et observés sont acceptables. Le calcul des trois indicateurs de performance du modèle a permis d'obtenir sur la période de calage les valeurs suivantes : 0,72 pour le coefficient de Nash-Sutcliffe, 1,08 pour la RCEQM et 6 % pour l'ERVET. On considère que ces valeurs sont très acceptables.

Par la suite, les valeurs ajustées des paramètres ont servi à effectuer la validation du modèle en saison des pluies sur la période 2008-2009. On retrouve à la figure 7.4 les hydrogrammes observés et simulés à la station Giabay. Dans la période de validation, les débits simulés représentent assez bien les débits observés. Les courbes de débits simulés et observés se superposent bien. Les pics des crues simulés et observés ont des amplitudes similaires. Les trois indicateurs de performance du modèle dans la période de validation sont : 0,78 pour le coefficient de Nash-Sutcliffe, 2,17 pour la RCEQM et 11 % pour l'ERVET. Ces résultats montrent que les valeurs des paramètres de calage du modèle HYDROTEL avec le

fonctionnement hydrologique des rizières sont acceptables pour être appliquées au sous-bassin versant de la rivière Cong.

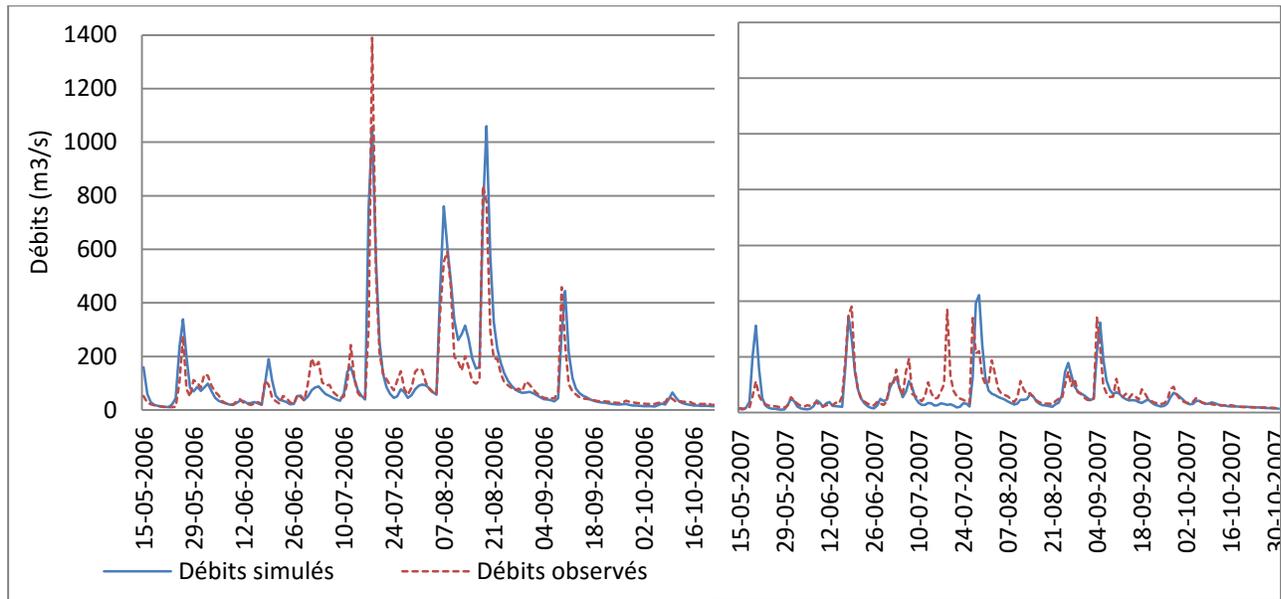


Figure 7.3 : Hydrogrammes simulés et observés à la station Giabay en saison des pluies sur la période 2006-2007 (période de calage)

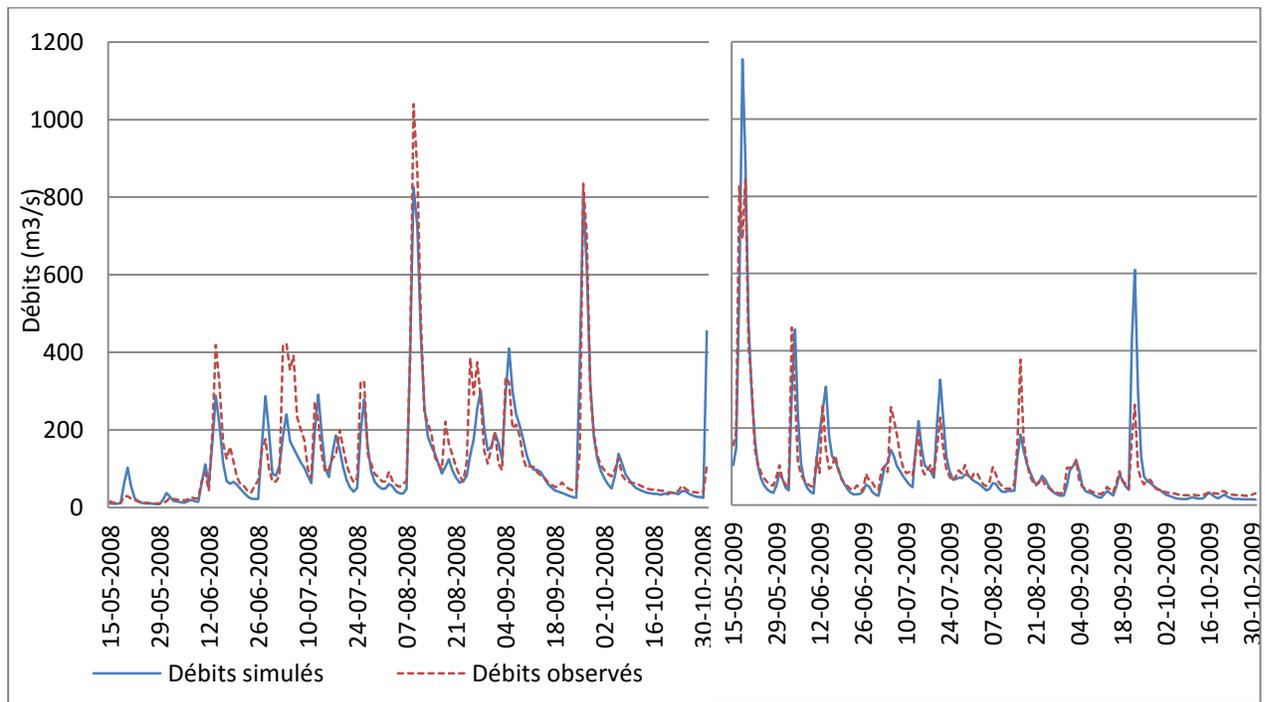


Figure 7.4 : Hydrogrammes simulés et observés à la station Giabay en saison des pluies sur la période 2008-2009

Discussions: Évaluation du niveau d'amélioration des résultats de simulation

La comparaison des résultats de simulations hydrologiques avec et sans la prise en compte du fonctionnement des rizières a été effectuée. L'objectif est d'évaluer le niveau d'amélioration des résultats de simulation. Pour ce faire, deux situations différentes ont été considérées : (1) simulation sans faire de distinction entre le fonctionnement hydrologique des rizières et celui des autres surfaces agricoles et (2) simulation en tenant compte d'une différence de fonctionnement hydrologique entre les rizières et les autres surfaces agricoles. Dans le cadre de cette évaluation, la carte d'occupation du territoire élaborée par Hoang (2014) a été utilisée. Les résultats ont permis de remarquer une amélioration des indicateurs de performance des modèles (tableau 7.3), c'est-à-dire une amélioration de la simulation hydrologique lorsque le fonctionnement des rizières a été pris en compte à partir du sous-modèle développé. Le coefficient de Nash passe de 0,66 à 0,73, la RCEQM est quasiment constante et l'erreur relative sur le volume de l'écoulement total passe de 6,6 % à environ 2 %. Même si le niveau d'amélioration peut apparaître comme n'étant pas significatif, il est important de rappeler que dans le bassin versant de la rivière Cau, la surface de rizière représente seulement 8,2 % de la surface du bassin versant. Cette proportion est plus importante dans le sous-bassin versant de la rivière Cong (12,7 %) et ce sous-modèle devrait avoir plus d'incidence sur la simulation hydrologique.

Les hydrogrammes simulés et observés sont également présentés par année, pour des raisons de clarté aux figures A.7.1; A.7.2; A.7.3 et A.7.4 en Annexe. L'observation visuelle de ces courbes montre que la simulation avec le sous-modèle des rizières reproduit généralement mieux les observations qu'HYDROTEL sans les rizières.

Tableau 7.3 : Comparaison des indicateurs de performance sur la période 2006-2009

Indicateurs de performance du modèle	Rizières et autres surfaces agricoles identiques	Rizières et autres surfaces agricoles différentes
NASH	0,66	0,73
RCEQM (m ³ /s)	1,4	1,38
ERVET (%)	6,6	2,2

7.3 Analyses d'impacts de scénarios d'aménagements hydroagricoles sur le régime d'écoulement de la rivière

7.3.1 Méthodologie d'analyse

Le principal objectif de cette section est d'évaluer les impacts de quelques aménagements agricoles possibles sur l'hydrologie du bassin versant. Pour ce faire, la méthode générale consiste à considérer un état de référence du bassin versant et à comparer cet « état de référence » avec un « état modifié » en vue d'en déduire les impacts possibles.

7.3.1.1 Choix des conditions météorologiques

Compte tenu des variabilités des précipitations, différentes conditions météorologiques ont été prises en compte dans l'analyse d'impacts et cela pour les deux saisons (saison sèche et saison des pluies) dans une année. Ces conditions météorologiques ont été choisies à partir de différents critères portant sur le drainage et l'irrigation des rizières (MRE, 1985 et 1990; Le, 2011). Ainsi, les conditions météorologiques suivantes ont été appliquées aux différents scénarios pour les études d'impacts. Dans les données météorologiques, les données disponibles de précipitations ayant servi de base pour le choix des conditions pluviométriques sont celles de 12 stations d'observation sur une période 49 ans (1961 à 2009). Les précipitations moyennes sur le bassin versant calculées à partir d'Hydrotel selon la méthode de Thiessens sont résumées dans le tableau A.7.1 en Annexe.

(i) En saison sèche : Durant cette saison, l'irrigation des rizières est plus importante que le drainage à cause du déficit pluviométrique important. La condition choisie pour une année sèche est l'année dont la pluviométrie totale en saison sèche a une probabilité de dépassement de 85 %, alors que l'année choisie pour représenter les conditions moyennes est l'année dont la pluviométrie totale en saison sèche a une probabilité de dépassement de 50 %. Ainsi, pour la saison sèche, l'année 1995 est choisie comme année sèche et l'année 2002 correspond à l'année de pluviométrie moyenne. Ces résultats sont résumés dans le tableau A.7.3 en Annexe.

(ii) Saison des pluies : Pour cette saison, on choisit une année humide, pour laquelle la pluviométrie totale en saison humide a une probabilité de dépassement de 10 % ; et une année de pluviométrie moyenne, pour laquelle la pluviométrie totale en saison humide a une probabilité de dépassement de 50 %. Ainsi, pour les analyses d'impacts, l'année 2008 a été retenue comme année humide et l'année 1981 a été choisie comme année moyenne (voir tableau A.7.4 en Annexe).

Scénarios d'étude

En s'appuyant sur les politiques de développement agricole et de protection des ressources en eau dans le bassin versant (GNV, 2009), quelques scénarios ont été considérés sur la base de différents critères (tableau 7.4), afin d'étudier leurs impacts sur le régime d'écoulement de la rivière. Ces scénarios permettront d'évaluer l'effet des aménagements agricoles, comme l'extension des rizières et la réaffectation de rizières en terres agricoles non inondées, sur les débits en rivière et sur l'écoulement dans le bassin versant.

Les trois scénarios d'analyse proposés dans cette recherche sont les suivants :

- (i) Scénario 1 pour l'analyse d'impact des rizières actuelles : Conversion de toutes les rizières dans le bassin versant en terres agricoles non inondables. La superficie totale des rizières en amont et en aval du lac (11 463 ha, soit 12,7 % de la surface du bassin versant) est considérée comme étant occupée par des cultures non inondables, ce qui donne un total de 27 499 ha de terres agricoles non inondables représentant 30,4 % de la surface du bassin versant de la rivière Cong. Un tel scénario a été proposé pour évaluer l'impact des rizières actuelles sur l'hydrologie du bassin versant.
- (ii) Scénario 2 pour une augmentation de 30 % de la surface totale des rizières dans le bassin versant, en amont et en aval du lac. La surface des rizières atteindrait ainsi 15 130 ha, soit 16,7 % de la superficie totale du bassin versant. La localisation des nouvelles surfaces de rizières est choisie de manière aléatoire parmi les terres agricoles actuelles et sans tenir compte du type de sol.
- (iii) Scénario 3 pour une réaffectation temporaire de 30 % des rizières en cultures non inondables. Pour ce scénario, 3 552 ha de rizières sont convertis en cultures non inondables. Le choix des 30 % est complètement aléatoire; l'objectif poursuivi en considérant ce type d'analyse est de comprendre le comportement hydrologique du bassin versant suite à une baisse partielle de la surface totale des rizières. La surface finale des rizières serait de 7 911 ha, soit 8,7 % de la surface du bassin versant.

Tableau 7.4 : Résumé des différentes analyses d'impacts et des scénarios

No	Analyses	Scénarios de référence*	Scénarios d'analyse**
1	Impacts des rizières en saison sèche	Occupation actuelle des terres dans le bassin versant en saison sèche avec les rizières irriguées à partir du lac	Occupation des terres dans le bassin versant à la même période avec la classe rizière convertie en classe agricole
	Impacts des rizières en saison des pluies	Occupation actuelle des terres dans le bassin versant en saison des pluies	Occupation des terres dans le bassin versant à la même période avec la classe rizière convertie en classe agricole
2	Impacts de l'augmentation de la surface des rizières en saison des pluies	Occupation actuelle des terres dans le bassin versant en saison des pluies	Conversion de terres agricoles en rizières pour augmenter les rizières de 30 %
	Impacts de l'augmentation de la surface des rizières en saison sèche	Occupation actuelle des terres dans le bassin versant en saison sèche avec les rizières irriguées à partir du lac	Conversion de terres agricoles en rizières pour augmenter les rizières irriguées de 30 %
3	Impacts de la réaffectation temporaire de rizières en cultures en saison des pluies	Occupation actuelle des terres dans le bassin versant avec les rizières en saison des pluies	Conversion de 30 % de la classe rizière en terres agricoles non inondées
	Impacts de la réaffectation temporaire de rizières en saison sèche	Occupation actuelle des terres dans le bassin versant en saison sèche avec les rizières irriguées à partir du lac	Conversion de 30 % des rizières irriguées à partir du lac en terres agricoles non inondées

* Scénario de référence : scénario considéré comme état de référence du bassin versant

** Scénario d'analyse : scénario correspondant à l'état modifié du bassin versant

7.3.1.2 Critères d'analyse

Pour comparer, les scénarios, les débits journaliers à l'exutoire du bassin versant ainsi que le volume total de l'écoulement dans le bassin versant ont été retenus comme variables de comparaison. Le débit en rivière est une variable qui permet de juger de l'effet temporel de l'aménagement sur l'écoulement dans la rivière puisque cet écoulement doit permettre de répondre aux besoins de l'ensemble des usagers, y compris une fonction écologique. La superposition des hydrogrammes issus des deux scénarios permet de porter un jugement qualitatif de l'effet de l'aménagement sur l'écoulement en rivière. Le volume de l'écoulement total dans le bassin versant permet de juger d'un point de vue quantitatif de l'influence d'un aménagement agricole donné sur l'écoulement dans le bassin versant. Étant donné que les rizières ont été modélisées comme de petits réservoirs qui stockent et drainent de l'eau en fonction des besoins et tout au long de la période de culture, le volume total de l'écoulement dans le bassin versant apparaît comme une variable d'intérêt pour cette étude. Ainsi, pour comparer deux scénarios entre eux, des écarts relatifs ont été calculés sur le volume total de l'écoulement de la manière suivante :

$$ERV = \frac{V_{\text{Scénarios-analyse}} - V_{\text{Scénario-référence}}}{V_{\text{Scénario-référence}}} \times 100 \% \quad (\text{Éq. 7.1})$$

Avec :

ERV : écart relatif en % sur le volume d'écoulement;

$V_{\text{scénario-référence}}$: volume total de l'écoulement pour le scénario de référence (m³);

$V_{\text{scénario-analyse}}$: volume total de l'écoulement pour le scénario d'analyse (m³).

ERV a été calculé pour l'ensemble de la rotation de riz ainsi que pour chaque stade de croissance du riz afin de comprendre le comportement hydrologique du bassin versant durant les différents stades de croissance du riz. Ces écarts permettront de comprendre l'influence de la culture du riz sur l'hydrologie du bassin versant non seulement pour l'ensemble d'une saison (ou rotation), mais aussi en fonction du stade de croissance des plantes.

7.3.2 Résultats

7.3.2.1 Scénario d'analyse 1 : Impacts des rizières sur le régime d'écoulement en rivière

(i)- Impacts des rizières sur le régime d'écoulement en rivière dans la saison sèche

En saison sèche, les deux scénarios de simulation comparés sont (i) un scénario de référence, avec une surface de rizières de 2 612 ha, soit 2,9 % de la surface totale du bassin versant (pour rappel, ce ne sont pas toutes les rizières qui sont cultivées en saison sèche); et (ii) le scénario d'analyse qui considère que toutes les cultures sont non inondées. La période de simulation est la saison sèche 1995, pour l'année sèche, et la saison sèche 2002, pour l'année de pluviométrie moyenne.

Les hydrogrammes obtenus à l'exutoire du bassin versant pour les deux scénarios sont présentés à la figure 7.5 pour l'année sèche et à la figure 7.6 pour l'année moyenne. Pour les deux figures, et cela de manière générale, une bonne superposition des deux hydrogrammes peut être remarquée. Mais une observation plus fine permet de remarquer qu'entre le 21/1 et le 25/3 (début de la rotation), la courbe du scénario de référence est légèrement au-dessus de celle du scénario d'analyse. Il faut noter que, durant cette période, les précipitations sont généralement négligeables. Par la suite, la courbe de débits du scénario d'analyse a tendance à être légèrement au-dessus de celle du scénario de référence et cela jusqu'à la fin de la rotation vers le 15 juin de l'année. À cette période apparaissent les premières pluies de la saison des pluies. En effet, la saison sèche se termine le 15/05.

Durant l'année sèche, 1995, l'évaluation quantitative de l'impact des rizières à partir de l'écart relatif entre les volumes d'écoulement dans le bassin versant pour la rotation entière a permis de remarquer que le volume total d'écoulement pour le scénario d'analyse diminue de 3,2 % par rapport au scénario de référence. En ce qui concerne les étapes de croissance du riz, les écarts relatifs obtenus pour les deux scénarios d'analyse et de référence, et cela pour les quatre périodes de croissance du riz, sont présentés à la figure 7.7. Il peut être remarqué que dans la phase de préparation du sol (21/01-04/02), le volume total d'écoulement pour le scénario d'analyse diminue d'environ 17 % par rapport au scénario de référence, cette diminution étant expliquée par la réduction des apports venant du lac pour l'irrigation des rizières (amenant aussi une diminution de l'évapotranspiration et de l'infiltration à partir des rizières), par rapport au scénario de référence. Dans la phase végétative du riz, le volume total d'écoulement pour le

scénario d'analyse a diminué de 4,3 % par rapport au scénario de référence. Dans la phase de reproduction, du 27/3 au 15/5, le volume total d'écoulement dans le scénario d'analyse augmente de 0,7 % par rapport au scénario de référence. À la phase de maturation, il y a des précipitations, et dans ce cas le volume total d'écoulement du scénario d'analyse augmente de 5,7 % par rapport au scénario de référence. Durant cette phase, les rizières stockent une portion des précipitations pour diminuer le flux sur le réseau hydrographique, ce qui cause un changement de débit de la rivière en raison de l'impact des rizières, comme on peut l'observer à la figure 7.5.

Dans l'année moyenne (2002), la tendance en matière d'impact est identique que pour l'année sèche, mais moins élevée. Cela voudrait dire que l'impact des rizières pour l'année moyenne est moins fort que pour l'année sèche.

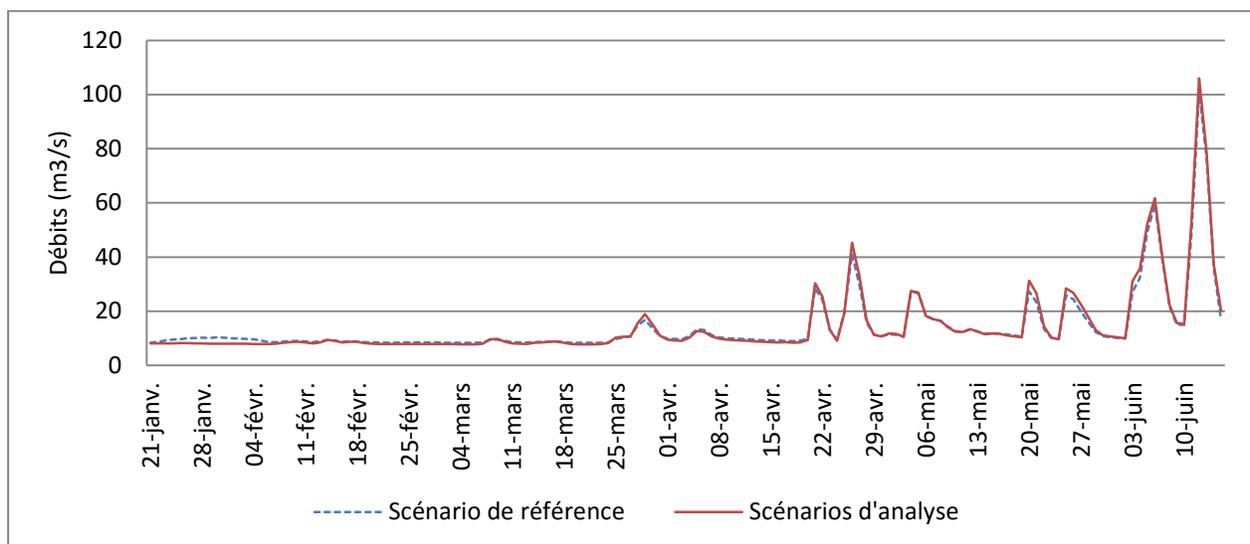


Figure 7.5 : Hydrogramme à l'exutoire du bassin versant en saison sèche pour l'année sèche 1995 (scénario 1)

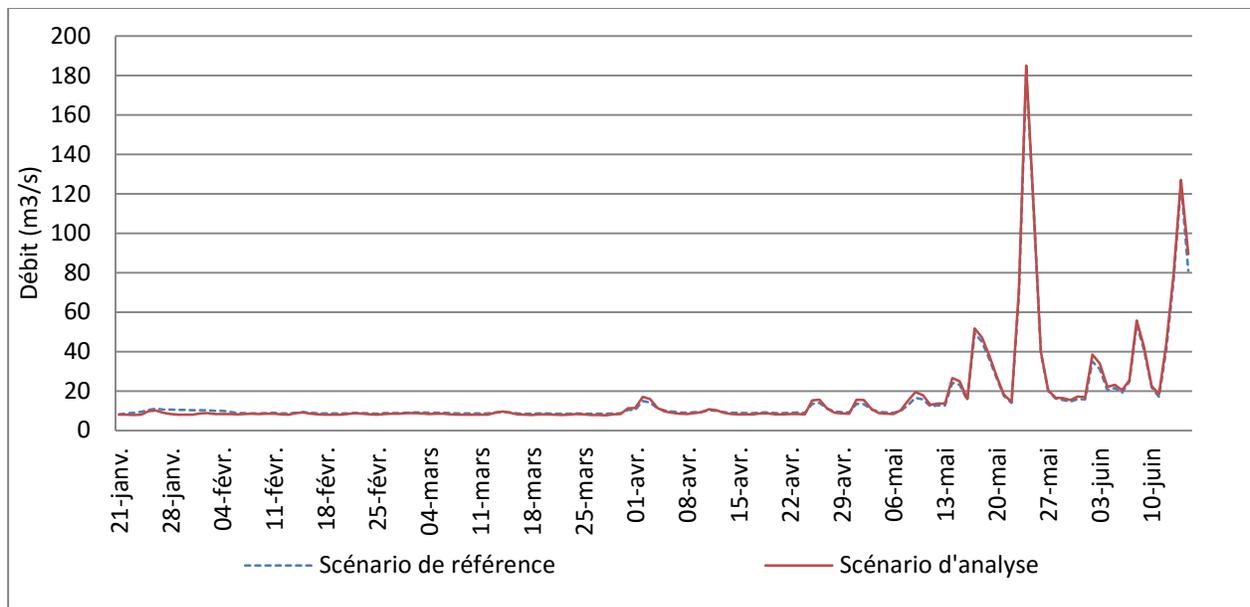


Figure 7.6 : Hydrogramme à l'exutoire du bassin versant en saison sèche pour l'année moyenne 2002 (scénario 1)

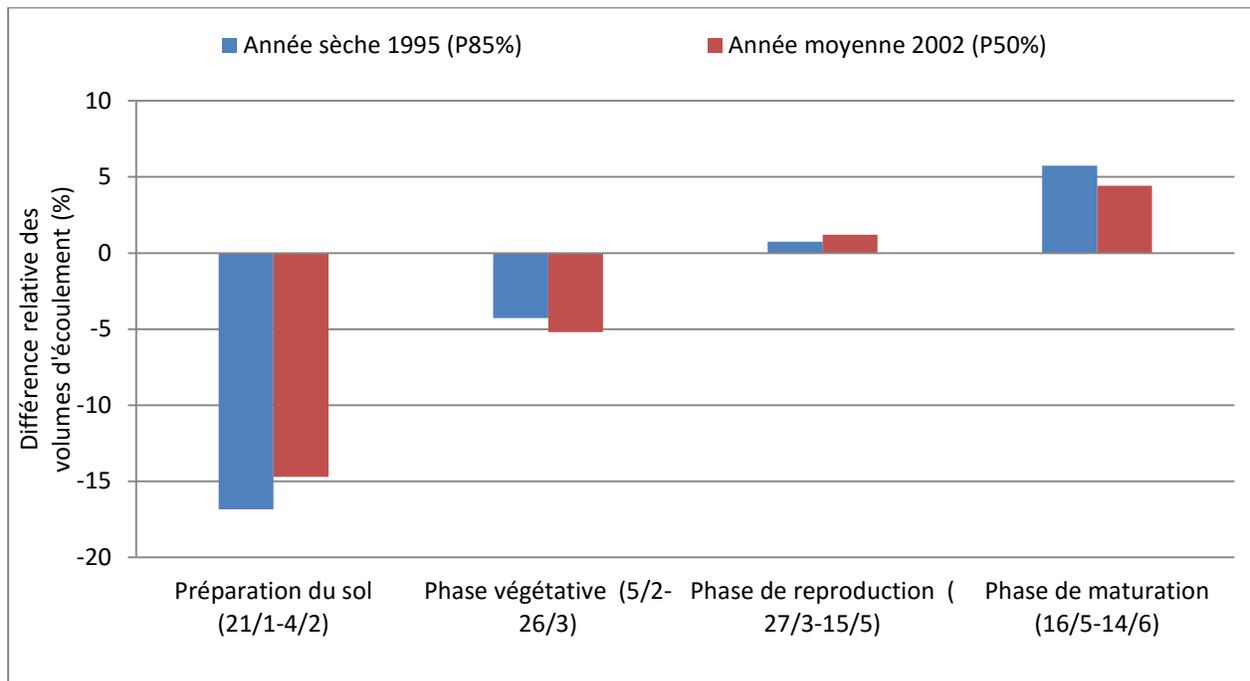


Figure 7.7 : Différence relative de volume d'écoulement en fonction des étapes de croissance du riz en saison sèche pour l'année sèche et pour l'année moyenne (scénario 1)

(ii)- Impacts des rizières sur le régime d'écoulement en rivière en saison des pluies

En saison des pluies, les deux scénarios de simulation comparés sont : (i) un scénario de référence, avec une surface de rizières de 11 463 ha, soit 12,7 % de la surface totale du bassin versant (pour rappel, toutes les rizières sont cultivées en saison des pluies); et (ii) le scénario d'analyse, qui considère que les 11 463 ha des rizières sont converties en terres agricoles non inondables, c'est-à-dire qu'il n'existe plus de rizières sur le bassin versant et que les terres agricoles dans le bassin versant couvrent 27 500 ha, soit 30,3 % de la surface du bassin versant. Les périodes de simulation sont la saison des pluies de l'année 2008, comme année représentative de pluviométrie forte, et la saison des pluies de l'année 1981, comme année de pluviométrie moyenne.

Les hydrogrammes obtenus à l'exutoire du bassin versant pour les deux scénarios sont présentés à la figure 7.8 pour l'année humide et à la figure 7.9 pour l'année de pluviométrie moyenne. Pour les deux figures, et cela de manière générale, une bonne superposition des deux hydrogrammes peut être remarquée. La courbe du scénario d'analyse est au-dessus de celle du scénario de référence. La différence entre les deux courbes n'est pas uniforme.

Durant l'année humide, 2008, l'évaluation quantitative de l'impact des rizières à partir de l'écart relatif entre les volumes d'écoulement dans le bassin versant pour la rotation entière a permis de remarquer que le volume total d'écoulement pour le scénario d'analyse augmente d'environ 12 % par rapport au scénario de référence. En ce qui concerne les étapes de croissance du riz, les écarts relatifs obtenus pour les deux scénarios d'analyse et de référence, et cela pour les quatre périodes de croissance du riz sont, présentés à la figure 7.10. Il peut être remarqué que dans la phase de préparation du sol (21/6-30/6), le volume total d'écoulement pour le scénario d'analyse augmente de 48 % par rapport au scénario de référence. Dans la phase végétative du riz, du 1/7 au 14/8, le volume total d'écoulement pour le scénario d'analyse augmente d'environ 12 % par rapport au scénario de référence. Dans la phase de reproduction, du 15/8 au 28/9, le volume total d'écoulement dans le scénario d'analyse monte d'environ 9 % par rapport au scénario de référence. À la phase de maturation, du 29/9 au 28/10, il y a peu de précipitations, alors le volume total d'écoulement du scénario d'analyse augmente d'environ 2 % par rapport au scénario de référence.

Dans l'année de pluviométrie moyenne (1981), pour la rotation entière, le volume total d'écoulement pour le scénario d'analyse diminue de 16,0 % par rapport au scénario de référence. Pour les étapes de croissance du riz, le résultat de l'écart relatif a montré qu'à la phase de préparation du sol (21/6-30/6), le volume d'écoulement pour le scénario d'analyse baisse de 8 % par rapport au scénario de référence. Durant la phase végétative, le volume d'écoulement pour le scénario d'analyse diminue de 40 % par rapport au scénario de référence. Dans la phase de reproduction, le volume total d'écoulement baisse de 15,5 % par rapport au scénario de référence. À la phase de maturation, le volume total d'écoulement baisse de 2,1 %.

Dans l'année de pluviométrie moyenne (1981), la tendance est identique à celle de l'année humide, mais l'impact est un peu plus élevé. Cela veut dire que l'impact des rizières pour l'année de pluviométrie moyenne est plus élevé que durant l'année humide.

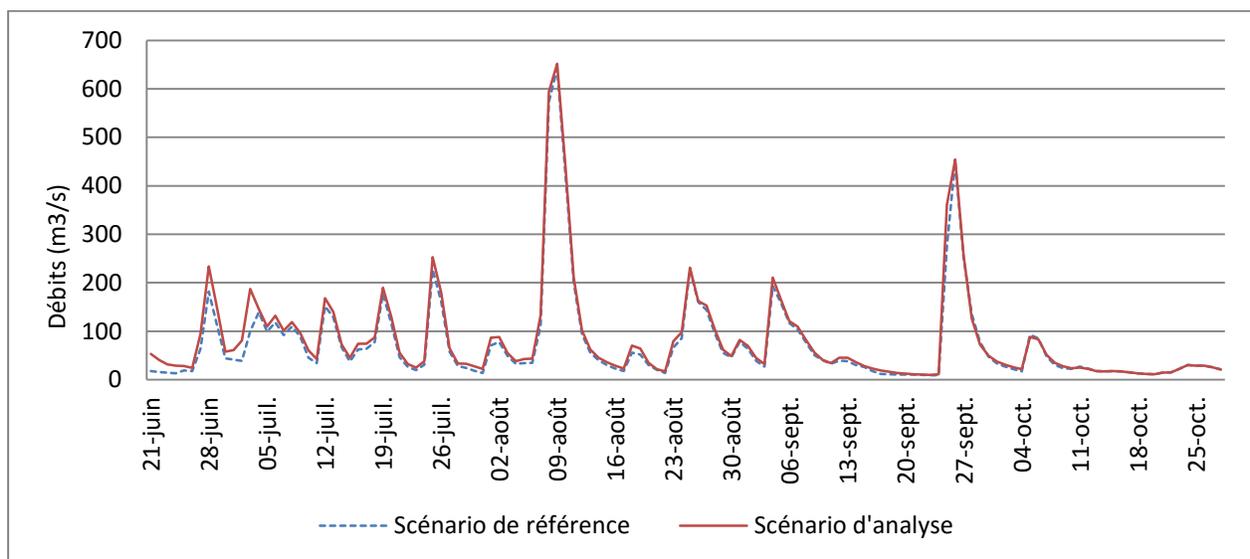


Figure 7.8 : Hydrogramme à l'exutoire du bassin versant en saison des pluies pour l'année humide 2008 (scénario 1)

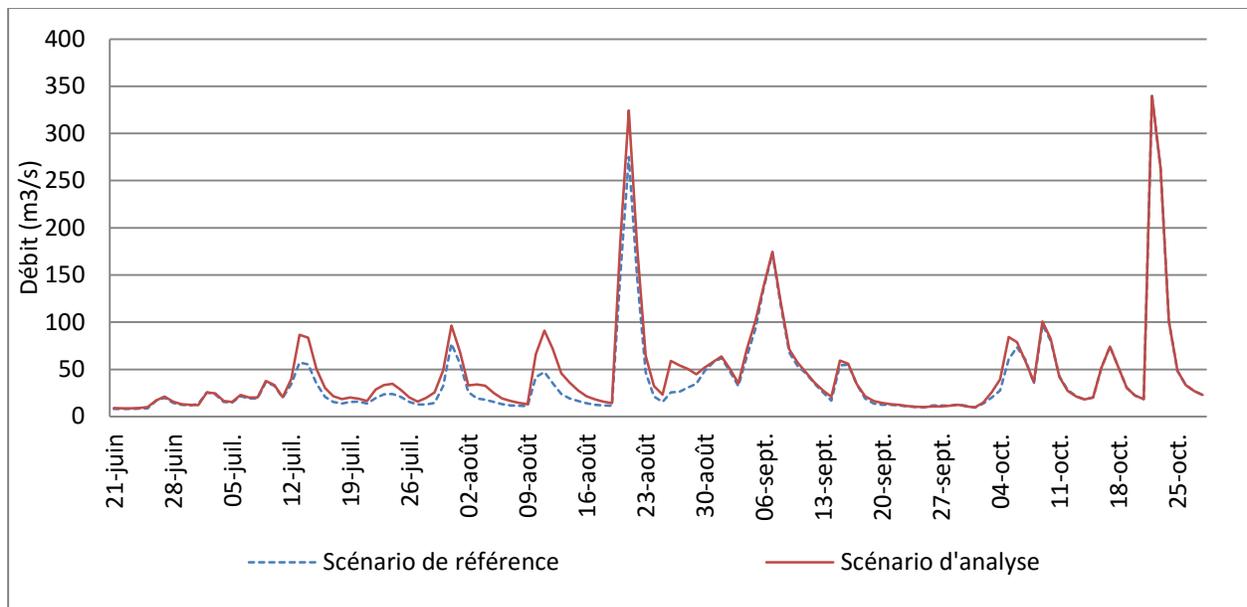


Figure 7.9 : Hydrogramme à l'exutoire du bassin versant en saison des pluies pour l'année de pluviométrie moyenne 1981 (scénario 1)

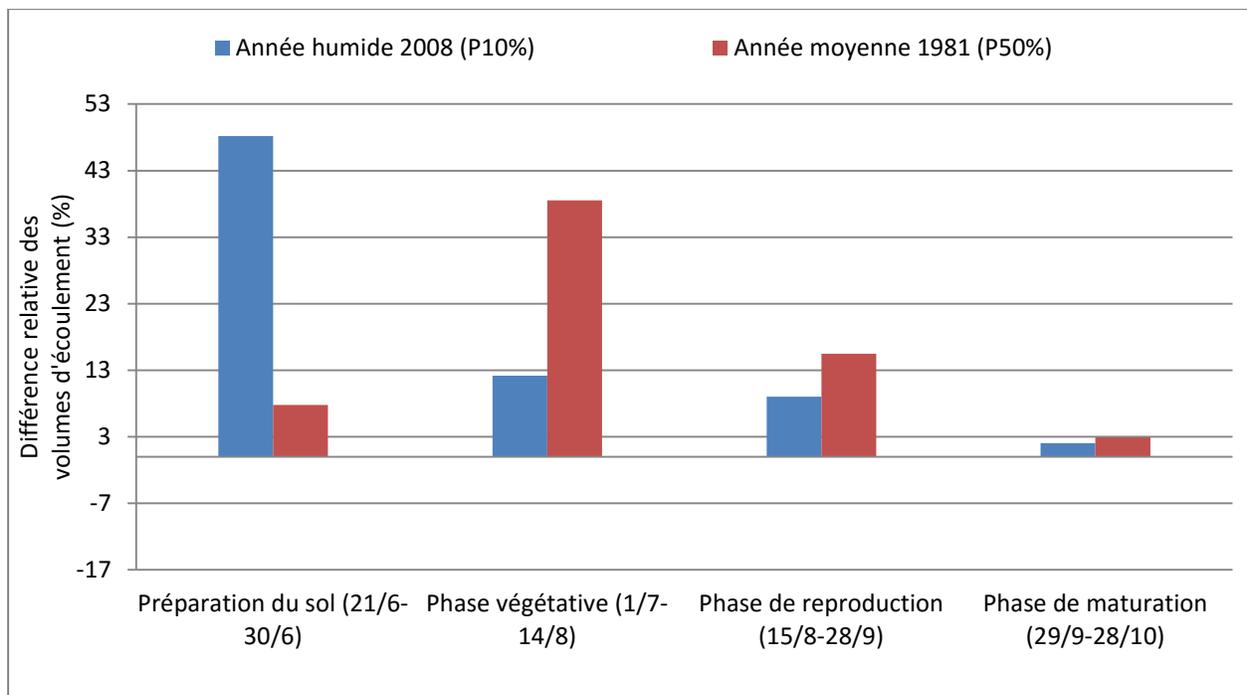


Figure 7.10 : Différence relative des volumes d'écoulement en fonction des étapes de croissance du riz en saison des pluies pour l'année humide et pour l'année de pluviométrie moyenne (scénario 1)

7.3.2.2 *Scénario d'analyse 2 : Conversion de terre agricole en rizières pour augmenter les rizières de 30 %*

(i)- Impacts de l'implantation des rizières sur l'écoulement en rivière pendant la saison sèche

En saison sèche, les deux scénarios de simulation comparés sont : (i) un scénario de référence, avec une surface de rizières de 2 612 ha, soit 2,9 % de la surface totale du bassin versant; et (ii) le scénario d'analyse, qui considère que la surface des rizières est augmentée de 30 % en utilisant une partie des terres agricoles. Dans le scénario d'analyse, la surface des rizières est de 4 007 ha, ce qui représente 4,4 % de la surface du bassin versant. La période de simulation est la saison sèche de 1995 pour l'année sèche et la saison sèche de 2002 pour l'année de pluviométrie moyenne.

Les hydrogrammes obtenus à l'exutoire du bassin versant pour les deux scénarios sont présentés à la figure 7.11 pour l'année sèche et à la figure 7.12 pour l'année moyenne. Pour les deux figures, et cela de manière générale, une bonne superposition des deux hydrogrammes peut être remarquée. Au début de la rotation, entre le 21/1 et le 25/3, la courbe du scénario d'analyse est légèrement au-dessus de celle du scénario de référence; il faut noter que durant cette période, les précipitations sont généralement négligeables. À la fin de la rotation, entre le 25/3 et le 15/6, la courbe du scénario d'analyse est un peu au-dessous de celle du scénario de référence; il commence à y avoir un peu de précipitations au cours de cette période.

Durant l'année sèche, 1995, l'évaluation quantitative de l'impact de l'implantation des rizières à partir de l'écart relatif entre les volumes d'écoulement dans le bassin versant pour la rotation entière a permis de remarquer que le volume total d'écoulement pour le scénario d'analyse augmente de 1,8 % par rapport au scénario de référence. En ce qui concerne les étapes de croissance du riz, les écarts relatifs obtenus pour les deux scénarios d'analyse et de référence, et cela pour les quatre périodes de croissance du riz, sont présentés à la figure 7.13. Il peut être remarqué que dans la phase de préparation du sol (21/01-04/02), le volume total d'écoulement pour le scénario d'analyse augmente d'environ 9 % par rapport au scénario de référence. Dans la phase végétative du riz, le volume total d'écoulement pour le scénario d'analyse augmente de 3,2 % par rapport au scénario de référence. Dans la phase de reproduction, du 27/3 au 15/5, le volume total d'écoulement dans le scénario d'analyse diminue d'environ 1 % par rapport au scénario de référence. À la phase de maturation, il y a un peu de précipitations et le volume total d'écoulement au scénario d'analyse diminue de 3,2 % par rapport au scénario de référence.

Pendant les deux dernières phases de la rotation, les rizières stockent une quantité de précipitation pour diminuer le flux sur le réseau hydrographique.

Dans l'année de pluviométrie moyenne (2002), l'impact est similaire à ce qui est observé pour l'année sèche, mais légèrement moindre. Cela veut dire que l'impact des rizières pour l'année moyenne est moins fort que durant une année sèche.

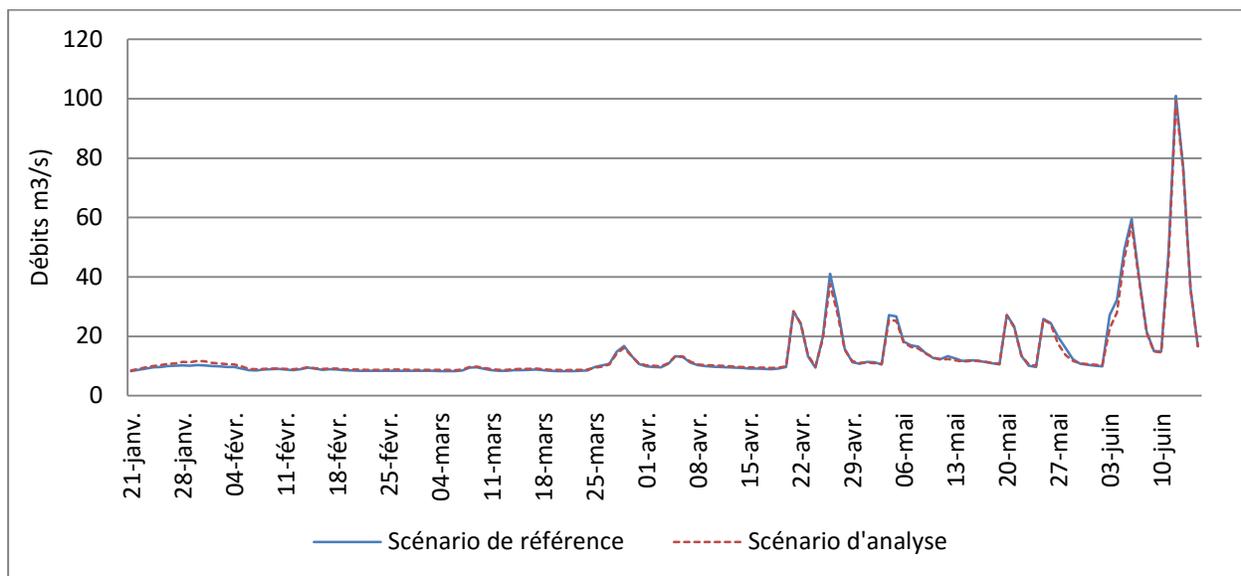


Figure 7.11 : Hydrogramme à l'exutoire du bassin versant en saison sèche pour l'année sèche 1995 (scénario 2)

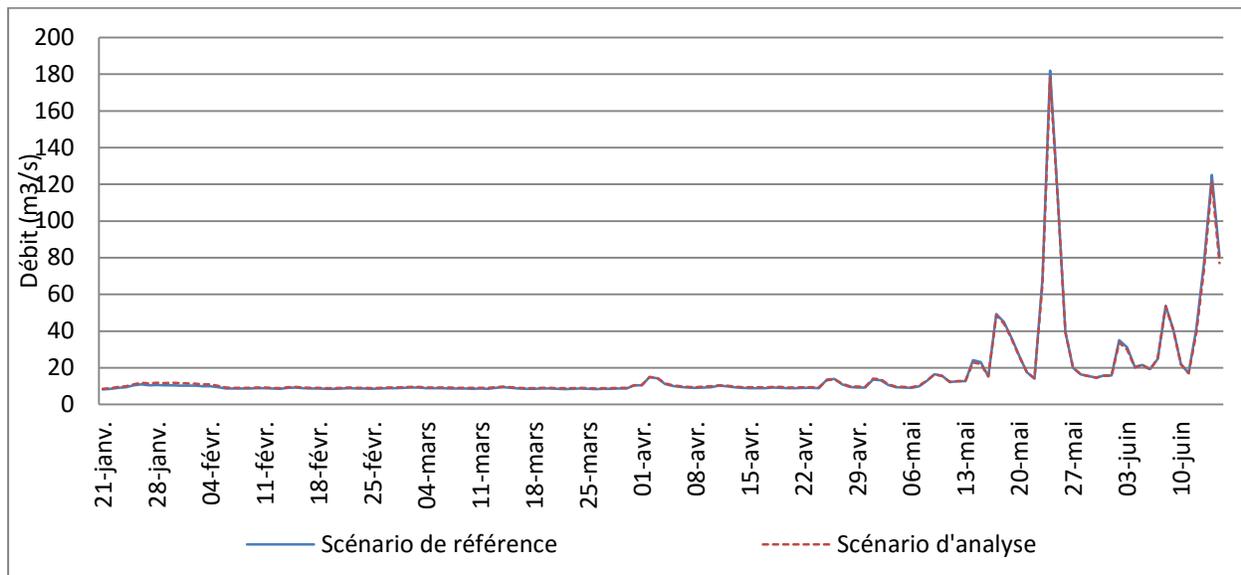


Figure 7.12 : Hydrogramme à l'exutoire du bassin versant en saison sèche pour l'année moyenne 2002 (scénario 2)

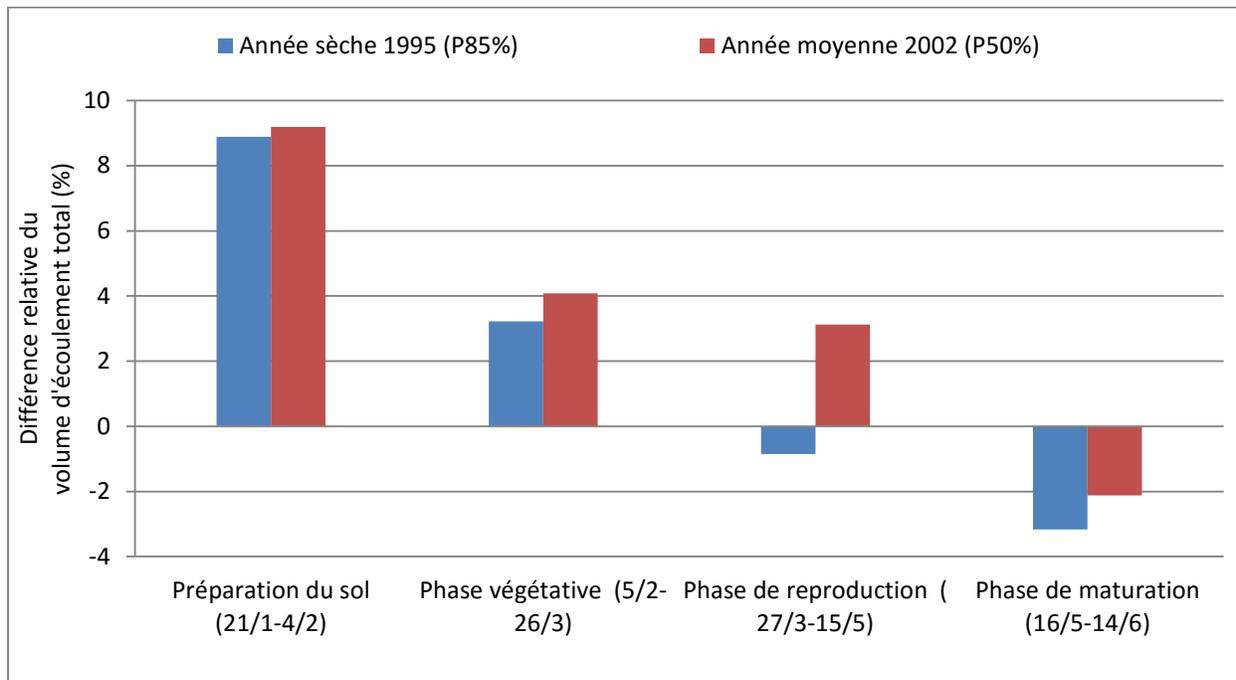


Figure 7.13 : Différence relative du volume d'écoulement en fonction des étapes de croissance du riz en saison sèche pour l'année sèche et pour l'année moyenne (scénario 2)

(ii)- Impacts de l'implantation des rizières sur l'écoulement en rivière pendant la saison des pluies.

En saison des pluies, les deux scénarios de simulation comparés sont : (i) un scénario de référence, avec une surface de rizières de 11 463 ha, soit 12,7 % de la surface totale du bassin versant; et (ii) le scénario d'analyse, qui considère qu'une partie des terres agricoles est convertie en rizières; selon ce scénario, les rizières dans le bassin versant couvrent un total de 15 130 ha, soit 16,7 % de la surface du bassin versant. La période de simulation est la saison de pluies de 2008 pour l'année de pluviométrie forte et la saison des pluies de 1981 pour l'année de pluviométrie moyenne.

Les hydrogrammes obtenus à l'exutoire du bassin versant pour les deux scénarios sont présentés à la figure 7.14 pour l'année humide et à la figure 7.15 pour l'année de pluviométrie moyenne. Dans les deux figures, et cela de manière générale, une bonne superposition des deux hydrogrammes est remarquée. La courbe du scénario d'analyse est légèrement au-

dessous de celle du scénario de référence lors des pics des crues. Il faut noter que, durant cette période, les précipitations sont fortes. La différence entre les deux courbes dépend de l'intensité des précipitations.

Durant l'année humide, 2008, on remarque que le volume total d'écoulement pour le scénario d'analyse diminue de 2,4 % par rapport au scénario de référence. En ce qui concerne les étapes de croissance du riz, les écarts relatifs obtenus entre les deux scénarios, et cela pour les quatre périodes de croissance du riz, sont présentés à la figure 7.16. On remarque que, dans la phase de préparation du sol (21/6-30/6), le volume total d'écoulement pour le scénario d'analyse diminue d'environ 1 % par rapport au scénario de référence. Dans la phase végétative du riz, du 1/7 au 14/8, le volume total d'écoulement pour le scénario d'analyse diminue d'environ 4 % par rapport au scénario de référence. Dans la phase de reproduction, du 15/8 au 28/9, le volume total d'écoulement dans le scénario d'analyse baisse de 1 % par rapport au scénario de référence. À la phase de maturation, du 29/9 au 28/10, les précipitations sont faibles, et le volume total d'écoulement dans le scénario d'analyse diminue de 0,5 % seulement par rapport au scénario de référence.

Dans l'année de pluviométrie moyenne (1981), l'impact est similaire à celui obtenu durant l'année humide, mais légèrement moins élevé. Cela veut dire que, durant une année, plus faible est le volume des précipitations, plus élevé est l'impact de l'implantation des rizières sur l'hydrologie du bassin versant. Pour la rotation entière, le volume total d'écoulement pour le scénario d'analyse diminue de 3,2 % par rapport au scénario de référence. Pour les étapes de croissance du riz, le résultat de l'écart relatif a montré que durant la phase de préparation du sol (21/6-30/6), le volume d'écoulement pour le scénario d'analyse diminue de 4,4 % par rapport au scénario de référence. Durant la phase végétative, le volume d'écoulement pour le scénario d'analyse diminue de 4,5 % par rapport au scénario de référence. Dans la phase de reproduction, le volume total d'écoulement diminue de 5 % par rapport au scénario de référence. Durant la phase de maturation, le volume total d'écoulement augmente de 0,2 % seulement.

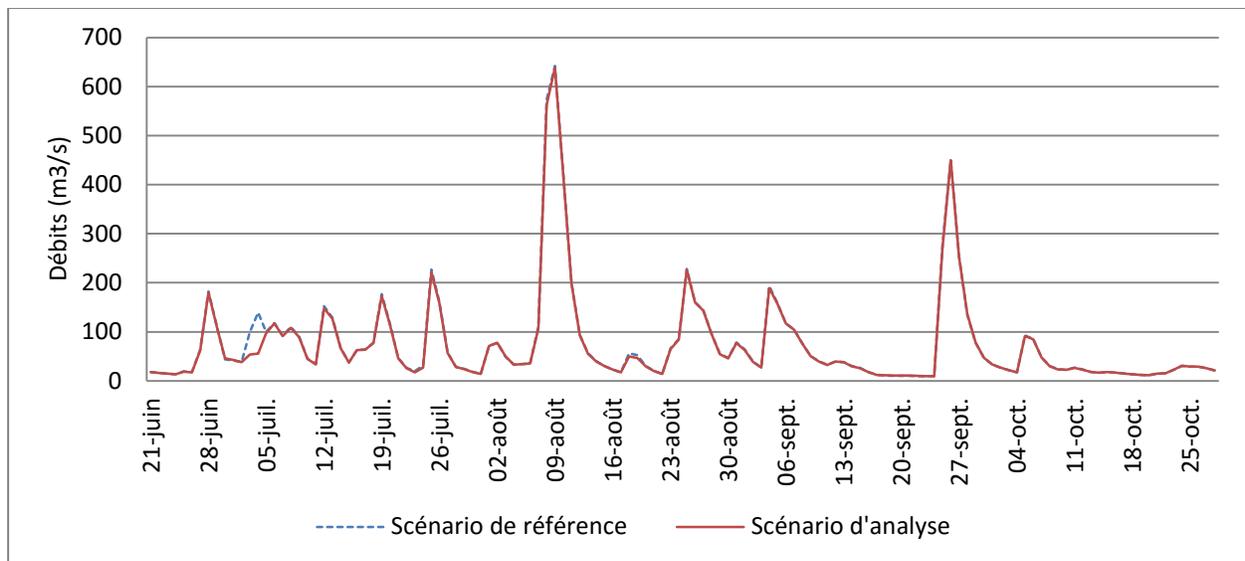


Figure 7.14 : Hydrogramme à l'exutoire du bassin versant en saison des pluies pour l'année humide 2008 (scénario 2)

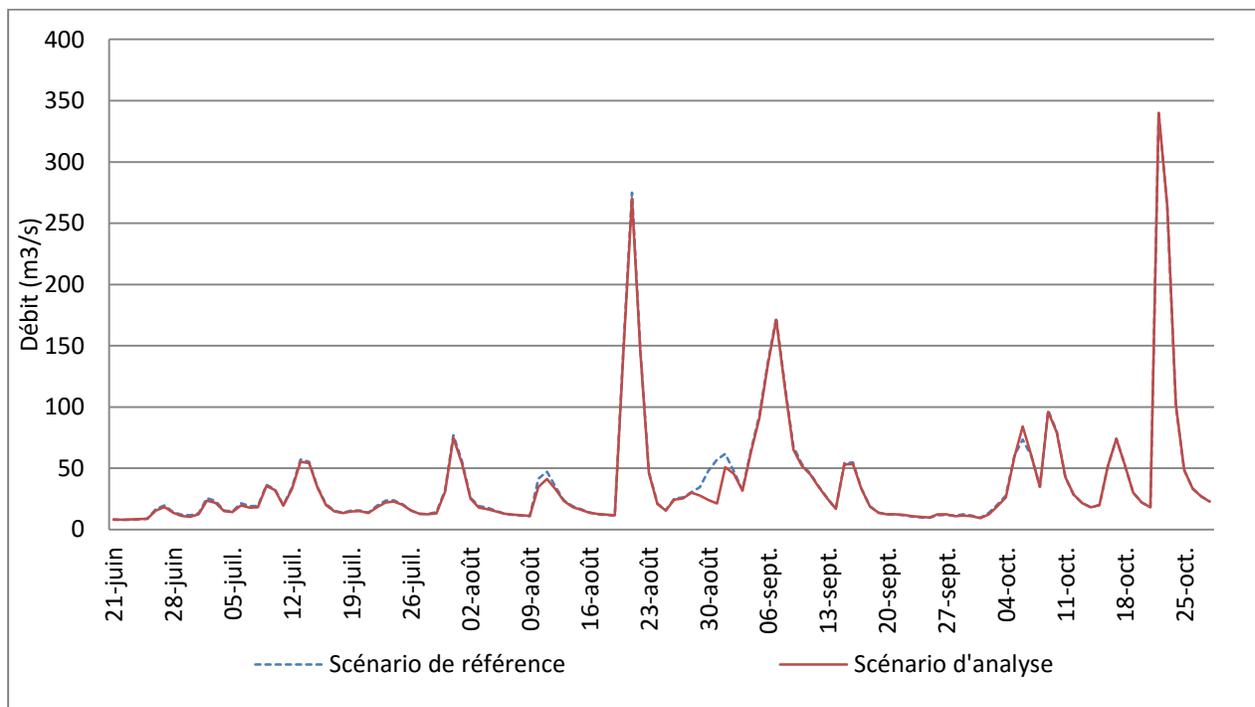


Figure 7.15 : Hydrogramme à l'exutoire du bassin versant en saison des pluies pour l'année de pluviométrie moyenne 1981 (scénario 2)

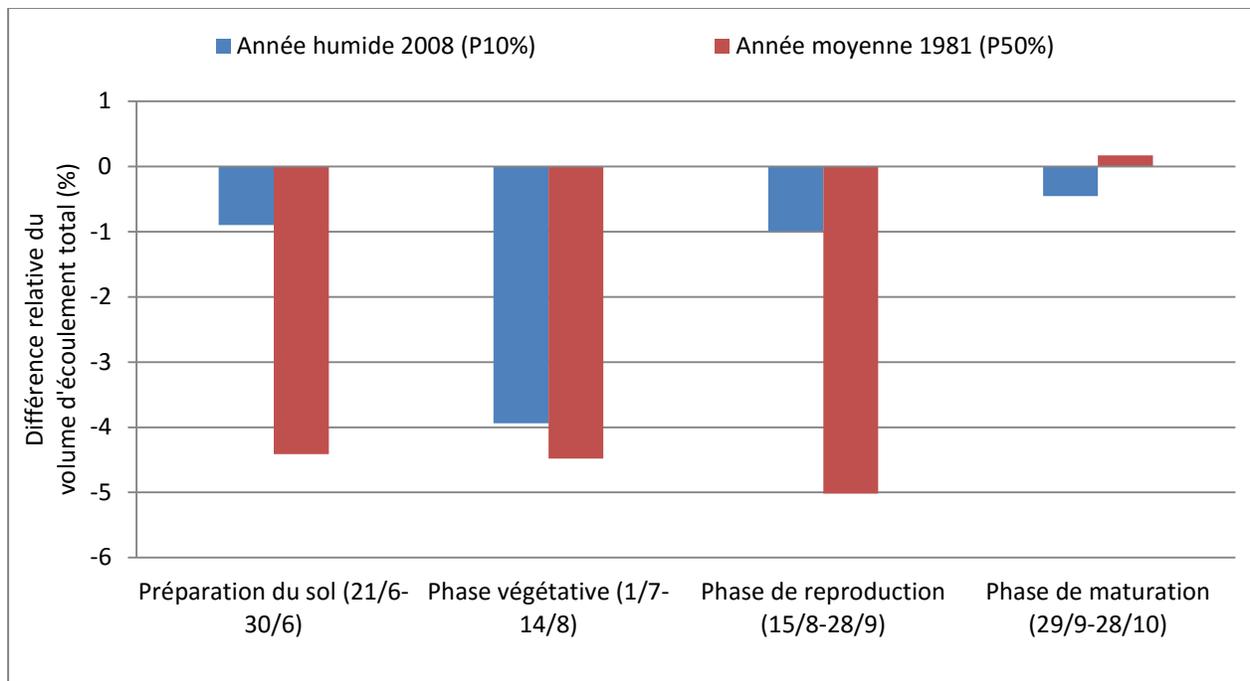


Figure 7.16 : Différence relative de volume d'écoulement en fonction des étapes de croissance du riz en saison des pluies pour l'année humide et pour l'année de pluviométrie moyenne (scénario 2)

7.3.2.3 Scénario d'analyse 3 : Conversion de 30 % des rizières en terre agricole non inondées.

(i)- Impacts de la réaffectation temporaire des rizières sur l'écoulement en rivière pendant la saison sèche

En saison sèche, les deux scénarios de simulation comparés sont : (i) un scénario de référence, avec une surface de rizières de 2 612 ha, soit 2,9 % de la surface totale du bassin versant; et (ii) le scénario d'analyse, qui considère que 30 % de la surface des rizières est convertie en terres agricoles non inondables. Dans le scénario d'analyse, la surface des rizières est de 1 861 ha, ce qui représente 2,0 % de la surface du bassin versant. La période de simulation est la saison sèche de l'année 1995, pour l'année sèche, et la saison sèche de l'année 2002, pour l'année de pluviométrie moyenne.

Les hydrogrammes obtenus à l'exutoire du bassin versant pour les deux scénarios sont présentés à la figure 7.17 pour l'année sèche et à la figure 7.18 pour l'année de pluviométrie moyenne. Dans les deux figures, et cela de manière générale, une bonne superposition des deux hydrogrammes est remarquée. Au début de la rotation, entre le 21/1 et le 25/3, la courbe du scénario d'analyse est légèrement au-dessous de celle du scénario de référence. Il faut noter

que, durant cette période, les précipitations sont généralement négligeables. À la fin de la rotation, entre le 25/3 et le 15/6, la courbe du scénario d'analyse est légèrement au-dessus de celle du scénario de référence.

Durant l'année sèche, 1995, l'évaluation quantitative montre que le volume total d'écoulement pour le scénario d'analyse diminue de 1,9 % par rapport au scénario de référence. En ce qui concerne les étapes de croissance du riz, les écarts relatifs obtenus pour les deux scénarios d'analyse et de référence, et cela pour les quatre périodes de croissance du riz, sont présentés à la figure 7.19. On remarque que, dans la phase de préparation du sol (21/01-04/02), le volume total d'écoulement pour le scénario d'analyse augmente de 11,6 % par rapport au scénario de référence. Dans la phase végétative du riz, le volume total d'écoulement pour le scénario d'analyse augmente d'environ 5 % par rapport au scénario de référence. Dans la phase de reproduction, du 27/3 au 15/5, le volume total d'écoulement dans le scénario d'analyse diminue de 2,6 % par rapport au scénario de référence. À la phase de maturation, il y a une certaine quantité de précipitations, et le volume total d'écoulement du scénario d'analyse diminue de 13 % par rapport au scénario de référence. Pendant les deux dernières phases de la rotation, les rizières stockent une quantité de précipitations pour diminuer le flux sur le réseau hydrographique. Pendant l'année de pluviométrie moyenne (2002), la tendance en matière d'impact reste similaire, mais elle est légèrement plus élevée qu'en année sèche.

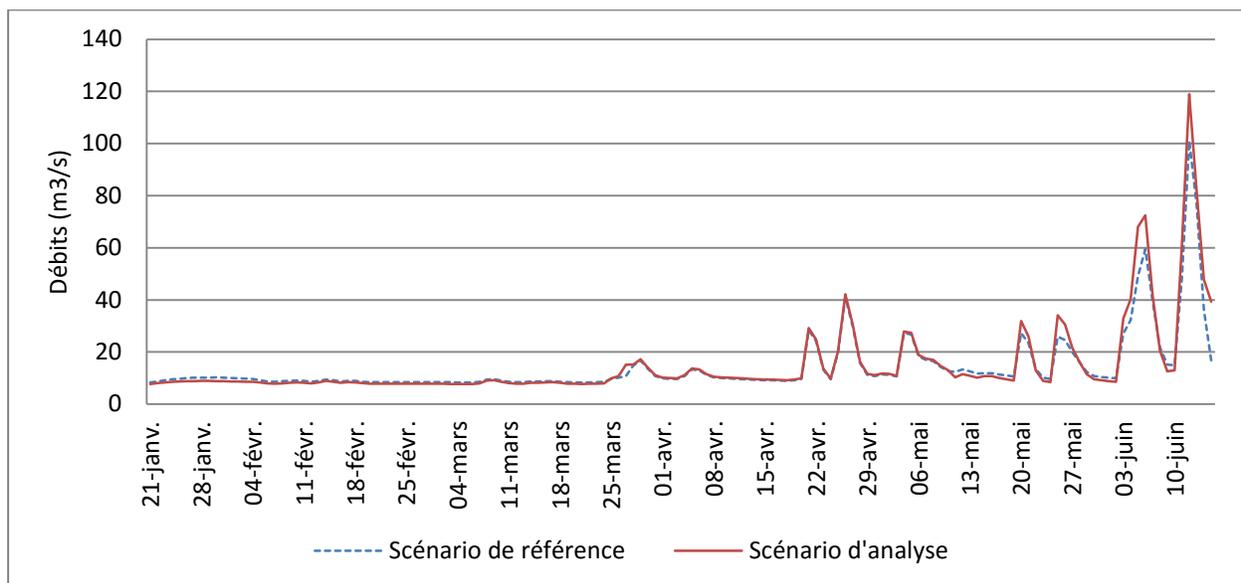


Figure 7.17 : Hydrogramme à l'exutoire du bassin versant en saison sèche pour l'année sèche 1995 (scénario 3)

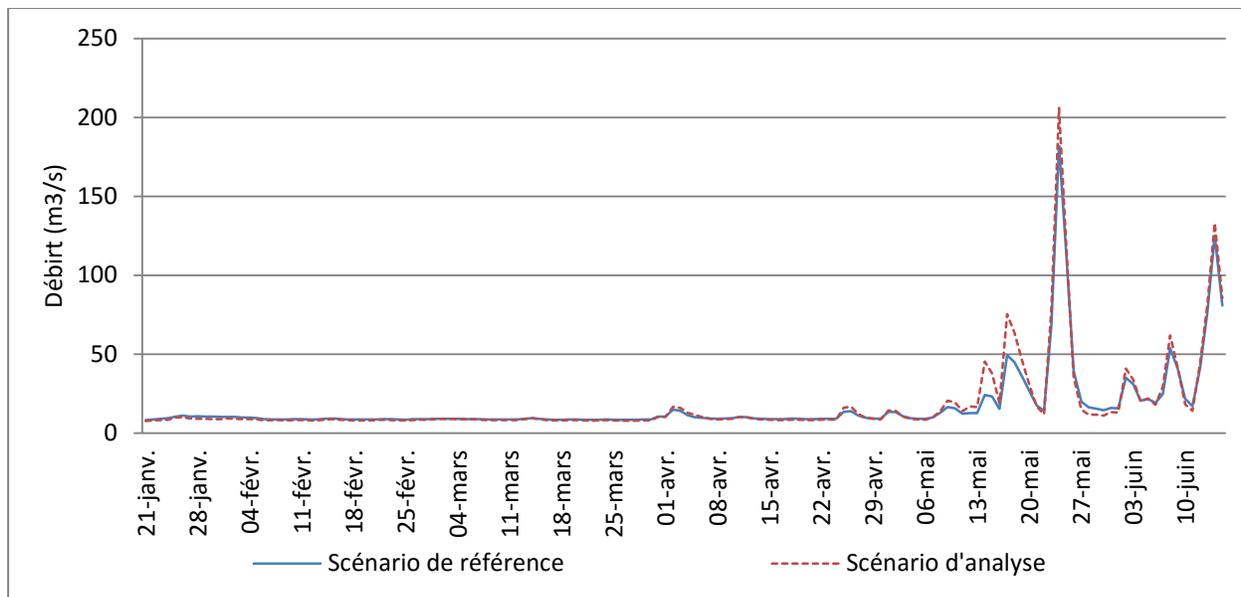


Figure 7.18 : Hydrogramme à l'exutoire du bassin versant en saison sèche pour l'année moyenne 2002 (scénario 3)

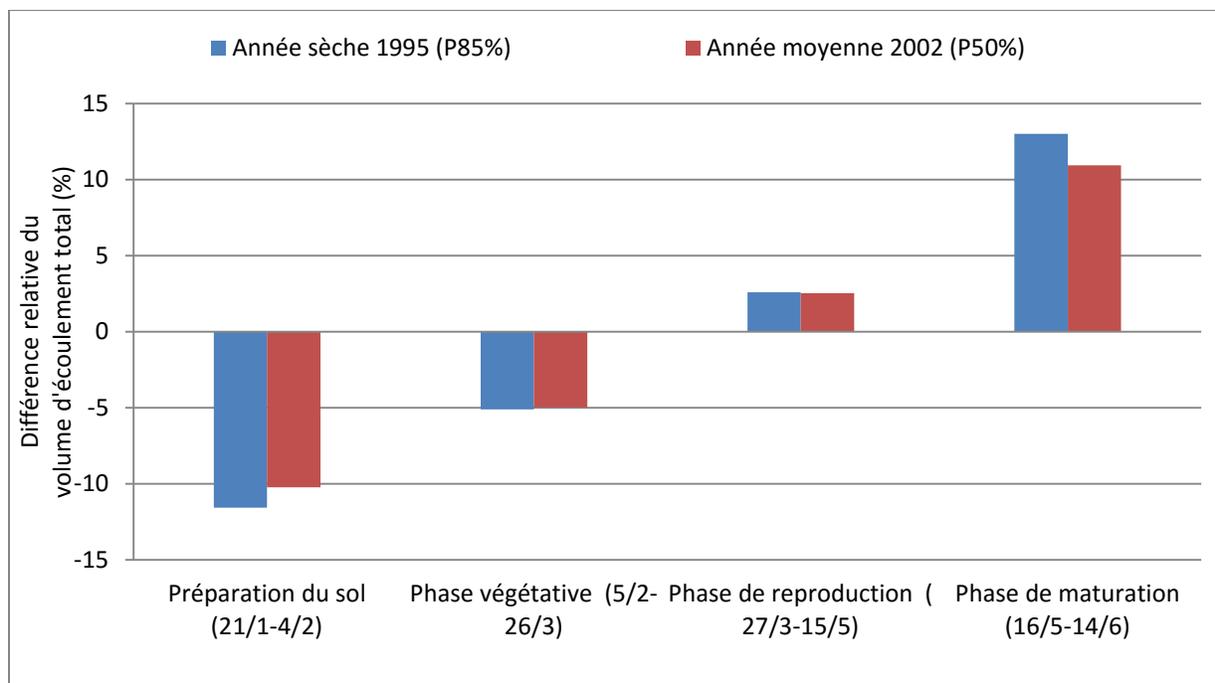


Figure 7.19 : Différence relative des volumes d'écoulement en fonction des croissances du riz en saison sèche pour l'année sèche et pour l'année moyenne (scénario 3)

(ii)- Impacts de la réaffectation temporaire des rizières sur l'écoulement en rivière pendant la saison des pluies

En saison des pluies, les deux scénarios de simulation comparés sont : (i) un scénario de référence, avec une surface de rizières de 11 463 ha, soit 12,7 % de la surface totale du bassin versant; et (ii) le scénario d'analyse, qui considère que 30 % des rizières sont converties en terres agricoles non inondées; dans ce scénario, les rizières couvrent un total de 7 911 ha, soit 8,7 % de la surface du bassin versant. La période de simulation est la saison des pluies de l'année 2008 pour l'année de pluviométrie forte et la saison des pluies de l'année 1981 pour l'année de pluviométrie moyenne.

Les hydrogrammes obtenus à l'exutoire du bassin versant pour les deux scénarios sont présentés à la figure 7.20 pour l'année humide et à la figure 7.21 pour l'année de pluviométrie moyenne. Dans les deux figures, et cela de manière générale, une bonne superposition des deux hydrogrammes est remarquée. La courbe du scénario d'analyse est au-dessous de celle du scénario de référence au début et à la fin de la rotation. Au centre de la rotation, la courbe du scénario d'analyse est au-dessus de celle du scénario de référence; il faut noter que durant cette période, les précipitations sont fortes.

Durant l'année humide, 2008, l'évaluation quantitative montre que le volume total d'écoulement pour le scénario d'analyse augmente de 2,3 % par rapport au scénario de référence. En ce qui concerne les étapes de croissance du riz, les écarts relatifs obtenus entre les deux scénarios, et cela pour les quatre périodes de croissance du riz, sont présentés à la figure 7.22. On remarque que, dans la phase de préparation du sol (21/6-30/6), le volume total d'écoulement pour le scénario d'analyse diminue d'environ 3 % par rapport au scénario de référence. Dans la phase végétative du riz, du 1/7 au 14/8, le volume total d'écoulement pour le scénario d'analyse augmente d'environ 6 % par rapport au scénario de référence. Dans la phase de reproduction, du 15/8 au 28/9, le volume total d'écoulement dans le scénario d'analyse augmente de 3,6 % par rapport au scénario de référence. À la phase de maturation, du 29/9 au 28/10, les précipitations sont faibles, et le volume total d'écoulement du scénario d'analyse diminue de 18,5 % par rapport au scénario de référence.

Dans l'année de pluviométrie moyenne (1981), l'impact est similaire à celui obtenu durant l'année humide, mais légèrement plus élevé. Cela veut dire que, pour l'année de pluviométrie

moyenne, l'impact de la réaffectation temporaire des rizières est plus élevé que pour l'année humide. Pour la rotation entière, le volume total d'écoulement pour le scénario d'analyse augmente de 3,8 % par rapport au scénario de référence. Pour les étapes de croissance du riz, les écarts relatifs montrent que, durant la phase de préparation du sol (21/6-30/6), le volume d'écoulement pour le scénario d'analyse diminue de 6,8 % par rapport au scénario de référence. Dans la phase végétative, le volume d'écoulement pour le scénario d'analyse augmente de 8 % par rapport au scénario de référence. Dans la phase de reproduction, le volume total d'écoulement augmente de 6,2 % par rapport au scénario de référence. À la phase de maturation, le volume total d'écoulement diminue de 1,2 %.

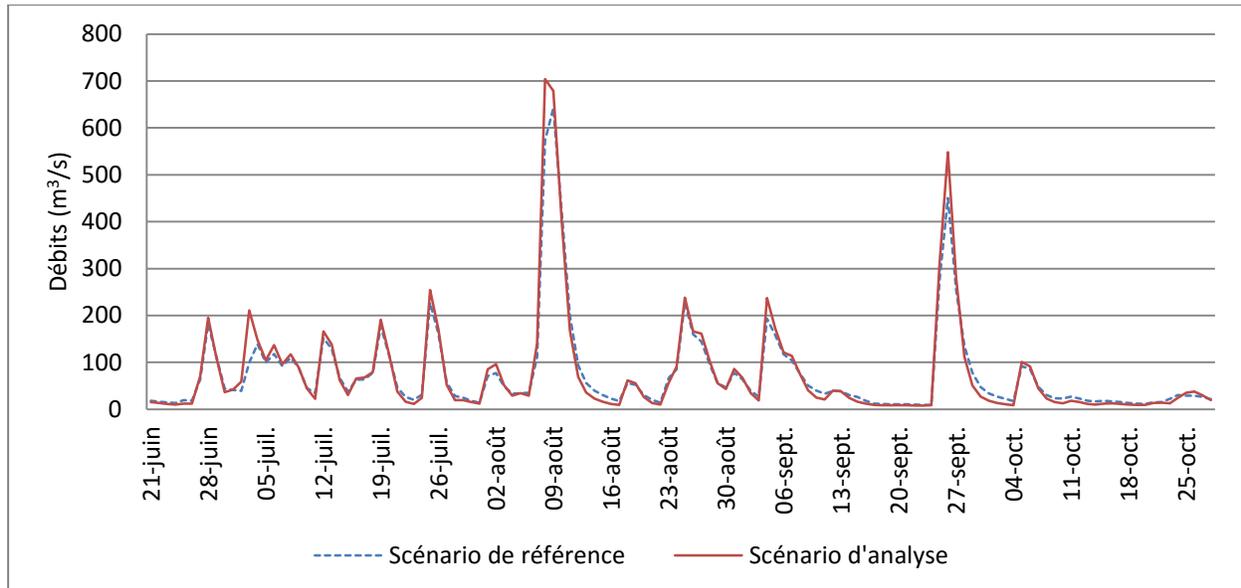


Figure 7.20 : Hydrogramme à l'exutoire du bassin versant en saison des pluies pour l'année humide 2008 (scénario 3)

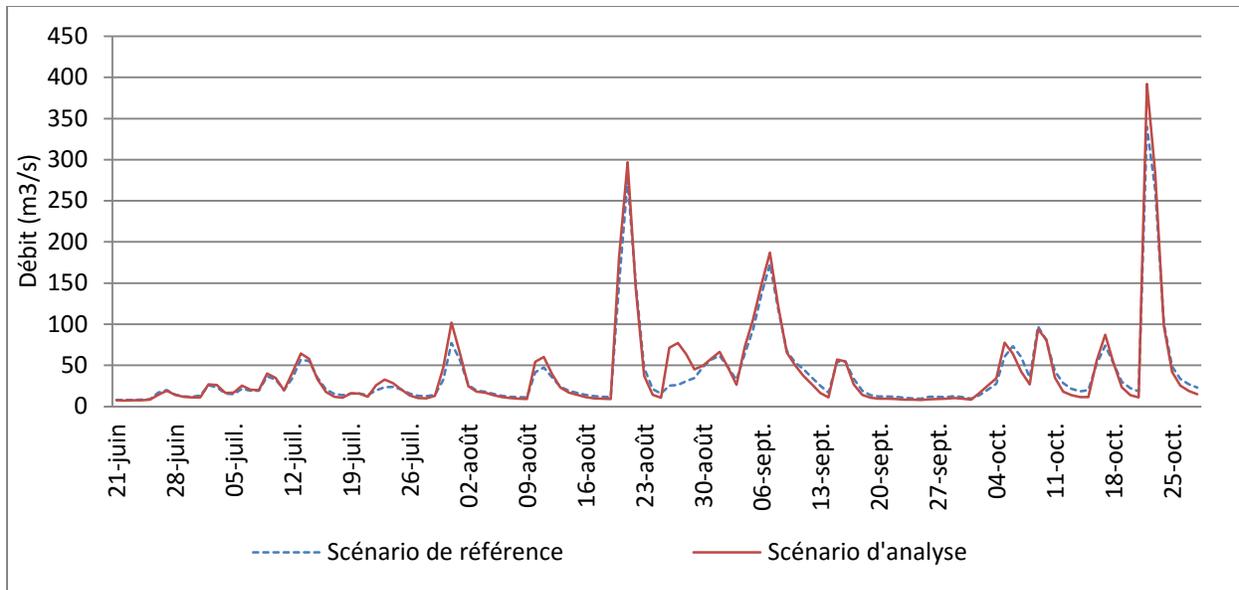


Figure 7.21 : Hydrogramme à l'exutoire du bassin versant en saison des pluies pour l'année de pluviométrie moyenne 1981 (scénario 3)

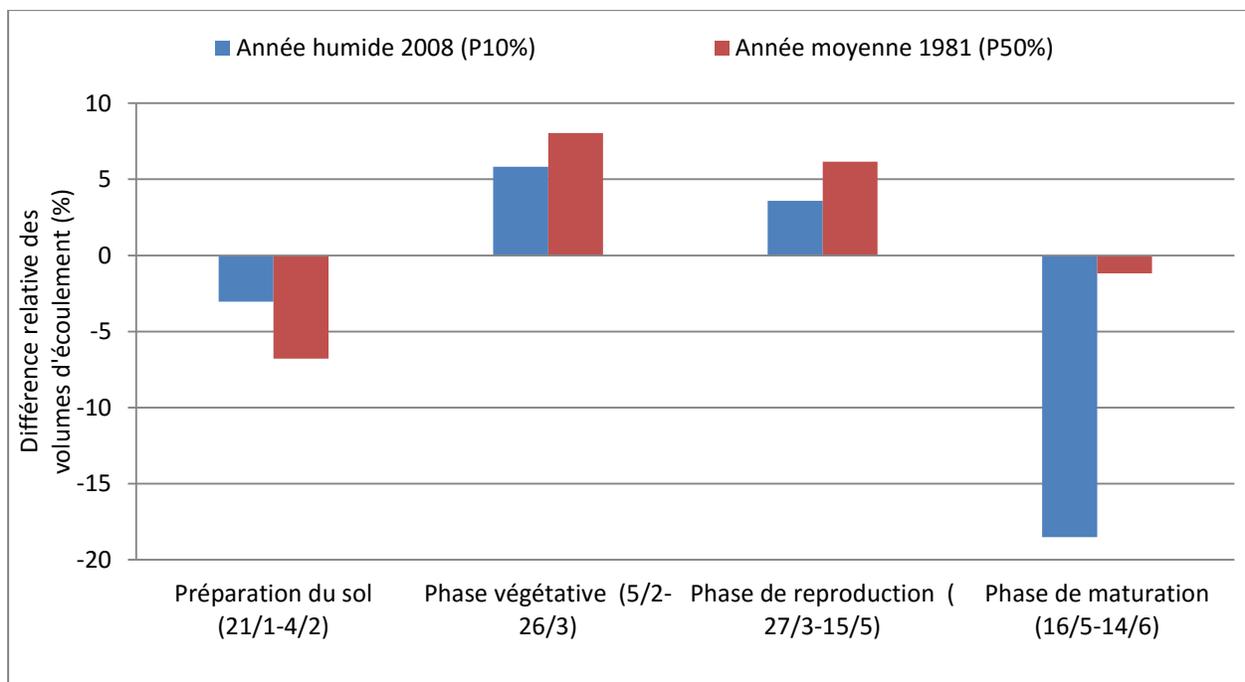


Figure 7.22 : Différence relative du volume d'écoulement en fonction des étapes de croissances du riz en saison des pluies pour l'année humide et pour l'année de pluviométrie moyenne (scénario 3)

7.4 Synthèse

En raison du manque de données dans le bassin versant de la rivière Cong, les données disponibles à la station de Giabay, dans le bassin versant de la rivière Cau, ont été utilisées pour le calage et la validation du modèle HYDROTEL en saison des pluies. Le bassin versant de la rivière Cong et celui de la rivière Cau ont des ressemblances en matière de climat, de type de sol, etc. Il est alors possible d'ajuster les paramètres de calage, à savoir le coefficient cultural de riz K_c et le paramètre d'infiltration K_{inf} , dans le sous-modèle des rizières, dans un bassin pour une application dans l'autre. Pour caler le modèle, la période choisie est celle de 2006-2007, pour laquelle des valeurs jugées acceptables pour les trois indicateurs ont été obtenues (un NASH de 0,72; une RCEQM de 1,08 m³/s et une ERVET de 6 %). En période de validation, 2008-2009, les valeurs suivantes ont été obtenues : un NASH de 0,72; une RCEQM de 2,17 m³/s et une ERVET de 11 %. Ces résultats sont suffisants pour considérer les valeurs des paramètres du sous-modèle, K_c et K_{inf} en saison des pluies, comme acceptables pour les simulations. En saison sèche, K_c et K_{inf} sont ajustés en tenant compte du caractère plus sec de la saison.

Pour analyser l'impact des rizières sur le régime d'écoulement, ce chapitre a présenté trois scénarios de changement de la surface des rizières. Ces trois scénarios sont comparés par rapport au scénario de référence, soit l'état du bassin versant actuel.

Le premier scénario considère une conversion de toute la surface des rizières en terres agricoles nons inondables. Les résultats montrent que : (i) en saison sèche, le volume d'écoulement total du bassin versant diminue de 3,2 % pour l'année sèche et de 3,8 % pour l'année moyenne; et (ii) en saison des pluies, le volume d'écoulement total du bassin versant augmente de 12 % pour l'année humide et de 16,1 % pour l'année de pluviométrie moyenne.

Dans le deuxième scénario, la superficie des rizières est augmentée de 30 % par une conversion de terres agricoles en rizières. Les résultats pour ce scénario montrent que : (i) en saison sèche, le volume d'écoulement total du bassin versant augmente de 1,8 % pour l'année sèche et de 4,4 % pour l'année de pluviométrie moyenne ; et (ii) en saison des pluies, le volume d'écoulement total augmente de 2,4 % pour l'année humide et de 3,2 % pour l'année de pluviométrie moyenne.

Dans le troisième scénario, 30 % de la superficie des rizières est réaffectée temporairement en cultures non inondables. Les résultats de ce scénario montrent que : (i) en saison sèche, le volume d'écoulement total diminue de 1,9 % pour l'année sèche et de 2,5 % pour l'année de pluviométrie moyenne ; et (ii) en saison des pluies, le volume d'écoulement total augmente de 2,3 % pour l'année humide et de 3,8 % pour l'année de pluviométrie moyenne.

8. Études d'impacts de l'irrigation des rizières sur l'utilisation du volume utile du lac

8.1 Introduction

Dans le bassin versant Cong, la culture la plus importante est celle du riz. Cette culture demande d'abondantes quantités d'eau. Pour satisfaire ces besoins en eau, un réservoir artificiel et un système de canaux d'irrigation ont été construits entre 1973 et 1976. La mise en service de ce réservoir (lac Nuicoc) s'est effectuée en 1977. Actuellement, le lac est utilisé à différentes fins. Il sert à l'alimentation industrielle et domestique pendant toute l'année. En saison des crues, il est utilisé pour la régulation des débits. En saison sèche, il sert à l'irrigation des rizières tant à l'extérieur qu'à l'intérieur du bassin et fournit un débit de service au barrage Thachuong. La réalisation de cet ouvrage-réservoir a grandement modifié l'écoulement de la rivière par rapport à l'écoulement naturel. Actuellement, les ressources en eau dans ce bassin versant sont peut-être exploitées au maximum. La répartition de la ressource entre les différents consommateurs a créé des conflits. En raison des différentes demandes, la demande en eau pour les rizières n'est pas garantie, ce qui a pour effet de réduire le rendement de la production en riz. Il nous apparaît donc comme nécessaire d'évaluer l'impact de l'irrigation sur le développement rizicole, les autres demandes en eau et la capacité du lac pour les satisfaire.

L'objectif de ce chapitre consiste à effectuer l'analyse de la capacité du lac à permettre l'aménagement de futures rizières.

8.2 Impact de l'irrigation des rizières sur le volume utile du lac

8.2.1 Simulation des besoins en eau d'irrigation

Le sous-modèle de rizières qui a été implémenté dans Hydrotel permet de simuler les processus d'irrigation et de drainage des rizières. Ce sous-modèle permet de déterminer les besoins en eau d'irrigation des rizières pour optimiser le processus de production de riz.

Dans l'état actuel du bassin versant, les besoins en irrigation dépendent des précipitations, de la géomorphologie et du type de sol. À l'année sèche, soit 1988 la pluviométrie est de 1534 mm (figure 8.1), et le résultat simulé obtenu par le sous-modèle des rizières montre que :

Lorsque le sol est sec (saison sèche), on a besoin d'une plus grande quantité d'eau pour saturer le sol en eau. Ce qui fait que l'infiltration sur la rizière sera plus importante pendant cette période de saturation (8 mm par jour). Lorsque le sol est saturé (saison des pluies), l'infiltration est moins importante et varie de 3 à 4 mm par jour (figure 8.2). Évidemment, pendant les périodes de jachère (sol au repos) (du 15 juin au 20 juin et du 29 octobre au 20 janvier), il n'y a pas d'infiltration.

Aussi, la figure 8.2 montre que l'évapotranspiration varie globalement entre 1mm/jour et 7mm/jour et qu'elle dépend des périodes de croissance du riz. On constate aussi que pendant les périodes de jachère, l'évaporation varie entre 1 et 2 mm/jour.

À partir des résultats de simulation, on évalue le besoin d'irrigation total pour l'année 1988 à 548 mm. En effet, les besoins en eau d'irrigation (figure 8.3) varient en fonction des rotations. Dans la première rotation rizicole (du 21 janvier au 14 juin), les besoins en eau d'irrigation cumulés sont de 428 mm. Dans la seconde rotation rizicole (du 21 juin au 28 octobre), les besoins en eau d'irrigation cumulés sont de 120 mm.

Pour assurer une bonne croissance du riz et un bon rendement, la hauteur d'eau sur la rizière doit se situer entre la hauteur critique et la hauteur optimale. La figure 8.4 montre bien que la hauteur d'eau d'irrigation de la rizière demeure entre la hauteur critique et la hauteur optimale pendant toute l'année. L'irrigation se fait en moyenne tous les 15 jours. En effet, il faut attendre que la hauteur d'eau de la rizière soit légèrement inférieure à la hauteur d'eau critique (7 cm) pour procéder à une nouvelle irrigation de la rizière.

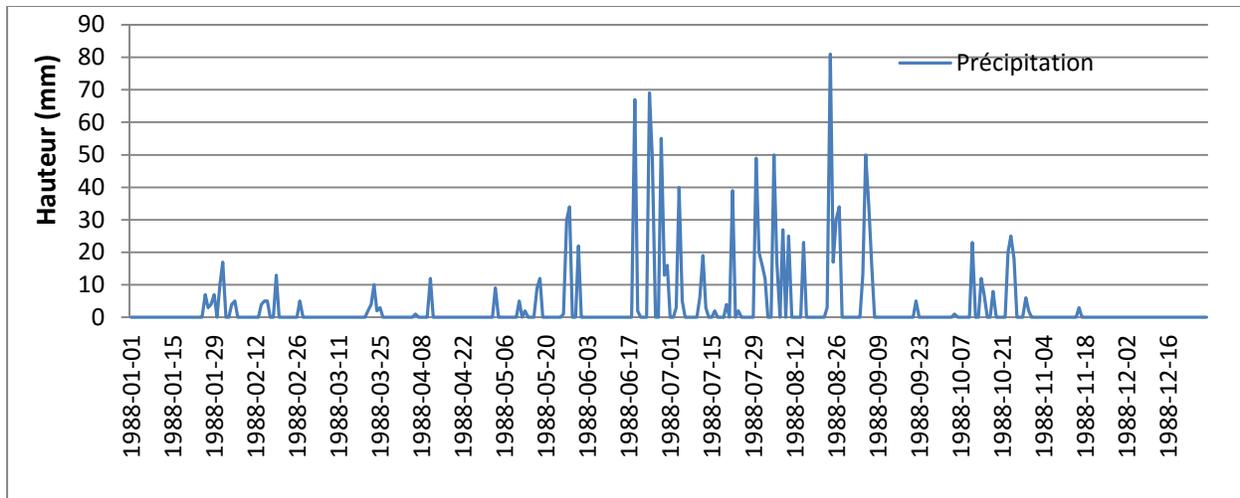


Figure 8.1 : Précipitation moyenne journalière sur le bassin versant en 1988 (probabilité au dépassement P85%)

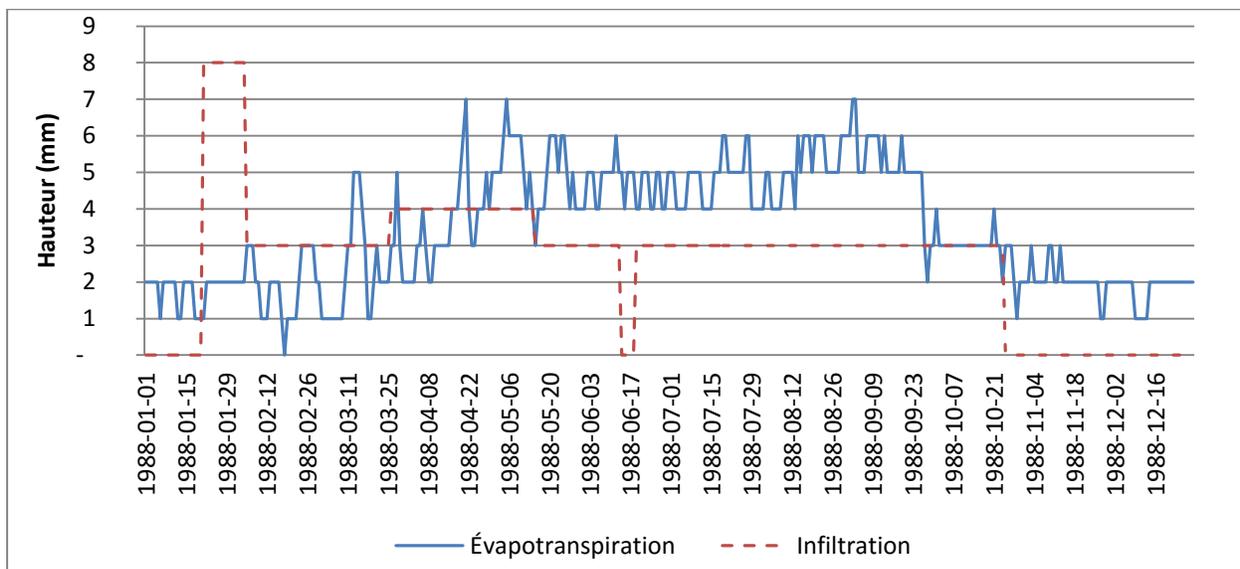


Figure 8.2 : Hauteur des pertes journalières par évapotranspiration réelle et infiltration journalière sur les rizières en 1988

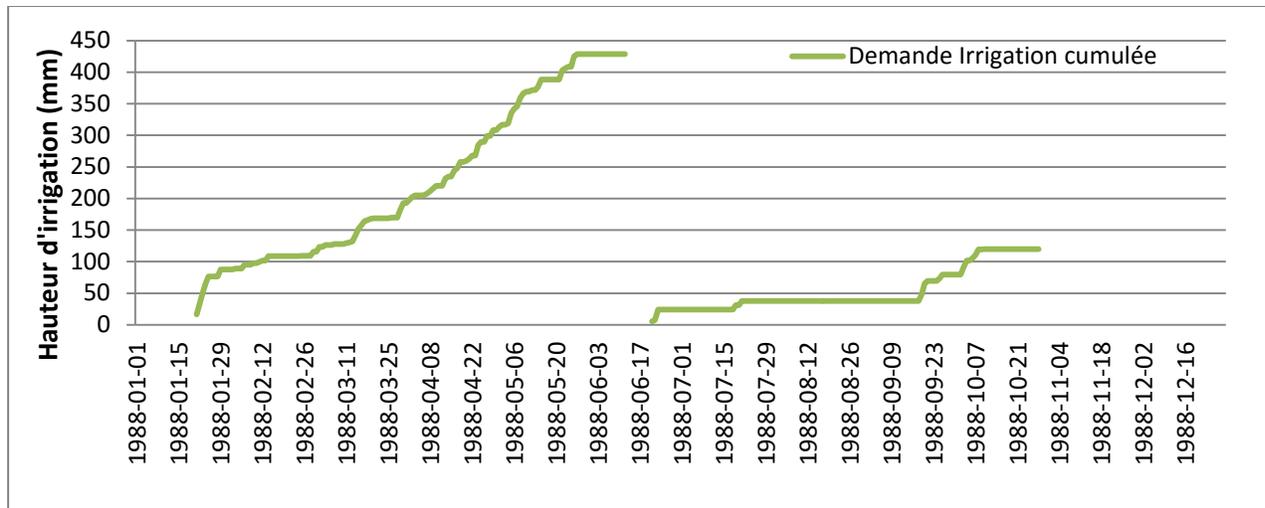


Figure 8.3 : Hauteur d'irrigation cumulée à la surface sur les rizières en 1988 en saison sèche et en saison des pluies

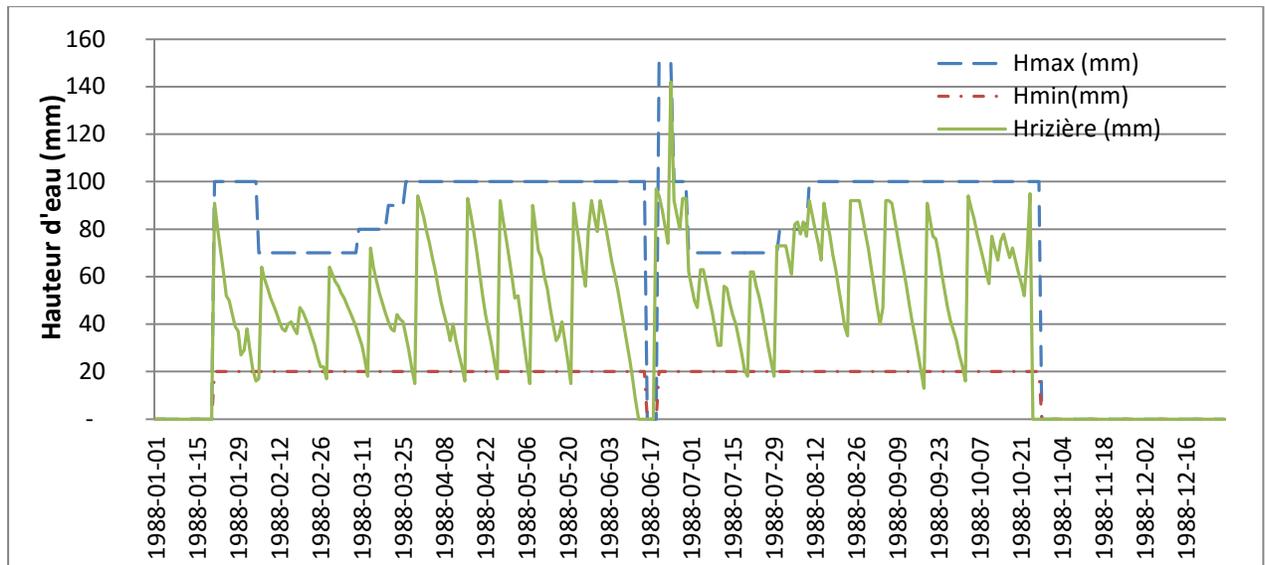


Figure 8.4 : Hauteur d'eau sur la rizière en 1988

8.2.2 Analyse d'impact de l'irrigation des rizières sur le volume utile du lac

Pour analyser l'impact de l'irrigation des rizières sur le volume utile du lac, l'évolution du volume d'eau du lac a été simulée sur une période de 33 ans (du 1/1/1977 au 31/12/2009). Cette simulation constitue le scénario de référence. La courbe de la figure 8.5 présente l'évolution du volume du lac pendant cette période. Pendant 30 ans sur 33, le volume minimal du lac reste plus élevé que le volume mort. Ce qui signifie que 91% du temps, il était possible d'assurer

complètement la demande en eau pour l'irrigation. En examinant la courbe de l'évolution du volume de la figure 8.5, pour les années 1977, 1978 et 1980, on constate qu'il aurait été impossible de satisfaire complètement la demande en eau pour l'irrigation. Ce résultat montre aussi que le volume maximal du lac ($175 \times 10^6 \text{ m}^3$) n'a pas été atteint pour les deux années 1978 et 1989. Selon les données pluviométriques, ce sont deux années sèches. En effet, en 1977, la pluviométrie a été de 1 359 mm/an (probabilité au dépassement 96%) et en 1988, la pluviométrie a été de 1 533 mm/an (probabilité au dépassement 86%).

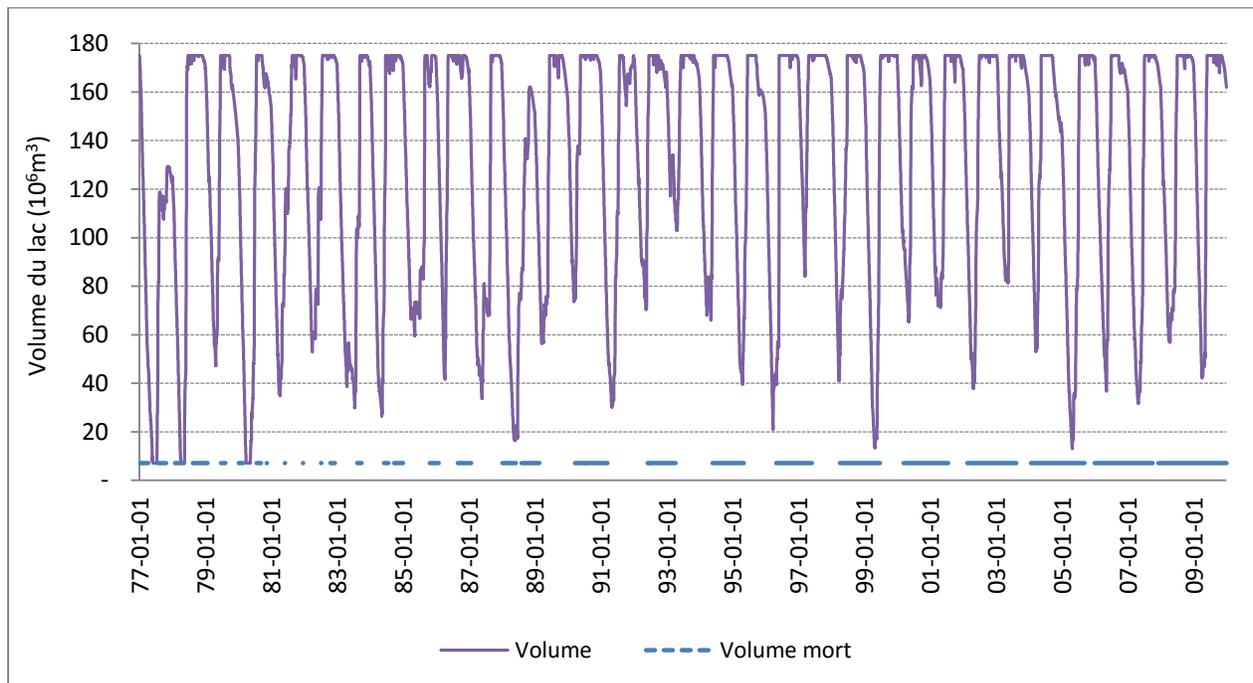


Figure 8.5 : Courbe de volume du lac (1977-2009)

8.3 Synthèse

L'analyse de la capacité du lac à répondre aux besoins en irrigation des rizières montre que sur la période de simulation de 33 ans (1977-2009), il y a 3 années (1977, 1978 et 1980) où les réserves en eau du lac n'ont pas pu assurer toute la demande en irrigation. On a constaté aussi que la pluviométrie influence la capacité du lac à satisfaire les besoins en eau d'irrigation.

En conclusion, dans les conditions actuelles de gestion du lac Nuicoc, on se doit de constater que la capacité du réservoir à satisfaire les besoins en irrigation a été atteinte. Par contre, il

apparaît impossible d'augmenter le nombre de parcelles de rizière sans modifier les autres besoins en alimentation.

9. Conclusion générale et perspective

Au cours des dernières décennies, le Vietnam a mis en œuvre une ambitieuse politique de développement économique, avec l'agriculture comme l'un des piliers de ce développement et, par conséquent, un secteur stratégique pour ce pays. Dans ce secteur, la riziculture, qui se pratique dans la plupart des bassins versants, représente une des cultures les plus importantes. Les quantités de riz produites et exportées sont en constante augmentation (1995 : 1,9 million tonne; 2000 : 3,4 millions de tonnes; 2005 : 4,7 millions de tonnes; 2010 : 7,0 millions de tonnes et 2012 : 7,7 millions de tonnes (ONV, 2015)) et cela permet au Vietnam de faire partie des plus grands exportateurs de riz au monde depuis 2009. Les surfaces des rizières augmentent continuellement en réponse aux politiques de développement dans le secteur de la riziculture. Des aménagements ont été effectués dans plusieurs grands bassins versants pour répondre aux besoins en eau des rizières tout au long de l'année, et surtout en saison sèche. En effet, la culture du riz nécessite d'abondantes quantités d'eau pour compenser les pertes par infiltration et par évapotranspiration. La nécessité de répondre en tout temps à l'ensemble des besoins en eau (agriculture, industries, populations, etc.) dans le bassin versant sans compromettre la pérennité des ressources hydriques amène à la mise en œuvre de la gestion intégrée de l'eau par bassin versant (GIEBV) (GWP, 2000). C'est dans ce contexte que le projet de GIRE du bassin versant de la rivière Cau au Vietnam, programme de formation et de recherche entre le Canada et le Vietnam, a été mis en œuvre.

Le présent projet de thèse s'inscrit dans le cadre du projet de la GIRE du bassin versant de la rivière Cau, dont l'un des sous-bassins versants est celui de la rivière Cong. Il vient s'ajouter aux études déjà effectuées (Nguyen, 2012; Audet, 2013; Pham, 2013; Pham, 2013; Hoang, 2014 et Nguyen, 2015) dans l'objectif de mettre en œuvre la GIRE dans le bassin versant de la rivière Cau. L'adaptation et le calage d'HYDROTEL comme modèle de simulation des processus hydrologiques en appui à la GIEBV sont l'un des objectifs du projet du bassin versant de la rivière Cau (Nguyen, 2012). Ce modèle permet de simuler les processus hydrologiques en jeu dans un bassin versant, de la pluie jusqu'à l'écoulement en rivière, en considérant de manière identique toutes les surfaces agricoles, du point de vue du fonctionnement hydrologique. Cependant, l'un des sous-bassins versants de la rivière Cau, celui de la rivière Cong, comporte des grandes surfaces de rizières qui peuvent être considérées comme de petits réservoirs tout au long de la période de croissance du riz. Dans sa version initiale, HYDROTEL comporte plusieurs sous-modèles, mais aucun ne permet de modéliser les rizières ni de simuler les

processus hydrologiques en jeu dans ces « petits réservoirs ». Par ailleurs, le sous-bassin versant de la rivière Cong dispose d'un grand réservoir artificiel. Le développement de sous-modèles permettant d'intégrer le comportement hydrologique des rizières et de simuler la variation des niveaux/volumes d'eau dans le réservoir constitue l'un des objectifs de cette thèse. La mise en œuvre de ces modèles permet non seulement de contribuer à la mise en œuvre de la GIRE, mais aussi d'analyser l'impact de différents scénarios d'aménagements agricoles (extension des rizières, réaffectation des terres agricoles, etc.) sur l'hydrologie du bassin versant. Ces scénarios permettent d'appuyer les processus d'aide à la décision en matière de gestion du bassin versant.

Dans le cadre de cette thèse, deux modèles sont développés et implémentés dans HYDROTEL : un modèle de rizières et un modèle de gestion d'un réservoir qui permet de répondre aux besoins en eau dans le bassin versant en période de déficit pluviométrique. Ces modèles permettent de gérer comment le réservoir artificiel, le lac Nuicoc, répond aux besoins en eau dans le bassin versant et de simuler les processus hydrologiques en jeu dans une rizière, incluant le drainage et l'irrigation des surfaces rizicoles. Le modèle de rizières considère une rizière comme un « petit réservoir » et effectue un bilan d'eau en appliquant le principe de la conservation de masse à chaque pas de temps, à partir des entrées et des pertes en eau. L'implémentation du modèle de rizières s'effectue à l'échelle de l'unité spatiale de simulation ou UHRH. Sur chaque UHRH, le fonctionnement réel de ces rizières est basé sur le principe de superposition des « couches », comme dans le cas des systèmes d'information géographique, qui interagissent avec les processus hydrologiques (pluies, infiltration, ruissellement de surface, etc.) ayant lieu sur l'UHRH. L'analyse de l'occupation du territoire permet d'identifier les rizières en présence sur chaque unité spatiale de calcul et de les assimiler à un seul « réservoir » dont la surface équivaut à la somme des surfaces de toutes les rizières sur l'UHRH. Les équations du bilan de masse sont résolues au pas de temps journalier pour déterminer la hauteur d'eau dans la rizière. Pour ce faire, plusieurs données spécifiques à la rizière sont nécessaires : le stade de croissance de la plante, les paramètres de calage (K_{inf} et K_c) et les données d'entrées (IF , PR , hauteurs d'eau maximale et minimale en fonction des étapes des croissances du riz, etc.). L'interaction entre la couche des rizières et le sol permet non seulement de déterminer la hauteur d'eau dans une rizière à chaque pas de temps, mais aussi d'agir sur l'écoulement vertical dans les couches du sol et, par conséquent, sur l'écoulement en rivière.

Dans le bassin versant d'étude, le lac Nuicoc joue plusieurs rôles. Il permet de réguler les débits dans la partie aval de la rivière en période de crue et de répondre à d'autres besoins comme l'irrigation des rizières, la fourniture d'eau aux industries et aux villes, etc., en période de déficit pluviométrique. Le modèle de gestion du réservoir Nuicoc permet ainsi, en cas de nécessité, d'opérer le transfert d'eau du réservoir vers les rizières. Une fois les besoins en eau des rizières évalués, ce modèle prélève la quantité d'eau nécessaire et met à jour les hauteurs d'eau dans les rizières sur la base du bilan d'eau. La mise à jour du niveau d'eau dans le réservoir s'effectue à partir d'une relation entre la hauteur d'eau et le volume d'eau dans le lac. Compte tenu du caractère non négligeable des pertes d'eau via les canaux d'irrigation, un coefficient de pertes par canaux est pris en compte dans le bilan de masse. Comme les autres processus dans le bassin versant, les équations à la base de la gestion du réservoir sont résolues au pas de temps journalier.

Dans le bassin étudié, les travaux de construction du réservoir Nuicoc ont débuté en 1973. Ainsi, à partir des données disponibles, une reconstitution du régime d'écoulement naturel de la rivière Cong, au cours de la période allant de 1961 à 1970, est présentée dans la thèse. L'objectif est de déterminer l'écoulement naturel du bassin versant et d'ajuster certains paramètres de base du modèle HYDROTEL. Durant cette période, la culture du riz s'effectue une seule fois dans l'année (saison des pluies) et la surface des rizières est convertie en milieu agricole non inondé en saison sèche. Pour déterminer l'occupation du territoire durant la période 1961-1970, des approximations ont été effectuées à partir du peu de données disponibles. La comparaison entre les débits simulés et les débits observés à la station Tancuong, située en aval du lac, permet de montrer qu'il existe une bonne superposition entre les hydrogrammes simulé et observé. En ce qui concerne les indicateurs de performance du modèle, pour la période de calage (1961-1965), le coefficient de Nash est de 0,72, la RCEQM est de 0,32 et l'ERSVET est de 37,8 %. Durant la période de validation, ces valeurs sont de 0,78 pour le Nash, 0,38 pour la RCEQM et 37,7 % pour l'ERSVET. Compte tenu des hypothèses retenues pour reconstituer l'utilisation du territoire préalablement aux simulations, ces valeurs peuvent être considérées comme acceptables. Le fonctionnement hydrologique des rizières en saison des pluies n'a pas été pris en compte au cours des simulations. Les résultats obtenus en fonction des saisons de l'année ont montré que les trois indicateurs de performance d'HYDROTEL en saison des pluies sont moins bons que ceux obtenus en saison sèche. Parmi ces indicateurs, les valeurs moyennes d'ERSVET en saison des pluies sont de l'ordre de 34 %, ce qui est très élevé par rapport aux valeurs de 5,4 % obtenues en saison sèche.

Dans l'objectif d'utiliser les modèles de rizières pour appuyer la mise en œuvre de la gestion intégrée par bassin et analyser l'impact d'aménagements agricoles (p. ex. extension de rizières) sur l'hydrologie du bassin versant, le calage des modèles doit être effectué en tenant compte des rizières. À cause du manque de données de débits observés dans le bassin versant après la mise en service du lac (1977), des approches d'estimation ont dû être utilisées. Il s'agit de considérer que le bassin versant de la rivière Cau et celui de la rivière Cong possèdent des caractéristiques (p.ex. types de sols) similaires et que la culture du riz en saison des pluies s'y pratique selon les mêmes règles. Les données de débits observés disponibles à l'exutoire du bassin versant de la rivière Cau permettent d'ajuster le coefficient cultural (K_c) et le paramètre d'infiltration (K_{inf}) du sous-modèle des rizières pour une application au sous-bassin versant de la rivière Cong. Les résultats montrent que les valeurs de calage du sous-modèle de rizières sont satisfaisantes. À partir des valeurs de K_c et de K_{inf} qui ont été déterminées en saison des pluies, des valeurs de K_c et de K_{inf} pour la saison sèche sur le bassin versant de la rivière Cong ont été adaptées. Finalement, le coefficient K_c varie de 0,9 à 1,2 en saison sèche et de 1,0 à 1,3 en saison des pluies; le paramètre K_{inf} varie de 0,6 à 0,9 en saison sèche et de 0,5 à 0,8 en saison des pluies. Ces valeurs permettent d'analyser l'impact des rizières du bassin versant de la rivière Cong.

En ce qui concerne l'analyse de l'impact d'aménagements agricoles sur l'hydrologie du bassin versant, trois scénarios ont été analysés : (i) scénario de conversion de l'ensemble des rizières en terres agricoles non inondées; (ii) scénario d'augmentation de 30 % de la surface totale des rizières dans le bassin versant; et (iii) scénario de réaffectation temporaire de 30 % des rizières en terres agricoles non inondables.

Pour le scénario de conversion des toutes les rizières en terres agricoles non inondables, le volume d'écoulement total diminue de 12 % pour une année de pluviométrie élevée et de 16,1 % pour une année de pluviométrie moyenne. En saison sèche, le volume d'écoulement total augmente de 3,2 % pour une année considérée comme sèche et augmente de 3,8 % pour une année de pluviométrie moyenne.

Pour le scénario d'augmentation de 30 % de la surface totale des rizières dans le bassin versant, en saison des pluies, on note une diminution de 2,4 % du volume de l'écoulement total pour l'année humide et une diminution de 3,2 % pour l'année de pluviométrie moyenne. Cette

diminution est expliquée par le fait que l'implantation des rizières fait augmenter le stockage d'eau dans les rizières et donc réduit l'écoulement de surface dans le bassin versant. En saison sèche, un accroissement de 30 % de la surface des rizières irriguées entraîne une augmentation du volume d'écoulement total de 1,8 % pour l'année sèche et de 4,4 % pour l'année de pluviométrie moyenne.

Pour le scénario de réaffectation temporaire de 30 % des rizières en terres agricoles non inondables, en saison des pluies, le volume d'écoulement augmente de 2,3 % pour l'année de forte pluviométrie et de 3,8 % pour l'année de pluviométrie moyenne. En saison sèche, le volume d'écoulement total diminue de 1,9 % pour l'année sèche et de 2,5 % pour l'année de pluviométrie moyenne.

Cette thèse a apporté des éléments nouveaux en matière de compréhension des processus hydrologiques ayant lieu dans un bassin versant avec des rizières. Elle a permis de comprendre la nécessité de tenir compte du fonctionnement hydrologique de cultures nécessitant de grandes quantités d'eau (p. ex. rizières) dans l'hydrologie d'un bassin versant. Tout comme certaines zones humides (Clerc *et coll.*, 2008; Rousseau et Jutras, 2009), les rizières ont une influence sur l'écoulement de surface en contribuant au stockage de l'eau dans le bassin versant. Ce travail a également permis d'améliorer le modèle HYDROTEL afin de l'utiliser dans la mise en place de la GIRE dans le bassin versant de la rivière Cong et dans des bassins versants similaires au Vietnam. Pour les gestionnaires, il est important de disposer d'un tel outil en amont aux prises de décisions. Cela permet d'anticiper les conséquences éventuelles et d'évaluer les solutions d'atténuation afin de garantir la pérennité des ressources hydriques pour l'ensemble des usagers. Dans le cas d'une année sèche précédant la culture du riz de la saison sèche, l'un des avantages que procure un tel outil/modèle de gestion du réservoir est de permettre aux gestionnaires d'anticiper sur la superficie totale de rizières qui peut être irriguée compte tenu des quantités d'eau disponibles.

Les simulations réalisées ont également montré que la capacité du lac à répondre aux besoins en irrigation a été suffisante pour 30 années sur 33 pendant la période 1977-2009. Pour trois années pendant cette période (1977, 1978 et 1980), les réserves en eau du lac n'ont pas pu assurer toute la demande en irrigation. Par contre, dans la situation actuelle, il apparaît impossible d'augmenter le nombre de parcelles de rizière sans modifier les autres besoins en alimentation.

Bien que ce travail permette de disposer d'un modèle de simulation des impacts des rizières et d'un réservoir sur l'hydrologie du bassin versant de la rivière Cong, des améliorations peuvent être apportées dans le cadre d'études futures. Compte tenu du manque de données de débits observées à l'exutoire du bassin versant de la rivière Cong, l'ajustement des paramètres a nécessité le recours à des approches alternatives. La mise en place d'une station de jaugeage dans le bassin versant de la rivière Cong permettrait d'améliorer le calage des modèles.

Une autre problématique importante dans ce bassin versant est l'impact de la riziculture sur la qualité de l'eau. En effet, l'utilisation d'engrais (fumiers, lisiers) dans la culture du riz entraîne la pollution des cours d'eau suite au ruissellement de surface. L'intégration dans HYDROTEL des sous-modèles présentés dans cette thèse permettra d'améliorer les résultats de l'hydrologie du bassin versant et, donc, de comprendre l'impact de la riziculture sur la qualité de l'eau en rivière. Une telle étude pourrait s'appuyer sur le modèle GIBSI (Villeneuve *et coll.*, 1998 et 2003; Rousseau *et coll.*, 2000) qui intègre déjà des modèles de qualité de l'eau. Compte tenu du contexte général d'accroissement des surfaces des rizières en réponse aux politiques de développement agricole, il est important de disposer de données pour caler le modèle HYDROTEL sur d'autres bassins versants avec des rizières. Cela permettra d'aider les gestionnaires à faire des choix judicieux pour répondre aux besoins en eau des rizières et garantir la pérennité des ressources hydriques dans un contexte de GIRE.

10. Références bibliographiques

- Abbott M B, Bathurst J C, Cunge J A, O'Connell P E, Rasmussen J (1986a) An introduction to the European hydrological system – Système hydrologique Européen (SHE). Part 1: History and philosophy of a physically based distributed modelling system. *Journal of Hydrology*. 87: 45-59.
- Abbott M B, Bathurst J C, Cunge J A, O'Connell P E, Rasmussen J (1986 b) An introduction to the European hydrological system – Système hydrologique Européen (SHE). Part 2: Structure of a physically based distributed modelling system. *Journal of Hydrology*. 87: 61-77.
- ADF- Appui à la Formation au Développement (2011) *Les techniques d'exploitation-Structure de la rizière*. <http://www.afd.be/~plant-ch/riz/techniqu/struc-riz.htm>. (Visité en 2011).
- Aggarwal G C, Sidhu A S, Sekhon N K, Sandhu K S, Sur H S (1995) Puddling and N management effects on crop response in a rice–wheat cropping system. *Soil and Tillage Research* 36, 129–139.
- Allen R G, Pereira L S, Rares D, Smith M (1998) *Crop Evapotranspiration, Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. Irrigation and drainage, Paper 56. Food and Agriculture Organisation (FAO) of the United Nation, (Rome) <http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm>.
- Arnold J G, Williams J R, Srinivasan R, King K W (1995) *SWAT – Soil and Water Assessment Tool Users Manual*, Revised 03/29/95. Texas Agricultural Experiment Station, Blackland Research Center, Temple, TX.
- Asrar, G., M. Fuchs, E. T. Kanemasu, and J. H. Hatfield (1984), Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat, *Agron J.*, 76, 300 – 306.
- Azamathulla H, Wu F C, Ghani A A, Narulkar S M, Zakaria N A, Chang C K (2008) Comparison between genetic algorithm and linear programming approach for real time operation. *Journal of Hydro-Environment Research*. 2(3):172-181. 15706443 (ISSN).
- Audet L (2013) *Modélisation de la qualité de l'eau de la rivière Cau au Vietnam*. Mémoire de maîtrise. Québec, Canada, Université du Québec, INRS Eau Terre Environnement.
- Bautista E, Clemmens A J (2005) Volume compensation method for routing irrigation canal demand changes. *Journal of Irrigation Drainage*. ASCE 131(6): 494-503.

- Berge HFM, Jansen D M, Rappoltdt K, Stol W (1992) *The Soil Water Balance Model SAWAH: User's Guide and Outline*, CABO-TPE Simulation Reports Series, 22. CABO, Wageningen, Netherlands.
- Bergström S (1995) The HBV model. Singh VP (Ed.) *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO., pp. 443-476.
- Beven K J (1997) *Distributed Modelling in Hydrology : Application of the TOPMODEL concepts*. Wiley, Chichester, 360 p.
- Bréda N. (1999) L'indice foliaire des couverts forestiers : mesure, variabilité et rôle fonctionnel. *Revue Forestière Française*. LVI 2, pp 135-150.
- Brown L C, Barnwell T O Jr (1987) *The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS*. Documentation and User Manual. Athens, GA, U.S. Environmental Protection Agency.
- Brooks R H, Corey A T (1964) *Hydraulic properties of porous media*. Hydrologiy papers. Fort Collins. Colorado State University. 24p.
- Bui N H, Nguyen D T (2002) Développement de l'agriculture Vietnamienne au cours des 15 dernières années. *VertigO – la revue électronique en sciences de l'environnement*. 3(2). <http://vertigo.revues.org/3738>.
- Campbell G S (1974) *Mooki River catchment hydrogeological investigation and dryland salinity studies*. Dept. Land and Water Conservation. Report TS 94-082, Vol 1 et 2.
- Chen S-K, Liu C-W (2002) Analysis of water movement in paddy rice fields (I) experimental studies. *Journal of Hydrology* 260, 206-215.
- Chen S-K, Liu C-W, Huang H-C (2002) Analysis of water movement in paddy rice fields (II) simulation studies. *Journal of Hydrology*. 268, 259-271.
- Chen W L, Shih K C, Shew J, Sheng F K (2001) Estimation of the infiltration rate of a paddy field in Yun-Lin, Taiwan. *Agricultural Systems*. 68, 41-54.
- Clapp R B, Hornberger G M (1978) Empirical equations for some hydraulic properties. *Water Resource Research* 14(4): 601-604.
- Clerc C, Rousseau A N, Jutras S (2008) Suivi de la nappe, de la recharge et de l'écoulement à l'aide de méthodes in situ afin de comprendre la dynamique de tourbières ombrotrophes de la région de la Baie de James. 76^e congrès de l'ACFAS 2008, 5 - 9 mai, 2008, Palais des congrès de Québec
- Crawford N H, Linsley R K (1966) *Digital Simulation in Hydrology*. Stanford Watershed Model IV. Stanford University, Dept. Civ. Eng. Tech. Rep. 39.

- Cunderlik J (2003) *Hydrologic model selection for the CFCAS project. Assessment of water resources risk and vulnerability to changing climatic conditions*. London, On., University of Western Ontario, Dept. of Civil and Environmental Engineering <http://www.eng.uwo.ca/research/iclr/fids/publications/products/Report%2012.pdf>
- Dang V H (2010) Propriétaire de terre dans le temps passé. *Journal Vietnamnet*. <http://tuanvietnam.vietnamnet.vn/2010-09-20-cong-huu-dat-dai-khong-hop-voi-thoi-qua-do>. Visité le 20/09/2010. (article en vietnamien)
- Dao H (2010) 3re Conférence Internationale du Riz à Hanoi, Vietnam, lieu du 8 au 13 Novembre 2010. *Journal HaNoiMoi*. <http://www.hanoimoi.com.vn/newsdetail/Kinh-te/398356/an-ninh-luong-thuc-van-de-buc-thiet.htm>. Visité le 20/09/2010 (article en vietnamien)
- DGS - Département Général de Statistique (2015) *Données Statistique* <https://gso.gov.vn/Default.aspx?tabid=217>. (Visité le 15 avril 2015).
- DHI (2000) MIKE 11, DHI Water and Environment, UK
- Doan D T, Tran V D, Tran V D (2008) Besoin d'eau, régime d'irrigation pour les rizicultures traditionnelle et novationelle au delta du Nord de Vietnam. Institut de l'Académie de Resource en Eau au Vietnam. *Journal Vietnamnet*. (http://www.vawr.org.vn/index.aspx?aac=CLICK&aid=ARTICLE_DETAIL&ari=1617&lang=1&menu=khoa-hoc-cong-nghe&mid=995&parentmid=0&pid=1&title=nhu-cau-nuoc-che-do-tuoi-thich-hop-cho-lua-duoc-can-h-tac-theo-phuong-phap-truyen-thong-va-cai-tien-o-vung-dong-bang-bac-bo). Visité le 15 juin 2012. (article en vietnamien)
- Downer C W, Ogden F L, Martin W D, Harmon R S (2002) Theory, development, and applicability of the surface water hydrologic model CASC2D. *Hydrological Processes* 16(2): 255–275.
- FAO (1990) *Méthodes d'irrigation. Manuel de formation n° 5. Gestion des eaux en irrigation*. Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture. 74 p.
- Fortin J-P, Villeneuve J-P, Bocquillon C (1990) HYDROTEL, PHYSITEL and IMATEL: an integrated application of remote sensing and GIS to hydrological modeling on microcomputer. *International Symposium on Remote Sensing and Water Resources*, 20-24 August, Enschede, The Netherlands.
- Fortin J-P, Moussa R, Bocquillon C, 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, Royer A (2004) *Le modèle hydrologique HYDROTEL – bases théoriques*. INRS-ETE, Québec, Canada. 80 p. <http://hydrotel.codeplex.com/documentation> Visité le 15 janvier 2011
- Fortin J-P, Brabant F, Benedetti B (2005) *Analyse du sous-modèle d'écoulement vertical BV3C du modèle hydrologique HYDROTEL: comparaison de deux méthodes d'intégration des équations différentielles*. Rapport interne produit pour le compte de l'IRQ, 68p.
- Fortin J-P, Duchesne S, Bernier M, Hoang K H, 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. *Actes des JSIRAUF*, Hanoi, 6-9 novembre 2007.
- GVN- Gouvernement du Viet Nam (2009) *Résolution de '63/NQ-CP' du Gouvernement pour la protection de sécurité nationale des nourritures*. Publicité le 23 Décembre 2009. http://www.chinhphu.vn/portal/page/portal/chinhphu/hethongvanban?class_id=509&mode=detail&document_id=92364
- Ghumman A R, Khan M Z, Khan M J (2006) Use of numerical modelling for management of canal irrigation water. *Journal of Irrigation and Drainage* 55(4):445-458.
- Gopakumar R, Mujumdar P P (2008) Afuzzy dynamic routing model. *Hydrological processes* 22(10):1564-1572
- Green W H, Ampt G A (1911) Studies on soil physics: The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultureal Science* 4(1): 1-24.
- Gupta P K, Singh R, Raghuwanshi N S, Dutta S, Panigrahy S (2008) Effect of remotely sensed data on the performance of a distributed hydrological model: Case study. *Journal of Hydrologic Engineering*. 13 (10):939-947.
- GWP - Global Water Partnership (2000) *Integrated Water Resources Management*. (TAC background paper; no. 4). Stockholm, Sweden. <http://www.gwpforum.org/gwp/library/Tacno4.pdf>
[http://www.gwp.org/Global/ToolBox/Publications/Background%20papers/04%20Integrate d%20Water%20Resources%20Management%20\(2000\)%20French.pdf](http://www.gwp.org/Global/ToolBox/Publications/Background%20papers/04%20Integrate d%20Water%20Resources%20Management%20(2000)%20French.pdf)
- Henk J M, Ogink, Nguyen N B, Nguyen X P (2005) *SECO GRONER/WL*, Delft Hydraulics. Rapport 81 p.
- Hoang K H (2009) *Intégration de données optiques (SPOT-4) et de données SAR polarimétriques (RADARSAT-2) pour cartographier l'occupation du sol du bassin de la*

- rivière Cau au Vietnam du Nord*. Rapport de l'examen doctoral. INRS – Eau, Terre et Environnement, Québec, Canada.
- Hoang K H (2014) *Cartographie de l'occupation du sol du bassin versant de la rivière Cau (Vietnam) au moyen d'images optiques et SAR en support à la modélisation hydrologique*. Thèse présentée pour l'obtention du grade de Philosophiae doctor (Ph.D.) en Sciences de l'eau. Québec, Canada, Université du Québec, INRS Eau Terre Environnement.
- Hoanh C T, Phong N D, Gowing J W, Tuong T P, Ngoc N V, Hien N X (2009) Hydraulic and water quality modeling: a tool for managing land use conflicts in inland coastal zones. *Water Policy* 11:106-120.
- Holton H N (1961) *A concept for infiltration estimates in watershed engineering*. USDA-ARS, page 41-51.
- Horton R E (1933) The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions of the American Geophysical Union* 14: 446-460.
- Huang Y, Fipps G (2003) Modeling Flows in Irrigation Distribution Networks – Model Description and Prototype. 2003 ASAE Annual International Meeting.. <http://idea.tamu.edu/documents/ASAE03paper.pdf>.
- Hydrocomp (2002) *Hydrocomp Forecast and Analysis Modeling*. <http://www.hydrocomp.com/HFAMinfo.htm> Visité le 18 janvier 2015
- Immerzeel W W, Gaur A, Zwart S J (2008) Integrating remote sensing and a process-based hydrological model to evaluate water use and productivity in a south Indian catchment. *Agricultural Water Management*. 95 (1):11-24
- Indarto K (2008) *Découpages spatiaux et conséquences sur le bilan hydrologique*. Thèse doctorale à l'Unité Mixte de Recherche Cemagref – ENGREF Structure et systèmes Spatiaux, Montpellier. <http://cemadoc.irstea.fr/cemoa/PUB00013526>
- IPRE – Institut de Plan des ressources en Eau (2004) *Projet du plan des ressources en eau de province Thai Nguyen*. Institut du Plan des Ressource en Eau, Hanoi. Rapport, 199 p.
- IPRE - Institut de Plan des ressources en Eau (2008) *Projet du plan des ressources en eau sur le bassin versant Càù et Thuong*. Institut du Plan des Ressource en Eau, Hanoi. Rapport, 160 p.
- IRRI- International Rice Research Institute (2007) *Manual for Growth Stage of the Rice Plant*. Rice Knowledge Bank. www.Knowledgebank.irri.org/growthstage/GrowStage.htm Visité le 12 février 2012

- Islam A, Raghuwanshi N S, Singh R (2008) Development and application for irrigation of hydraulic simulation model canal network. *Journal of Irrigation and Drainage - ASCE* 134(1):49-59.
- Janssen M, Lennartz B (2007) Horizontal and vertical water and solute flux in paddy rice field. *Soil and Tillage Research* 95: 133-141.
- Kaczmarek Z (1993) Water balance model for climate impact analysis. *Acta Geophysica Polonica* 41(4):1–16.
- Khepar S D, Yadav A K, Sondhi S K, Siag M (2000) Water balance model for paddy fields under intermittent irrigation practices. *Journal of Applied Irrigation Science*. 19(4):199-208.
- Kukul S S, Aggarwal GC (2003) Puddling depth and intensity effects in rice–wheat system on a sandy loam soil: II. Water use and crop performance. *Soil and Tillage Research* 74 (1): 37-45, 2003.
- Kostiakov A N (1932) *On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration*. Transactions of 6th Congress of International Soil Science Society. Moscow. pp. 17–21.
- Kouwen, N, M. Danard, A. Bingeman, W. Luo, F.R. Seglenieks and E.D. Soulis. 2005. “Case Study: Watershed Modeling with Numerical Weather Model Data”, *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE. 10 (1), 23-38
- Kuwagata, T., Hamasaki, T. and Watanabe, T. (2008) Modeling water temperature in a rice paddy for agro-environmental research. *Agri. Forest Meteorol.* 148: 1754-1766.
- Leavesley G H, Lichty R W, Troutman B M, Saindon L G (1983) *Precipitation-Runoff Modeling System: User's Manual*. US Geological Survey Water-Resources Investigations Report 83-4238, 207 p.
- Le Q V (2011) *Critère de conçu des ouvrage hydraulique pour le delta de la rivière Rouge*. Ministère de l'Agriculture et développement Rural. Hanoi.
- Lee T S, Najim M M, Aminul M H (2004) Estimating evapotranspiration of irrigated rice at the West Coast of Peninsular of Malaysia. *Journal of Applied Irrigation Science* 39(1): 103-117.
- Linacre E T (1977) A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone. *Agricultural Meteorology* 18 (6): 409-424.
- Littlewood I G, Down K, Parker J R, Post D A (1997) *IHACRES version 1.0 user guide*. Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford, UK and Integrated Catchment Assessment and Management Centre, Australian National University, Canberra, Australia, 94pp.

- Litrico X, Fromion V, Baume J P, Malaterre P O (2000) Modélisation et commande robuste de systèmes hydrauliques à surface libre: application aux rivières et canaux d'irrigation. *Journées thématiques "Automatique et environnement" CRAN, Nancy, 9-10 mars 2000* CemOA Publications - Publications scientifiques et techniques du Cemagref (France). <http://cemadoc.irstea.fr/oa/PUB00008222-modelisation-commande-robuste-systemes-hydraulique.html>
- Lozano D, Arranja C, Rijo M, Mateos L (2008) Simulation of automatic control of an irrigation canal. *Agricultural Water Management*. 97(1): 91-100.
- Malaterre P O (2008) *Contributions de l'automatique, de l'hydraulique et de l'informatique à la gestion des systèmes hydrauliques à surface libre*. Thèse doctorale à l'Université Paul Sabatier, Toulouse. École Doctorale EDSYS.
http://www.canari.free.fr/papers/hdr_malaterre_v241108.pdf
- Martinec J, Rango A, Roberts R (1994) *The Snowmelt Runoff Model (SRM) User's Manual*. Geographica Bernensia, Department of Geography, Univ. of Berne, Berne, Switzerland
- Masumoto T, Hai P T, Shimizu K (2008) Impact of paddy irrigation levels on floods and water use in the Mekong River basin. *Hydrological Processes*. 22 (9):1321-1328
- Mazhar H (2005) Numerical simulation of canals irrigation system in Pakistan. *Pakistan Engineering Congress, 70th Annual Session Proceedings*. Paper No. 668.
- Mishra A, Anand A, Singh R, Raghuwanshi N S (2001) Hydraulic modeling of Kangsabati Main Canal for performance assessment. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 127(1):27-34.
- Monteith, J. L. (1965) "Evaporation and Environment." In: The state and movement of water in living organism. *19th Symp. Soc. Exptl. Biol.* P. 205-234.
- Moussa R (1991) *Variabilité spatio-temporelle et modélisation hydrologique*. Thèse de doctorat de l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc. Montpellier, 258 p. + 5 annexes.
- Moussa R, Bocquillon C (1996) Criteria for the choice of flood-routing methods in natural channels. *Journal of Hydrology*. 186: 1-30.
- Moussa R (1997) Geomorphological transfer function calculated from digital elevation models for distributed hydrological modelling. *Hydrological Processes* 1 : 429-449.
- Morin G, Fortin J-P, Lardeau J P, Sochanska W, Paquette S (1981) *Modèle CEQUEAU: manuel d'utilisation*. INRS-Eau, Rapport scientifique No 93, 449 p.

- MRE- Ministère des Ressources en Eau (1988) *Critère 'TCVN 4118-85' Ministère des Ressources en Eau*. Dessins de système des canaux d'irrigation, Hanoi, Ministère des Ressources en Eau
- MRE- Ministère des Ressources en Eau (1990) *Critère '14TCN.60-88' Ministère des Ressources en Eau*. Critère théorique de débit spécifique de drainage pour les rizières. Hanoi, Ministère des Ressources en Eau
- Nguyen H T (2012) *Apport de la modélisation hydrologique distribuée à la gestion intégrée par bassin versant des ressources en eau*. Thèse de Philosophiae doctor (Ph.D.) en Sciences de l'eau. Québec, Canada, Université du Québec, INRS Eau Terre Environnement.
- Nguyen P D (2015) *Modélisation de la qualité de l'eau en rivière du bassin versant de la rivière Cau au Vietnam*. Thèse en évaluation pour l'obtention du grade de Philosophiae doctor (Ph.D.) en Sciences de l'eau. Québec, Canada, Université du Québec, INRS Eau Terre Environnement.
- Ngo L L (2013) Estimation de sédimentation du réservoir Nuicoc, proposition de solution protégé et utilisation durable. *Revue de l'Université des Ressources en Eau*. <http://tapchivatuyentap.tlu.edu.vn/Portals/10/So%2030/So%203100008.pdf> (article en vietnamien)
- ONV-Organisation de Nourriture du Vietnam (2015) *Augmentation des exportation du riz pendant dix sept ans*. <http://vietfood.org.vn/vn/default.aspx?c=52>. Visité le 20 avril 2015. (article en vietnamien)
- OSU-CE - Oregon State University Civil Engineering (2003) *EPA Storm Water Management Model (SWMM), Versions 4.31 and 4.4.*: <http://ccee.oregonstate.edu/swmm/> Visité le 22 février 2014
- Penman H L (1948) Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of Royal Society of London*. A193 : 120-146.
- Pham T T H (2013) *Choix des meilleures interventions pour l'amélioration de la qualité de l'eau à l'aide d'un outil informatique de gestion intégrée: Cas du bassin versant de la rivière Cau au Vietnam*. Thèse présentée pour l'obtention du grade de Philosophiae doctor (Ph.D.) en Sciences de l'eau. Québec, Canada, Université du Québec, INRS Eau Terre Environnement.
- Pham T N (2013) *Modélisation de l'érosion et du transport sédimentaire sur les bassins versants soumis à un régime de mousson dans un contexte de gestion intégrée des ressources en eau*. Thèse présentée pour l'obtention du grade de Philosophiae doctor (Ph.D.) en

- Sciences de l'eau. Québec, Canada, Université du Québec, INRS Eau Terre Environnement.
- Pham T H, Takao M, Katsuyuki S (2008) Development of a two-dimensional finite element model for inundation processes in the Tonle Sap and its environs. *Modelling Hydrology and Water Resources*. 22(9): 1329–1336
- Philip J R (1957) The theory of infiltration: The infiltration equation and its solution. *Soil Science* 83, 345-388.
- Priestley, C.H.B., and R.J. Taylor (1972) On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon. Weather Rev.*, [100](#): 81-82.
- Ratinho T, Figueiredo J, Rijo M (2002) Modeling, Control and Field Tests on an Experimental Irrigation Canal. *Proc. of 10th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation (MED2002)*, Lisbon, CD-ROM, Book of Abstracts, p. 53.
- Rémériéras G (1999) *L'hydrologie de l'ingénieur*. Collection de la division recherche et développement d'électricité de France. Paris, Eyrolles. 456 p.
- Ricard S (2008) *Évaluation du modèle HYDROTEL à estimer la recharge des aquifères: Application sur le bassin versant de la rivière Châteauguay*. Mémoire présenté pour l'obtention du grade de maître ès sciences (M.Sc) en sciences de l'eau. INRS-ETE, Québec, Canada.
- Richards L A (1931) Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Journal of Applied Physics* 1(5): 318–333.
- Rockwood D M (1964) *Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation*. U.S. Army Engineer Division, North Pacific, Portland, Oregon, Engineering Studies Project 171, Technical Bulletin No 22.
- Rousseau A N, Mailhot A, Turcotte R, Duchemin M, Blanchette C, Roux M, Etong N, Dupont J, Villeneuve J-P (2000) GIBSI - An integrated modeling system prototype for river basin management. *Hydrobiologia*. 422/423: 465-475.
- Rousseau A N, Mailhot A, Turcotte R, Duchemin M, Blanchette C, Roux E, Etong N, Dupont J, Villeneuve J-P (2000) GIBSI - An integrated modelling system prototype for river basin management. *Hydrobiologia*. 422/423:465-475.
- Rousseau A N, Quibé D, Savary S, Ricard S, Moquet J-S, Garbouj M S, Duchemin M (2007) *Vulnérabilité de l'agriculture en réponse aux changements climatiques: étude de l'influence passée et future de l'occupation du sol agricole du territoire d'un bassin versant, à l'aide d'un système de modélisation intégrée*. Rapport final remis au Fonds d'action pour le changement climatique, projet A946, 336 p.

- Rousseau A N, Savary S (2009) *Calage du système GIBSI. Exemple de procédure de calage et d'intégration du système GIBSI sur le bassin versant de la rivière Beaurivage*. Notes de cours EAU 453 Gestion Intégrée des Ressources en Eau. INRS-ETE, Canada.
- Rousseau A N, Jutras S (2009) *Rapport synthèse du projet CRSNG-RDC intitulé: "Adaptation du modèle hydrologique distribué HYDROTEL au milieu boréal québécois"*. Rapport de recherche No R-1065. Québec, INRS Eau Terre Environnement <http://espace.inrs.ca/855/1/R001065.pdf>
- Rousseau A N, Savary S, Hallema D W, Gumière S J, Foulon E (2013) Modeling the effects of agricultural BMPs on sediments, nutrients, and water quality of the Beaurivage River watershed (Quebec, Canada). *Canadian Water Resources Journal*, 38(2), 99-120.
- Sato Y, Ma X, Xu J, Matsuoka M, Zheng H, Liu C, Fukushima Y (2008) Analysis of long-term water balance in the source area of the Yellow River basin. *Hydrological Processes*. 22 (11):1618-1629
- Schroeter, H.O., D.K. Boyd, and H.R. Whiteley. 2000. GAWSER: A versatile tool for water management planning. *Proceedings of the Ontario Water Conference 2000*, April 26-27, 2000, Richmond Hill, Ontario.
- Sharma P K, De Datta S K (1985) *Effect of puddling on soil physical properties and processes*. Soil Physics and Rice, International Rice Research Institute, Manila, Philippines, pp. 217–234.
- Sharma P K, Bhagat R M (1993) Puddling and compaction effects on water permeability of texturally different soils. *Journal of the Indian Society of Soil Science*. 41: 1-6.
- Singh V P (1995) *Computer models of watershed hydrology*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, USA, 1130 p
- Singh V P (1995) Watershed modelling. Singh V P (1995) *Computer models of watershed hydrology*. Colorado, USA. Water Ressources Publications, Highlands Ranch, pp. 1-22.
- Singh V P, Woolhiser D A (2002) Mathematical modelling of watershed hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, 7: 270-292.
- Singh R, Kroes J G, Dam J C, Feddes R A (2006) Distributed ecohydrological modelling to evaluate the performance of irrigation system in Sirsa district, India: I. Current water management and its productivity. *Journal of Hydrology*. 329 (3-4):692-713.
- Smith R E, Parlange J-Y (1978) A parameter-efficient hydrologic infiltration model. *Water Resources Research* 14 (3):533-538.

- Someth P, Kubo N, Tanji H, Ly S (2009) Ring dike system to harness floodwater from the Mekong River for paddy rice cultivation in the Tonle Sap Lake floodplain in Cambodia. *Agricultural Water Management*. 96 (1):100-110.
- Somura H, Yoshida K, Tanji H (2008) Decadal fluctuations in the consumption of irrigation water during the rainy season, Lower Mekong River. *Hydrological Processes*. 22 (9):1310-1320
- Steven V (1996) *Canal water distribution at the secondary level in the Punjab, Pakistan*. Report NO. R-10. Pakistan National Program. International Irrigation Management Institute. 193p. <http://publications.iwmi.org/pdf/H019411.pdf>
- Swain E D, Chin D A (1990) Model of Flow in Regulated Open-Channel Networks. *Journal of Irrigation and Drainage- ASCE* 116(4):537-556.
- Tabbal D F, Bouman B A M, Bhuiyan S I, Sibayan E B, Sattar M A (2002) On-farm strategies for reducing water input in irrigated rice: case studies in the Philippines. *Agricultural Water Management* 56, 93–112.
- Tahir H (1988) Flow Simulation Using Channel Network Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 144(3): 424-441.
- Thomassin M, Georges D, Besançon G, Litrico X (2006) Modélisation et identification d'un bief d'irrigation par une méthode de collocation. (HAL - CCSD). *Journées Identification et Modélisation Expérimentale*. JIME' 2006 - 16 et 17 Novembre-Poitiers. <http://en.scientificcommons.org/23654283> Visité le 12 mars 2010
- Tuong T P, Wopereis M C S, Marquez J A, Kropff M J (1994) Mechanisms and control of percolation losses in irrigated puddled rice fields. *Soil Science Society of America Journal*. 58: 1794–1803.
- Turcotte R, Fortin J-P, Rousseau A N, Massicotte S, Villeneuve J-P (2001) Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network. *Journal of Hydrology*. 240(3-4):225-242.
- Turcotte R (2008) *Éléments du calage et de l'implantation d'un modèle hydrologique dans une perspective d'utilisation opérationnelle en prévision hydrologique*. Thèse présentée pour l'obtention du grade de Philosophiae doctor (Ph.D.) en Sciences de l'eau. Québec, Canada, Université du Québec, INRS Eau Terre Environnement.
- Vazquez J, Zug M, Bellefleur D, Grandjean B, Scrivener O (1999) Utilisation d'un réseau de neurones pour appliquer le modèle de Muskingum aux réseaux d'assainissement. *Revue des sciences de l'eau*. 12 (3) : 577-595.
- Villeneuve J-P, Blanchette C, Duchemin M, Gagnon J-F, Mailhot A, Rousseau A N, Roux M, Tremblay J-F, Turcotte R (1998) *Rapport final du projet GIBSI: Gestion de l'eau des*

- bassins versants à l'aide d'un système informatisé - Tome 1.* Rapport No R-462, Sainte-Foy, Canada, INRS-Eau.
- Villeneuve J-P, Blanchette C, Duchemin M, Gagnon J F, Mailhot A, Rousseau A N, Roux M, Tremblay J F, Turcotte R (1998a) *Rapport Final du Projet GIBSI: Gestion de l'Eau des Bassins Versants à l'Aide d'un Système Informatisé. Tome 1.*, R-462, Sainte-Foy, Canada, INRS-Eau.
- Villeneuve J-P, Rousseau A N, Mailhot A, Salvano E, Simard B, Corriveau R, Tremblay S (2003) *Guide de l'usager de GIBSI (Version 2).* Rapport R-549-g2, Québec, Canada, INRS Eau Terre Environnement.
- 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. *9th UNESCO/IAHS Kovacs Colloquium: River Basins - from Hydrological Science to Water Management / Bassin versants - de l'hydrologie à la gestion de l'eau*, (Paris, France), pp. 1-39. Willigford, UK, IAHS Press.
- VRKB - Vietnamese Rice Knowledge Bank (2013) *Technique de culture rizicole.* http://www.vaas.org.vn/Images/caylua/02/02_relua.htm Visité le 12 avril 2013 (document en vietnamien)
- Vyas S K, Sarma P B S (1992) An analytical model for estimation of flows at various locations in a canal command area. *J. Irrig. Power*, 48(1), 125–137. In: Bhadra A, Bandyopadhyay A, Singh R, Raghuwanshi N S (2009) Integrated Reservoir-Based Canal Irrigation Model. I: Description. *Journal of Irrigation and Drainage-ASCE* 135(2):149-157.
- Wassmann R, Hien N X, Hoanh C T, Tuong T P (2002) Sea level rise affecting the Vietnamese Mekong Delta: Water elevation in the flood season and implications for rice production. *Climatic Change* 66(1-2):89-107.

11. Annexes

ANNEXE DU CHAPITRE 5

Tableau A.5.1 : Données de détermination de la courbe élévation vs volume

Élévation (m)	Volume observé (10 ⁶ m ³)	Volume simulé par le modèle (10 ⁶ m ³)	Écart entre volumes observé et simulé (10 ⁶ m ³)
34	7,10	8,02	-0,92
35	10,70	10,80	-0,10
36	16,40	15,69	0,71
37	23,80	22,64	1,16
38	32,50	31,60	0,90
39	42,10	42,51	-0,41
40	53,90	55,32	-1,42
41	69,30	69,98	-0,68
42	86,90	86,43	0,47
43	105,30	104,63	0,67
44	123,60	124,52	-0,92
45	145,80	146,05	-0,25
46,2	175,00	173,98	1,02
48,25	226,48	226,71	-0,23

Tableau A.5.2 : Relation niveau vs surface moyenne du lac

Niveau (m)	Surface moyenne (10³ m²)
34,5	3600
35,5	5700
36,5	7400
37,5	8700
38,5	9600
39,5	11800
40,5	15400
41,5	17600
42,5	18400
43,5	18300
44,5	22200
45,6	24333
47,2	25112

Tableau A.5.3 : Détermination de la courbe volume vs niveau

Volume (10⁶ m³)	Niveau (m)	Niveau simulé par modèle (m)	Écart entre niveau réel et simulé (m)
7,10	34	34,29	-0,29
10,70	35	34,91	0,09
16,40	36	35,82	0,18
23,80	37	36,88	0,12
32,50	38	37,96	0,04
42,10	39	38,98	0,02
53,90	40	40,03	-0,03
69,30	41	41,13	-0,13
86,90	42	42,14	-0,14
105,30	43	43,03	-0,03
123,60	44	43,86	0,14
145,80	45	44,86	0,14
175,00	46,2	46,22	-0,02
226,48	48,25	47,35	-0,15

ANNEXE DU CHAPITRE 6

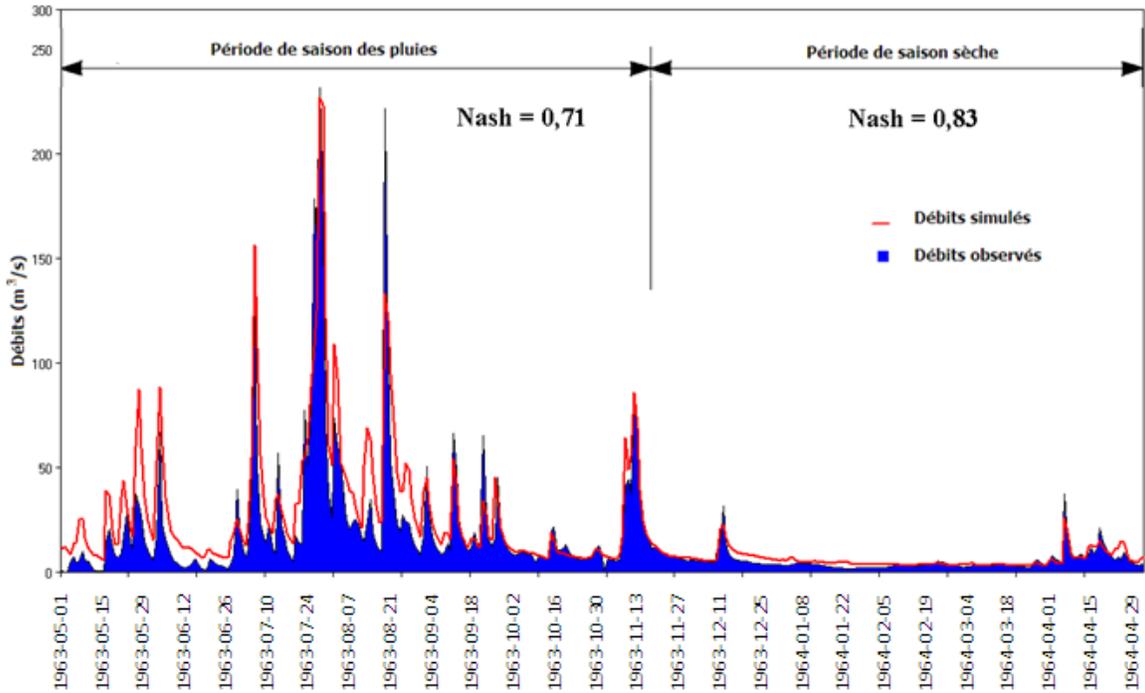


Figure A.6.1 : Hydrogrammes simulés et observés de mai 1963 à avril 1964

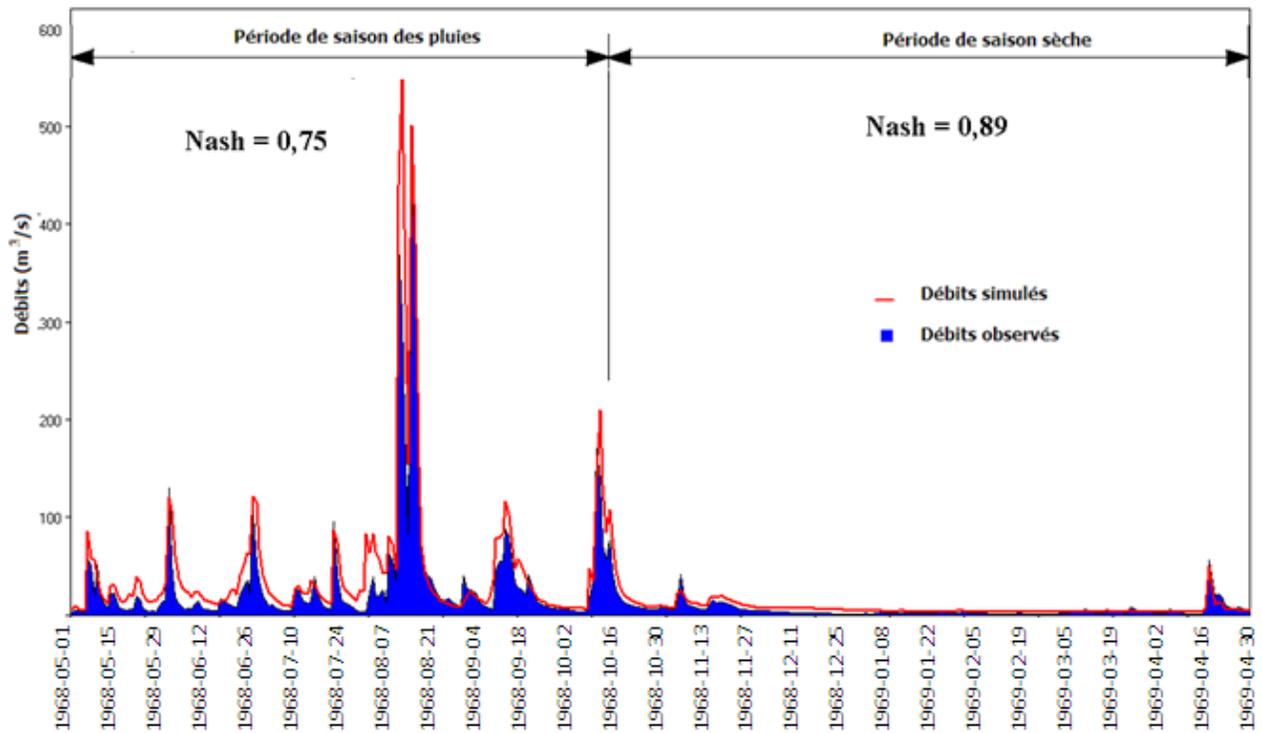


Figure A.6.2 : Hydrogrammes simulés et observés de mai 1968 à avril 1969

Tableau A.6.1 : Résultats de calage et de validation du modèle

Période	NASH	RCEQM (m ³ /s)	ERSVET (%)
Calage 1961-1966	0,72	0,32	37,8
Validation 1966-1970	0,78	0,38	35,7

Tableau A.6.2 : Stations météorologiques pluviométriques pour la période 1960-1970

No	Identifié	Station	Type	Longitude (degrés)	Latitude (degrés)	Altitude (m)
1	7777776	Dai Tu	Météo	105,63	21,63	52,6
2	7777777	Diem Mac	Pluie	105,55	21,83	136,6
3	7777778	Dinh Hoa	Météo	105,63	21,90	96,4
4	7777710	Ky Phu	Pluie	105,65	21,53	62,8
5	7777713	Phan Me	Pluie	105,71	21,73	60,3
6	7777714	Pho Yen	Pluie	105,86	21,40	9,9
7	7777715	Phu Binh	Pluie	105,96	21,43	10,7
8	7777723	Thai Nguyen	Pluie	105,83	21,60	29,2
9	7777730a	Tam Dao	Pluie	105,65	21,46	599,9
10	7777790	Minh Tien	Pluie	105,6	21,15	224,0
11	7777791	Yen Lang	Pluie	105,91	21,23	0
12	7777793	Hiep Hoa	Météo	106,09	21,20	0

ANNEXE DU CHAPITRE 7

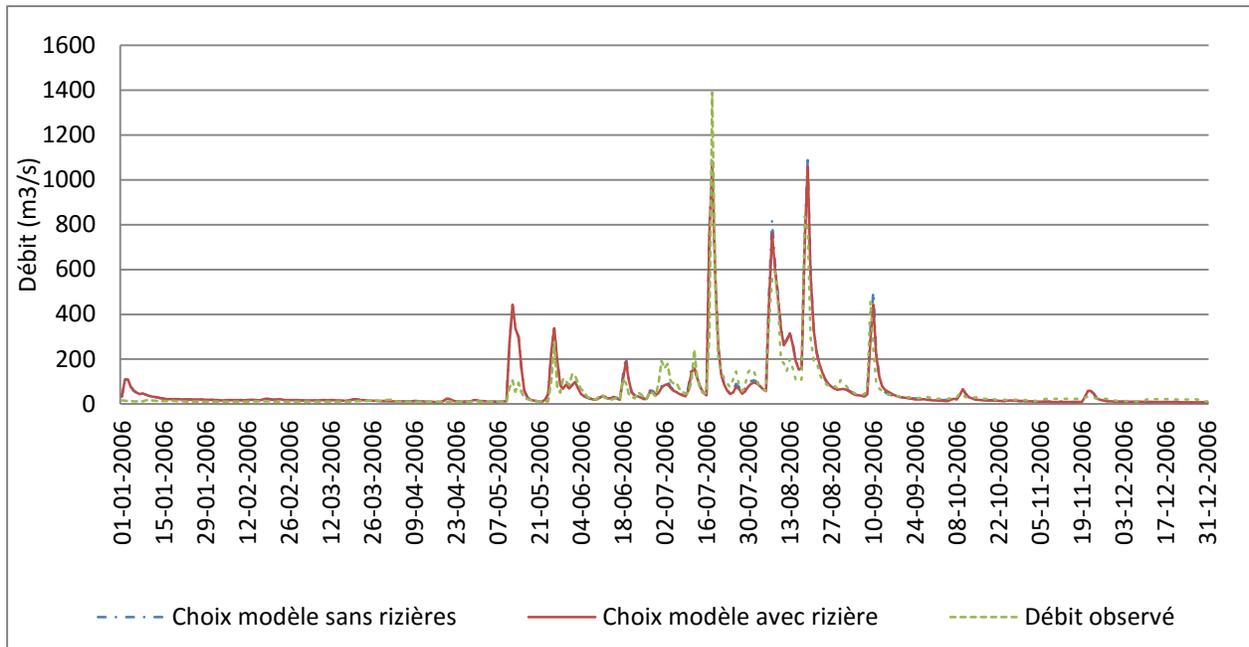


Figure A.7.1 : Amélioration de la simulation de 2006 à la station Giabay

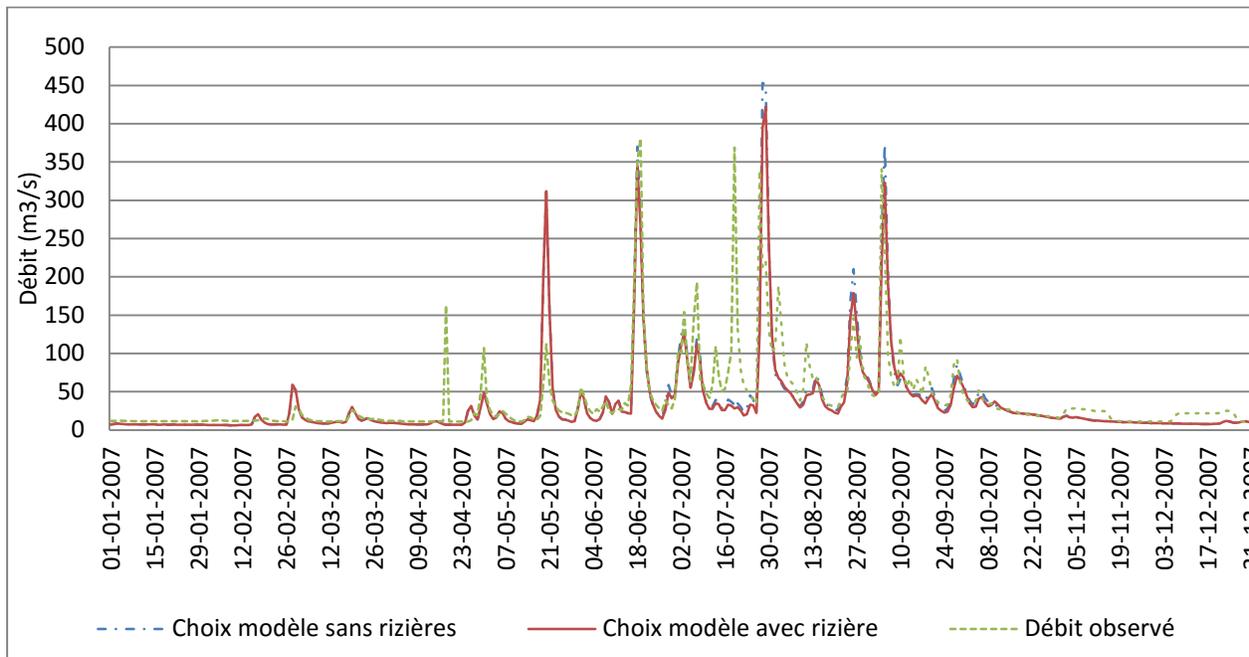


Figure A.7.2 : Amélioration de la simulation de 2007 à la station Giabay

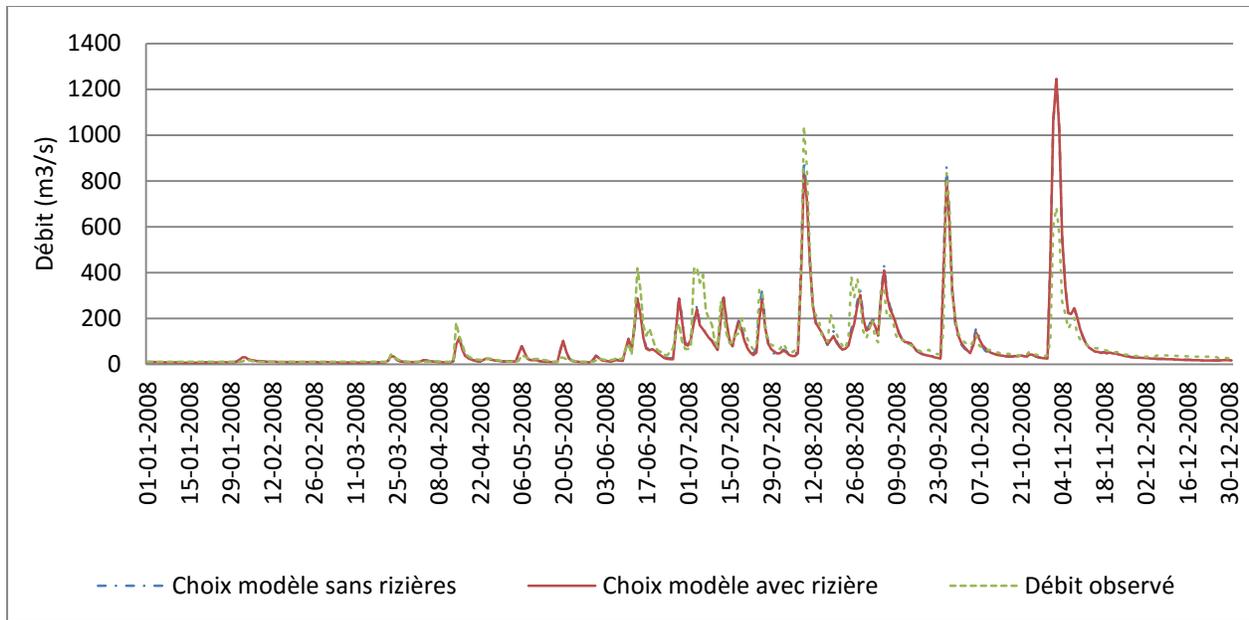


Figure A.7.3 : Amélioration de la simulation de 2008 à la station Giabay

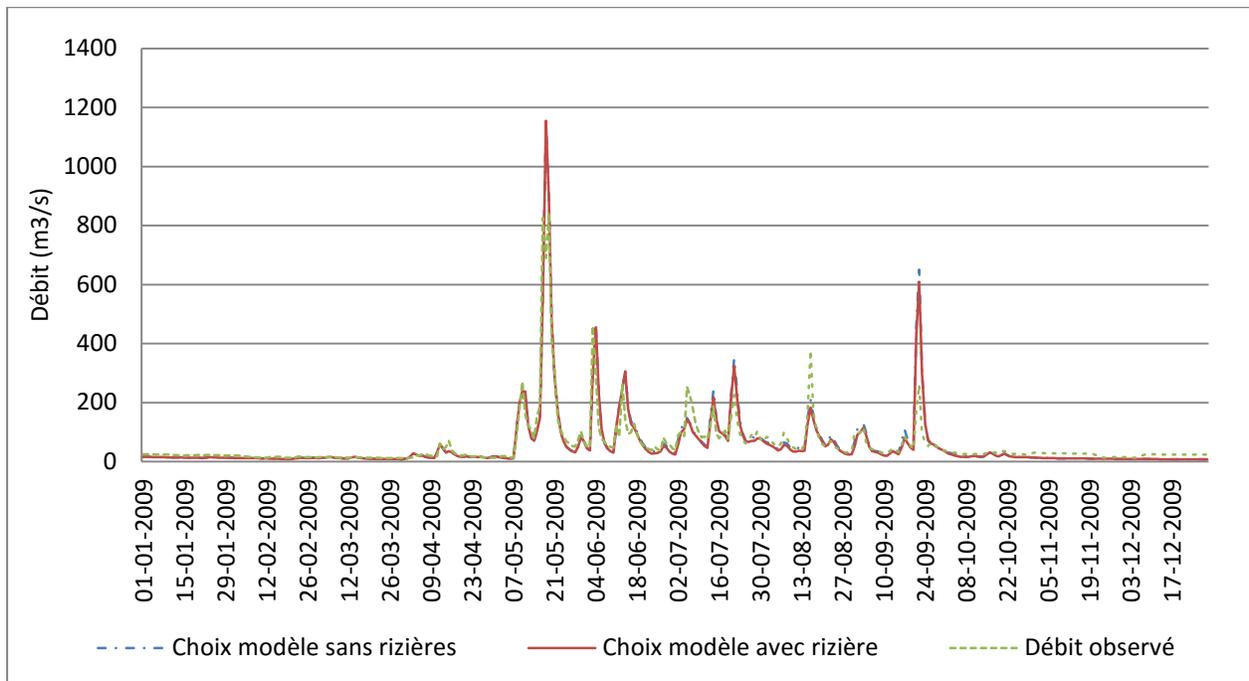


Figure A.7.4 : Amélioration de la simulation de 2009 à la station Giabay

**Tableau A.7.1 : Données pluviométriques mensuelles
sur le bassin versant de la rivière CONG (mm)**

Année	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Total
1961	-	32	66	165	150	334	268	372	326	147	90	80	2 053
1962	8	16	30	111	191	369	245	320	202	56	27	1	1 575
1963	1	31	58	53	241	212	460	402	156	70	154	39	1 877
1964	17	18	47	167	85	287	379	225	431	322	24	40	2 040
1965	5	48	31	224	320	356	265	91	177	178	53	82	1 829
1966	40	8	27	121	115	491	251	283	85	205	24	21	1 671
1967	7	59	34	112	149	192	273	250	323	21	52	24	1 495
1968	19	53	33	107	233	245	209	544	168	247	70	2	1 929
1969	47	8	41	133	180	194	343	391	209	170	58	2	1 776
1970	19	24	40	119	232	389	303	301	183	66	18	16	1 711
1971	17	36	41	73	372	185	580	617	139	164	9	17	2 249
1972	3	21	51	76	325	165	181	672	272	184	65	19	2 034
1973	12	15	71	194	152	329	488	413	489	68	7	6	2 243
1974	49	12	33	151	144	237	344	184	207	218	12	20	1 612
1975	85	15	89	149	447	350	149	359	226	80	28	35	2 012
1976	15	57	28	179	156	102	133	406	127	258	43	3	1 508
1977	51	10	37	57	105	116	453	193	137	113	28	59	1 359
1978	30	22	24	72	330	539	228	298	343	441	99	10	2 436
1979	54	63	26	94	264	413	216	407	354	18	-	2	1 911
1980	9	56	50	84	194	426	728	611	232	96	24	23	2 534
1981	22	31	93	258	222	189	297	296	157	247	61	0	1 872
1982	21	43	46	127	145	194	384	546	229	74	70	6	1 884
1983	23	31	57	110	136	158	471	235	183	200	58	19	1 681
1984	3	11	16	116	172	635	323	303	161	109	182	5	2 035
1985	17	43	48	78	173	123	221	344	325	103	152	2	1 627
1986	13	12	9	320	422	241	497	188	186	94	22	21	2 022
1987	26	30	49	113	145	265	183	271	250	199	78	-	1 610
1988	23	34	25	26	136	279	215	444	182	159	12	1	1 534
1989	32	10	142	90	349	341	436	349	222	172	9	4	2 156
1990	48	86	159	165	265	281	418	370	338	167	66	8	2 369
1991	14	4	122	34	176	451	412	379	87	96	104	32	1 910
1992	29	62	62	39	234	412	468	118	140	3	41	59	1 665
1993	23	94	55	82	353	157	358	268	163	53	44	8	1 655
1994	11	66	139	50	268	114	586	419	249	119	3	39	2 063
1995	15	21	76	105	106	367	420	579	108	31	45	1	1 873
1996	8	4	119	59	131	489	406	475	181	102	103	4	2 078
1997	65	8	147	189	144	198	638	372	211	158	8	33	2 170
1998	7	14	78	118	181	312	298	128	150	103	9	11	1 407
1999	21	10	27	90	235	264	226	305	137	178	113	76	1 681
2000	12	48	54	39	284	198	439	135	151	260	8	3	1 631
2001	27	50	117	103	208	371	661	423	118	130	30	15	2 254
2002	18	27	48	72	246	278	276	389	154	122	47	56	1 732
2003	41	52	19	68	273	185	311	430	143	63	1	5	1 590
2004	24	22	70	143	310	148	353	214	79	1	43	33	1 441
2005	18	35	70	70	148	298	305	439	317	12	92	41	1 844
2006	3	32	41	41	246	195	345	421	204	58	44	7	1 636
2007	5	46	63	99	108	237	237	182	228	70	15	21	1 310
2008	22	29	35	95	176	303	393	452	294	241	270	6	2 315
2009	20	36	56	163	423	268	445	180	253	148	5	3	1 999
Moyenne	23	33	59	112	220	283	357	347	212	135	53	21	1 855

**Tableau A.7.2 : Calcul de probabilité des précipitations annuelles
sur le bassin versant de la rivière CONG (mm)**

No	Année	P (%)	Pluviométrie annuelle (mm)	No	Année	P (%)	Pluviométrie annuelle (mm)
1	2007	98	1 310	26	1995	48	1 873
2	1977	96	1 359	27	1963	46	1 877
3	1998	94	1 407	28	1982	44	1 884
4	2004	92	1 441	29	1991	42	1 910
5	1967	90	1 495	30	1979	40	1 911
6	1976	88	1 508	31	1968	38	1 929
7	1988	86	1 534	32	2009	36	1999
8	1962	84	1 575	33	1975	34	2 012
9	2003	82	1 590	34	1986	32	2 022
10	1987	80	1 610	35	1972	30	2 034
11	1974	78	1 612	36	1984	28	2 035
12	1985	76	1 627	37	1964	26	2 040
13	2000	74	1 631	38	1994	24	2 063
14	2006	72	1 636	39	1961	22	2053
15	1993	70	1 655	40	1996	20	2 078
16	1992	68	1 665	41	1989	18	2 156
17	1966	66	1 671	42	1997	16	2 170
18	1983	64	1 681	43	1973	14	2 243
19	1999	62	1 681	44	1971	12	2 249
20	1970	60	1 711	45	2001	10	2 254
21	2002	58	1 732	46	2008	8	2 315
22	1969	56	1 776	47	1990	6	2 369
23	1965	54	1 829	48	1978	4	2 436
24	2005	52	1 844	49	1980	2	2 534
25	1981	50	1 872	Moyenne			1 855

**Tableau A.7.3 : Calcul de probabilité des précipitations en saison sèche
sur le bassin versant de la rivière CONG (mm)**

No	Saison sèche	P (%)	Pluviométrie moyenne journalière (mm)	No	Saison sèche	P (%)	Pluviométrie moyenne journalière (mm)
1	1988	98	1,60	26	1992	48	2,80
2	1977	96	1,72	27	1976	46	2,86
3	1966	94	2,06	28	2000	44	2,87
4	1984	92	2,09	29	1970	42	2,87
5	1996	90	2,11	30	1961	40	2,89
6	2007	88	2,13	31	1968	38	2,93
7	1995	86	2,13	32	1973	36	2,94
8	1964	84	2,20	33	2003	34	3,00
9	2005	82	2,25	34	1972	32	3,13
10	1991	80	2,31	35	1978	30	3,17
11	2008	78	2,35	36	1979	28	3,32
12	1962	76	2,35	37	2001	26	3,35
13	1983	74	2,36	38	1994	24	3,54
14	1985	72	2,37	39	1971	22	3,56
15	1967	70	2,39	40	1997	20	3,66
16	2006	68	2,40	41	2004	18	3,74
17	1987	66	2,41	42	1993	16	4,01
18	1982	64	2,52	43	1989	14	4,13
19	1999	62	2,54	44	1981	12	4,14
20	1963	60	2,54	45	1965	10	4,16
21	1974	58	2,58	46	2009	8	4,62
22	1980	56	2,58	47	1990	6	4,79
23	1998	54	2,62	48	1986	4	5,14
24	1969	52	2,71	49	1975		5,20
25	2002	50	2,72	Moyenne			2,96

**Tableau A.7.4 : Calcul de probabilité des précipitations en saison des crues
sur le bassin versant de la rivière CONG (mm)**

N o	Saison des pluies	P (%)	Pluviométrie moyenne journalière (mm)	No	Saison des pluies	P (%)	Pluviométrie moyenne journalière (mm)
1	2004	98	5,20	26	1963	48	8,50
2	2007	96	6,23	27	1969	46	8,54
3	1998	94	6,48	28	1966	44	8,60
4	1993	92	6,52	29	2005	42	8,96
5	1977	90	6,62	30	1979	40	9,20
6	1976	88	6,71	31	1968	38	9,23
7	1967	86	6,92	32	1991	36	9,31
8	1965	84	6,97	33	1982	34	9,33
9	1999	82	7,25	34	1961	32	9,46
10	1985	80	7,29	35	1972	30	9,63
11	2003	78	7,39	36	1994	28	9,71
12	1992	76	7,45	37	1995	26	9,83
13	1975	74	7,60	38	1989	24	9,93
14	1987	72	7,63	39	1984	22	10,00
15	2000	70	7,73	40	1990	20	10,28
16	1981	68	7,75	41	1997	18	10,30
17	1974	66	7,78	42	1964	16	10,74
18	1962	64	7,79	43	1996	14	10,80
19	1986	62	7,87	44	2008	12	11,00
20	2002	60	7,96	45	1971	10	11,01
21	2006	58	7,99	46	2001	8	11,13
22	1970	56	8,12	47	1973	6	11,68
23	1983	54	8,15	48	1978	4	12,08
24	1988	52	8,36	49	1980	2	13,68
25	2009	50	8,46	Moyenne			8,72