



Analyse de quelques modèles hydrologiques comportant explicitement une prise en compte d'échange entre eaux de surface et eaux souterraines – Zoom sur le Burkina Faso

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT
OPTION : INFRASTRUCTURES ET RESEAUX HYDRAULIQUES (EAU
SOUTERRAINE)**

Présenté et soutenu publiquement le *24 Juin 2013* par

Frédéric Edem K. D. AHADJI

Travaux dirigés par :

Jean Emmanuel PATUREL

Dr Hydrologue 2iE - IRD

&

Mahamadou KOITA

Dr Hydrogéologue 2iE/ CCREC

Jury d'évaluation du stage :

Président : **Mahamadou KOITA**

Membres et correcteurs :

Lawani MOUNIROU

Pierre GENTHON

Jean-Emmanuel PATUREL

Promotion [2012/2013]

CITATION

“WE CAN only see a short distance ahead, but we can see plenty there that needs to be done.”
Alan Turing, Computing machinery and intelligence (1950), *Mind*, vol. 59, n° 36

DEDICACE

A ma très chère famille, pour votre amour, votre confiance, votre soutien et vos prières exclusifs et indéfectibles à mon égard.

REMERCIEMENTS

A travers ces quelques mots je voudrais pouvoir exprimer mes véritables et sincères remerciements à ces personnes, qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Je sais gré à la direction du Centre Commun de Recherche Eau Climat (CCREC) du 2iE et l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) pour m'avoir permis de faire ce stage.

Grand merci à mes encadreur M. PATUREL et M. KOITA pour votre disponibilité, écoute et remarques.

Je ne saurais oublier le corps professoral du 2ie pour la connaissance transmise pendant tout mon cursus.

Mes pensées vont aussi à l'encontre de tous mes camarades de 2ie, surtout Parfait Gbedenu, Manu Seshie qui ont toujours su être présents pour moi et qui m'ont encouragé dans cette entreprise.

A ceux que je n'ai pu mentionner dans cette liste non exhaustive, à tous, voyez en ce mémoire l'accomplissement de tous les efforts consentis, de chacun vos gestes amicaux et encourageants !

RESUME

Les modèles hydrologiques sont des outils indispensables de prévision et de gestion de la ressource en eau. On recherche plutôt des modèles relativement simples, robustes et capables de reproduire à des échelles d'espace et de temps des résultats de simulations satisfaisants. L'objectif de ce travail est d'étudier les échanges entre eaux de surface et eaux souterraines au Burkina Faso vus par des modèles hydrologiques simples : GR4J, GR2M, ABCD, SMAP, qui ont déjà été utilisés dans la sous-région à d'autres fins. Les résultats de la simulation des modèles au pas de temps mensuels montrent une similitude entre l'évolution du réservoir souterrain et la piézométrie observée sur le terrain. Mais les résultats ne sont pas vraiment satisfaisants : des écarts de 0.05 à 8.62% entre les valeurs des modèles et celles observées. Néanmoins, le modèle GR2M est celui qui fournit les meilleures simulations. Le modèle SMAP sous-estime la recharge de la nappe, tandis que, le modèle GR4J ne donne pas une simulation satisfaisante. De ces résultats on serait amené hâtivement à dire que le modèle à pas de temps journalier ne reproduit pas correctement l'évolution des nappes. Cependant, ces résultats demandent à être complétés par une mission de terrain et un autre langage de programmation en utilisant d'autres algorithmes d'optimisation

Mots Clés :

-
- 1 – Echange eaux de surface – eaux souterraines**
 - 2 – Burkina Faso**
 - 3 - Piézomètres**
 - 4 – Modèles hydrologiques**
 - 5 – ABCD, GR4J, GR2M, SMAP**

ABSTRACT

Hydrological models are essential tools for forecasting and managing water resources. Rather we look for models relatively simple, robust and capable of reproducing at scales of space and time adequate simulations results. The objective of this work is to study the interaction between surface water and ground water in Burkina Faso seen by simple hydrological models: GR4J, GR2M, ABCD, and SMAP, which have already been used in the region of other purposes. The results of the simulation of monthly time steps models show a similarity between the evolution of the underground reservoir and hydraulic head observed in the field. But the results are not really satisfying: deviations from 0.05 to 8.62% between the values of the models and observed. Nevertheless, the GR2M model provides the best simulations. SMAP model underestimates the groundwater recharge. For cons, the GR4J model does not provide adequate simulation. From these results it would be hasty to say that daily time steps model does not correctly reproduced the evolution of groundwater. However, these results need to be complemented by a field mission and another programming language using other optimization algorithms.

Key words:

- 1 – Surface water / ground water**
- 2 – Burkina Faso**
- 3 - Piezometer**
- 4 – Hydrological models**
- 5 – ABCD, GR4J, GR2M, SMAP**

LISTE DES ABREVIATIONS

CREC : Centre de Recherches et d'Etudes de Chatou

CRU : Climate Research Unit

DGRE : Direction Général des Ressources en Eau

DGH : Direction Général de l'Hydraulique

GARDENIA : Global A Réservoirs pour la simulation de DÉbits et de Niveaux Aquifères

G.I.R.E : Gestion Intégrée des Ressources en Eau

GR4J : Génie Rural à 4 paramètres Journaliers

GR2M : Génie Rural à 2 paramètres Mensuels

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

SIEREM : Système d'information environnemental sur les Ressources en Eau et leur

Modélisation

NSE : Nash-Sutcliffe

SIG : Système d'Information Géographique

SMAP: Soil Moisture Accounting Procedure

SOMMAIRE

CITATION	i
DEDICACE	ii
Remerciements.....	iii
Résumé.....	iv
Abstract	v
Liste des abréviations	vi
Sommaire.....	vii
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES FIGURES	xi
Introduction Générale	1
I. Introduction	1
I.1. Contexte de l'étude	1
I.2. Problématique.....	1
II. Objectifs de l'étude.....	2
II.1. Objectif général.....	2
II.2. Objectifs spécifiques	2
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	3
I. Les Modèles hydrologiques.....	3
I.1. Représentation de l'espace.....	3
I.1.1. Les modèles GR.....	4
I.1.2. Le modèle GARDÉNIA.....	11
I.1.3. Le modèle abcd.....	13
I.1.4. Le modèle SMAP.....	16
I.1.5. Le modèle CREC.....	18
MATERIEL ET METHODE	22
I. Présentation de la zone d'étude.....	22

I.1. Géographie et climatologie.....	22
I.2. Caractéristiques physiques des bassins étudiés.....	23
I.3. Géologie et hydrogéologie	24
I.3.1. Le bassin de la Comoé	24
I.3.2. Le bassin du Mouhoun.....	25
I.3.3. Le bassin du Nakanbé	26
I.3.4. Le bassin du Niger	26
II. Présentation des données de l'étude.....	27
II.1. Données disponibles.....	27
II.1.1. Données climatiques : Chroniques de pluies et d'ETP	27
II.1.2. Données hydrologiques.....	27
II.2. Récapitulatif des bassins versants retenus	31
III. Modèles hydrologiques.....	31
III.1. Modèles utilisés	31
III.2. Justification du choix des modèles	31
III.3. Moyens informatiques.....	32
IV. Méthodologie.....	33
IV.1. Méthode de calage	33
IV.1.1. Le calage manuel	33
IV.1.2. Le calage automatique	33
IV.2. Critère d'évaluation des modèles	34
IV.3. Evolution du niveau des nappes et de la pluviométrie	34
IV.4. Calcul de la piézométrie par le modèle.....	35
RESULTATS ET ANALYSE.....	37
I. Résultats	37
I.1 Bassin de Diarabakoko.....	38
I.2 Bassin de Folonzo.....	38
I.3 Bassin de Diebougou.....	40
I.4 Bassin de Niagho.....	41

I.5	Bassin de Nwokuy	42
I.6	Bassin de Samandeni	42
I.7	Bassin de Wayen	43
I.8	Bassin de Yakala	44
II.	Résultats modèles CREC, GARDENIA.....	45
	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	46
I.	Synthèse	46
II.	Perspectives	47
	BIBLIOGRAPHIE	48
	Annexes.....	I

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Périodes et pourcentage lacune des données hydrométriques	28
Tableau 2 : Périodes et pourcentage lacune des données piézométriques.....	29
Tableau 3 : Quelques données sur les piézomètres	30
Tableau 4: Bassins versants étudiés.....	31
Tableau 5 : Critères de NSE obtenu sur les différents modèles, Diarabakoko.....	38
Tableau 6 : Critères de NSE obtenu sur les différents modèles, Folonzo	39
Tableau 7 : Critères de NSE obtenu sur les différents modèles, Diébougou.....	40
Tableau 8 : Critères de NSE obtenu sur les différents modèles, Niagho.....	41
Tableau 9 : Critères de NSE obtenu sur les différents modèles, Nwokuy.....	42
Tableau 10 : Critères de NSE obtenu sur les différents modèles, Samandeni.....	43
Tableau 11: Critères de NSE obtenu sur les différents modèles, Wayen	44
Tableau 12 : Critères de NSE obtenu sur les différents modèles, Yakala	45
Tableau 13 : Pourcentage d'écart entre les niveaux piézométriques, Dirabakoko.....	XX
Tableau 14 : Pourcentage d'écart entre les niveaux piézométriques, Folonzo	XX
Tableau 15 : Pourcentage d'écart entre les niveaux piézométriques, Niagho.....	XXI
Tableau 16 : Pourcentage d'écart entre les niveaux piézométriques, Nwokuy.....	XXI
Tableau 17 : Pourcentage d'écart entre les niveaux piézométriques, Samandeni.....	XXII
Tableau 18 : Pourcentage d'écart entre les niveaux piézométriques, Wayen	XXII
Tableau 19 : Pourcentage d'écart entre les niveaux piézométriques, Yakala	XXIII
Tableau 20 : Pourcentage d'écart entre les niveaux piézométriques, Diébougou.....	XXIII

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Schéma de la structure GR2M (Source : Perrin et al ,2007).....	6
Figure 2: Schéma de la structure GR4J (Source : Perrin <i>et al</i> ,2007).....	8
Figure 3: Schéma de la structure du modèle GARDENIA (Source : BRGM/RP-52832, 2003, Logiciel GARDENIA version 6.0, Guide d'utilisation).....	12
Figure 4: Schéma structurel du modèle abcd.....	14
Figure 5 : Schéma de la structure du modèle SMAP (Source : GE eau, Rapport Annuel No 2 : Décembre 2002 - Novembre 2003 (Janvier 2004)	17
Figure 6: Schéma de la structure du modèle CREC	20
Figure 7 : Zone climatique du Burkina Faso	23
Figure 8 : Représentation des bassins hydrographiques nationaux du Burkina Faso (Source DGRE)	24
Figure 9 : Localisation de la station hydrométrique sur le bassin de Wayen	28
Figure 10 : Localisation du piézomètre de lemouroudougou sur le bassin de Samandeni.....	30
Figure 11 : Représentation du rapport d'échelle "r" en fonction du niveau réservoir souterrain ..	35
Figure 12: Simulation des débits à la station de Diarabakoko entre Janv1971 et Mai 1998, NSE(%)=62.7	37
Figure 13: Comparaison piézométrie observée et piézométrie simulée sur Diarabakoko.....	37
Figure 14 : Simulation des débits à la station de Folonzo entre Janv1971 et Dec 2003, NSE(%)=58	39
Figure 15 : Comparaison piézométrie observée et piézométrie simulée sur Folonzo	39
Figure 16: Localisation des stations piézométriques et hydrométriques sur le bassin de Diarabakoko	II
Figure 17: Localisation des stations piézométriques et hydrométriques sur le bassin de Folonzo II	
Figure 18: Localisation des stations piézométriques et hydrométriques sur le bassin de Nwokuy	III
Figure 19: Localisation des stations piézométriques et hydrométriques sur le bassin de Niagho.III	
Figure 20: Localisation des stations piézométriques et hydrométriques sur le bassin de Wayen IV	
Figure 21: Localisation des stations piézométriques et hydrométriques sur le bassin de Samandeni	IV
Figure 22 : Localisation des stations piézométriques et hydrométriques sur le bassin de Diebouougou	

.....	V
Figure 23: Localisation des stations piézométriques et hydrométriques sur le bassin de Yakala ..	V
Figure 24: Simulation des débits à la station de Diarabakoko entre Janv1971 et Mai 1998, NSE(%)=62.7	VII
Figure 25: Comparaison piézométrie observée et piézométrie simulée sur Dirabakoko	VII
Figure 26 : Simulation des débits à la station de Diebougou entre Janv1971 et Avr 2005, NSE(%)=11.4	VII
Figure 27 : Comparaison piézométrie observée et piézométrie simulée sur Diebougou	VIII
Figure 29: Comparaison piézométrie observée et piézométrie simulée sur Folonzo	VIII
Figure 31: Comparaison piézométrie observée et piézométrie simulée sur Niagho	IX
Figure 33: Comparaison piézométrie observée et piézométrie simulée sur Nwokuy	IX
Figure 34: Simulation des débits à la station de Samadeni Janv1971 – Déc. 2005, NSE(%)=41.3	X
Figure 36: Simulation des débits à la station de Wayen Janv1971 – Déc. 2005, NSE(%)=58.3 ...	X
Figure 38: Simulation des débits à la station de Yakala Janv1971 – Déc. 2001, NSE(%)= 74.3	XI
Figure 39 : Comparaison piézométrie observée et simulée sur Yakala.....	XI
Figure 40 : Simulation des débits à la station de Diarabakoko entre Janv1971 et Dec 1998, NSE(%)=72.7	XI
Figure 42 : Simulation des débits à la station de Folonzo	XII
Figure 44 : Simulation des débits à la station de Niagho	XII
Figure 45: Comparaison piézométrie observée et simulée sur Niagho	XIII
Figure 46: Simulation des débits sur Nwokuy.....	XIII
Figure 48 : Simulation des débits sur Samandeni.....	XIV
Figure 49 : Comparaison piézométrie observée et simulée sur Samandeni	XIV
Figure 50 : Simulation des débits sur Wayen	XIV
Figure 51 : Comparaison piézométrie observée et simulée sur Wayen.....	XIV
Figure 52 : Simulation des débits sur Yakala	XV
Figure 53 : Comparaison piézométrie observée et simulée sur Yakala.....	XV
Figure 54: Simulation des débits à la station de Diarabakoko entre Janv1971 et Dec 1998, NSE(%)=70.3	XV
Figure 55 : Comparaison piézométrie observée et piézométrie simulée sur Diarabakoko.....	XVI
Figure 56 : Simulation des débits à la station de Diebougou entre Janv1971 et Dec 2005,	

NSE(%)=41.3	XVI
Figure 57 : Simulation des débits à la station de folonzo	XVI
Figure 58 : Comparaison piézométrie observée et simulée sur Folonzo	XVI
Figure 60 : Comparaison piézométrie observée et simulée sur Niagho	XVII
Figure 61: Simulation des débits à la station de Nwokuy	XVII
Figure 62 : Comparaison piézométrie observée et simulée sur Nwokuy	XVIII
Figure 63 : Simulation des débits à la station de Samandeni	XVIII
Figure 65 : Simulation des debits à la station de Wayen.....	XVIII
Figure 66 : Comparaison piézométrie observée et simulée sur Wayen.....	XIX
Figure 68 : Comparaison piézométrie observée et simulée sur Yakala.....	XIX
Figure 69 : Précipitations mensuelles sur le bassin de Diarabakoko, Période 1991 - 1994, fluctuation mensuelle du niveau de la nappe	XXIV
Figure 70 : Précipitations mensuelles sur le bassin de Diebouougou, Période 1991 - 1996, fluctuation mensuelle du niveau de la nappe	XXIV
Figure 71 : Précipitations mensuelles sur le bassin de Folonzo, Période 1985 - 1988, fluctuation mensuelle du niveau de la nappe	XXIV
Figure 72 : Précipitations mensuelles sur le bassin de Niagho, Période 1988 - 1993, fluctuation mensuelle du niveau de la nappe	XXV
Figure 74 : Précipitations mensuelles sur le bassin de Samandeni, Période 1990 - 1993, fluctuation mensuelle du niveau de la nappe	XXV
Figure 75 : Précipitations mensuelles sur le bassin de Wayen, Période 1994 - 1996, fluctuation mensuelle du niveau de la nappe	XXVI
Figure 76 : Précipitations mensuelles sur le bassin de Yakala, Période 1990 - 1993, fluctuation mensuelle du niveau de la nappe	XXVI
Figure 77 : Comparaison de l'évolution de la piézométrie entre les modèles mensuels, bassin de Diarabakoko.....	XXVII
Figure 78 : Comparaison de l'évolution de la piézométrie entre les modèles mensuels, bassin de Folonzo	XXVII
Figure 79 : Comparaison de l'évolution de la piézométrie entre les modèles mensuels, bassin de Nwokuy	XXVII
Figure 80 : Comparaison de l'évolution de la piézométrie entre les modèles mensuels, bassin de Niagho	XXVIII

Figure 82 : Comparaison de l'évolution de la piézométrie entre les modèles mensuels, bassin de Wayen	XXVIII
Figure 83 : Comparaison de l'évolution de la piézométrie entre les modèles mensuels, bassin de Yakala	XXIX
Figure 84 : Comparaison de l'évolution de la piézométrie entre les modèles mensuels, bassin de Diebougou	XXIX

Introduction Générale

I. INTRODUCTION

I.1. Contexte de l'étude

La vie ou la survie des êtres vivants, et a fortiori de l'homme, est très fortement liée à la présence ou non de l'eau. Très vite, l'être humain a cherché comment tirer profit au maximum de la présence de cette ressource indispensable et à réduire les inconvénients liés à son absence. Il s'est alors posé une problématique concernant la gestion de la « **ressource eau** » de manière à pouvoir disposer à volonté de ses avantages, à la fois quantitativement et qualitativement, temporellement et géographiquement. La « gestion de l'eau » est d'autant plus importante dans les zones tropicales sèches à humides. En Afrique de l'ouest, compte tenue de la baisse de la pluviométrie (Paturel *et al*, 1996) induisant une forte variabilité de la relation pluie-débit, cette « gestion de l'eau » apparaît comme une nécessité.

I.2. Problématique

La forte volonté de gestion de l'eau a obligé les hydrologues à élaborer des modèles hydrologiques qui permettent d'établir une relation entre la pluie et le débit observé à l'exutoire d'un bassin. Un modèle hydrologique est une représentation totale ou partielle du cycle de l'eau par des systèmes ne prenant en compte que les aspects les plus pertinents. Il existe plusieurs modèles que l'on peut classer en fonction de leurs objectifs. La plupart de ces modèles représente le fonctionnement hydrologique (cycle de l'eau) du bassin versant sans tenir compte des échanges avec les eaux souterraines. Ces échanges vers les eaux souterraines souvent considérés comme des pertes malgré leur importance sont purement négligés car les hydrologues estiment que seul une bonne évaluation ou quantification de l'évapotranspiration potentielle sur le bassin versant pourrait donner une bonne représentation du modèle, (Le Moine N., 2008). Cette négligence influe sur les équations de mise en relation de la pluie et du débit dans ce cycle de l'eau. Cependant, certains modèles pluie-débit font intervenir des échanges souterrains mais qui se limitent à des transferts entre un réservoir sol et un réservoir eau souterraine et n'introduisent aucune modification dans le bilan hydrologique. Ces modèles qui introduisent ces échanges dans le bilan sont très rares.

Cette dernière catégorie de modèle permet de voir l'évolution des eaux souterraines en introduisant les transferts d'eau du réservoir sol au réservoir souterrain. Cependant ces échanges souterrains ont-ils vraiment une réelle influence sur la ressource en eau qui pourrait être quantifié

sur les bassins versants à l'exutoire ? Ont-ils une certaine réalité ?

Afin de pouvoir donner une approche de solution à cette problématique, l'étude se portera sur les bassins hydrographiques du Burkina Faso où la ressource souterraine est un facteur de développement socio-économique.

I.3. Les étapes du travail

La méthodologie suivie consiste à identifier, à reproduire sur support informatique (Excel) et à analyser des résultats des modèles hydrologiques.

La première partie de ce mémoire est consacrée à une revue bibliographique sur les modèles hydrologiques.

La seconde partie présente le cadre du travail c'est-à-dire la zone d'étude et les modèles utilisés.

La troisième partie est consacrée à l'analyse des résultats obtenus à l'aide des modèles après comparaison avec l'évolution de la nappe au travers des données piézométriques ; ce qui permet une compréhension plus précise de l'influence des échanges sur les eaux souterraines des modèles prenant en compte les échanges eaux de surface-eaux souterraines.

Enfin une conclusion et des perspectives pour d'autres études sur ces phénomènes d'échanges termineront ce document.

II. OBJECTIFS DE L'ETUDE

II.1. Objectif général

L'objectif de ce travail est de ressortir quelques-uns des modèles hydrologiques prenant en compte les échanges eaux de surface-eaux souterraines, de comparer l'évolution des eaux souterraines selon ces modèles.

II.2. Objectifs spécifiques

Dans le cadre de ce travail, on cherche précisément à :

- Reproduire sous Excel des modèles simples prenant en compte un réservoir souterrain dans leur bilan hydrique,
- Comparer l'évolution de l'eau du réservoir souterrain d'un modèle avec l'évolution piézométrique observée sur chaque bassin. Cette comparaison se fera à travers les données du réseau de piézomètres présentes, mis en place par la Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE) depuis les années 80 afin de suivre l'évolution du niveau d'eau souterraine

des aquifères. (Une description du réseau piézométrique est présentée un peu plus loin, cf. Matériel et Méthode).

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

I. LES MODELES HYDROLOGIQUES

Les modèles hydrologiques, ou modèles pluie-débit, sont des outils numériques ou des traductions dans un langage de programmation (Ambroise, 1999) de représentation de la relation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant. Ils permettent de transformer des séries temporelles décrivant des séries de précipitations et de températures d'un bassin versant donné, en une série de débit. Il existe, dans la littérature, de nombreux modèles hydrologiques de bassins versants ayant chacun sa spécificité et son domaine d'application. Différents auteurs ont proposé une classification des modèles hydrologiques. Gnouma (2006) et Refsgaard & Storm (1996), classent les modèles hydrologiques en trois catégories : les modèles empiriques, les modèles conceptuels et les modèles distribués à base physique. Pour Refsgaard (1997), les modèles hydrologiques peuvent aussi être classés selon leur description des processus physiques en tant que modèles conceptuels ou physiques et selon la description spatiale de ces processus au niveau du bassin versant en tant que modèles globaux ou distribués. Quant à Chocat (1997), il classe les modèles hydrologiques d'une part, par type d'utilisation (modèles cognitifs, prévisionnels, décisionnels et normatifs) et d'autre part, par type d'approche : physique / analogique / symbolique, axiomatique / heuristique, déterministe / probabiliste (stochastique), microscopique (réductionniste) / macroscopique (holistique, conceptuelle), empirique / théorique et spéculatif / pragmatique.

I.1. Représentation de l'espace

Selon la description des processus hydrologiques dans le modèle et sa liaison avec les caractéristiques du bassin versant, le modèle peut être global ou distribué, déterministe ou stochastique ou mixte.

Dans un modèle global ou « boîte noire » le bassin est considéré comme une entité. Des relations empiriques (issues de l'expérience) relient les entrées et les sorties. Il n'est fait référence à aucune loi physique dans cette relation. Selon Gnouma (2006), les équations sont souvent des équations différentielles ordinaires qui ne prennent pas en compte la variabilité spatiale des processus, des entrées, des conditions aux limites et les caractéristiques géographiques du bassin versant. Dans

de nombreux modèles globaux, les processus sont décrits sous forme d'équations simplifiées ou d'équations issues de raisonnements empiriques (Singh, 1995). Parmi les modèles globaux qui existent dans la littérature on peut citer : les modèles de la classe GR, le modèle GARDENIA et le modèle ABCD.

I.1.1. Les modèles GR

Les modèles GR opèrent une triple globalisation (triple considération de moyenne) du bassin versant (Perrin et al. 2007) :

- Au niveau des processus : les modèles GR proposent des relations comportementales simples à l'échelle du bassin, mises au point empiriquement et sans liens directs avec la physique des processus à petite échelle et pouvant représenter une moyenne de plusieurs processus.
- Au niveau de l'espace : les modèles GR sont globaux, c'est-à-dire que, tout en reconnaissant l'extraordinaire hétérogénéité de tout bassin versant, ils considèrent le bassin versant comme un tout. Les tentatives de distribution progressive n'ont, jusqu'à présent, pas abouti à des résultats intéressants. C'est le comportement de la moyenne spatiale qui est étudié en priorité;
- Au niveau du temps : les modèles GR ont été développés pour des pas de temps de fonctionnement spécifiques : annuel (GR1A), mensuel (GR2M), journalier (GR4J) et horaire (GR3H). Les différents modèles travaillent donc sur des moyennes temporelles.

La spécificité du pas de temps, bien que souvent négligée, est importante considérant qu'une même structure de modèle n'est pas uniformément performante à tous les pas de temps. Globalement, les structures sont d'autant plus simples que le pas de temps est long (Perrin *et al.*, 2007).

Ces modèles n'ont besoin pour fonctionner que de données continues de pluies et d'évapotranspiration potentielle, cette dernière pouvant être une courbe moyenne interannuelle (Oudin *et al.*, 2005). Les modèles GR ont un faible nombre de paramètres, ce qui permet de limiter des problèmes de surparamétrisation et leur confère une bonne robustesse (Perrin *et al.*, 2001). Les paramètres doivent être déterminés par calage, en minimisant l'erreur du modèle sur une série de débits observés. Si les données de débit ne sont pas disponibles pour le calage, l'estimation des paramètres peut se faire par des formules régionales liant les valeurs des paramètres à des descripteurs physiques du bassin, par l'utilisation de modèles calés sur des bassins voisins, ou

mieux encore par l'exploitation de quelques mesures ponctuelles en périodes de hautes eaux (Rojas-Serna, 2005). Cependant, leur utilisation conduit souvent à des erreurs beaucoup plus fortes que lorsque l'on peut réaliser un véritable calage du modèle.

I.1.1.1. Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M (Mouelhi et al. 2006)

Le modèle GR2M (modèle du Génie Rural à 2 paramètres au pas de temps Mensuel) est un modèle pluie-débit global à deux paramètres. Sa structure, bien qu'empirique, l'apparente aux modèles conceptuels à réservoirs, avec une procédure de suivi de l'état d'humidité du bassin qui semble être le meilleur moyen de tenir compte des conditions antérieures et d'assurer un fonctionnement en continu du modèle. Sa structure associe un réservoir de production et un réservoir de routage ainsi qu'une ouverture sur un extérieur autre que le milieu atmosphérique. Ces trois fonctions permettent de simuler le comportement hydrologique du bassin (Perrin *et al*, 2007).

➤ Description mathématique

Un schéma de la structure est donné à la figure 1. P_k est la pluie mensuelle du mois k et E l'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même mois calendaire.

Les équations qui régissent le modèle sont les suivantes:

✓ Production

La fonction de production du modèle repose sur un réservoir de suivi d'humidité du sol. Une partie P_s de la pluie P_k va être ajoutée au contenu S_k dans le réservoir en début de pas de temps :

$$P_s = \frac{X_1 \left(1 - \left(\frac{S_k}{X_1} \right)^2 \right) \tanh \left(\frac{P_k}{X_1} \right)}{1 + \frac{S}{X_1} \tanh \left(\frac{P_k}{X_1} \right)}$$

Le paramètre X_1 , capacité du réservoir, est positif et exprimé en mm. La pluie en excès, P_1 , est donnée par :

$$P_1 = P - P'_s$$

Et le contenu du réservoir est actualisé :

$$S' = S_k + P_s$$

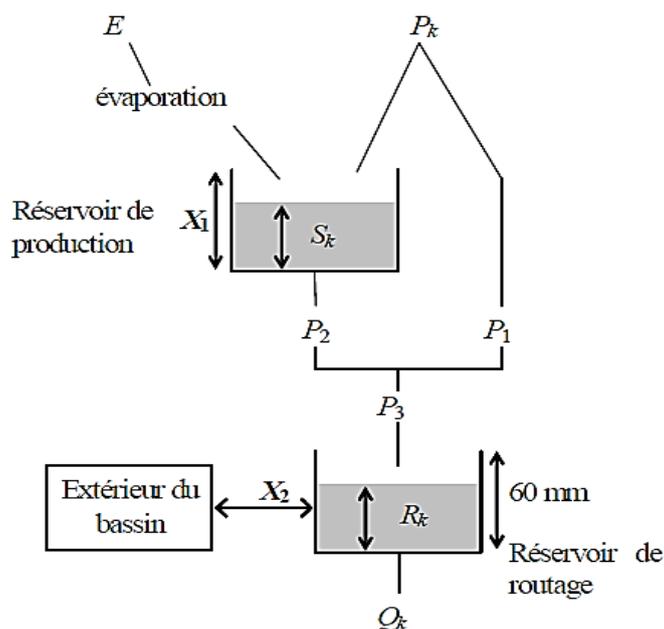


Figure 1: Schéma de la structure GR2M (Source : Perrin et al ,2007)

Du fait de l'évaporation, une quantité E_s s'échappe du réservoir :

$$E_s = \frac{S' \left(2 - \frac{S'}{X_1} \right) \tanh \left(\frac{E}{X_1} \right)}{1 + \left(1 - \frac{S'}{X_1} \right) \tanh \left(\frac{E}{X_1} \right)}$$

E est l'évapotranspiration potentielle moyenne du mois calendaire considéré. Le niveau S' devient S'' :

$$S'' = S' - E_s$$

✓ Percolation

Le réservoir de suivi d'humidité du sol se vidange ensuite selon une percolation P_2 :

$$P_2 = S'' \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{S''}{X_1} \right)^3 \right]^{-1/3} \right\}$$

Et son niveau S_{k+1} , prêt pour les calculs du mois suivant, est alors donné par :

$$S_{k+1} = S'' - P_2$$

✓ Routage et échange avec l'extérieur non atmosphérique

La quantité d'eau totale P_3 qui atteint le réservoir de routage est donnée par :

$$P_3 = P_1 + P_2$$

Le niveau R_k dans le réservoir devient alors R' :

$$R' = R_k + P_3$$

Un terme d'échange en eau souterrain F a été imposé par les données des nombreux bassins utilisés. Ignorer cette ouverture sur l'extérieur non atmosphérique conduit à une baisse considérable de l'efficacité du modèle. F est alors calculé par :

$$F = (X_2 - 1)R'$$

Le paramètre X_2 est positif et adimensionnel. D'après Le Moine (2005), le modèle gagne en performance pour X_2 supérieur à 1.

Le niveau dans le réservoir devient :

$$R'' = X_2 R'$$

Le réservoir, de capacité fixe égale à 60 mm, se vidange pour donner le débit Q_k selon l'équation suivante :

$$Q_k = \frac{R''^2}{R'' + 60}$$

Le contenu du réservoir est enfin actualisé par :

$$R_{k+1} = R'' - Q_k$$

✓ Paramètres

Le modèle a deux paramètres :

X_1 : capacité du réservoir de production [mm]

X_2 : coefficient d'échanges souterrains []

I.1.1.2. Description du modèle pluie-débit journalier GR4J

Le modèle GR4J (modèle du Génie Rural à 4 paramètres au pas de temps Journalier) (Perrin et al. 2003) est un modèle conceptuel global fonctionnant au pas de temps journalier. Le nombre de paramètres est limité à quatre, ce qui en fait un modèle parcimonieux. Ce modèle a été développé sur la base d'un grand nombre de bassins versants, incluant des bassins versants à climats contrastés, ce qui en fait un bon candidat pour évaluer l'impact du changement climatique. En revanche, comme tous les modèles conceptuels, le jeu de paramètres est susceptible de dépendre de la période de calage (longueur et caractéristiques climatiques). Les simulations sont donc soumises, entre autres, aux incertitudes liées au calage des paramètres. La Figure 2 indique le schéma conceptuel du modèle et les quatre paramètres calés. Classiquement pour ce type de modèles, on peut distinguer la fonction de production, qui permet de calculer la pluie efficace à

partir des données journalières de pluie et d'évapotranspiration potentielle grâce à un premier réservoir ; et la fonction de transfert qui permet de transformer la pluie efficace en débit. Cette fonction de transfert est composée de deux branches qui se vidangent de manière différente : l'une permet de représenter les écoulements rapides (branche directe), et l'autre est à vidange lente car transitant via un réservoir linéaire. Le modèle GR4J a certaines fonctions communes avec le modèle GR2M (par exemple la fonction de production liée au réservoir sol). Son module de routage est cependant plus sophistiqué qu'au pas de temps mensuel.

➤ **Description mathématique**

Un schéma de la structure est donné à la Figure 2. P_k est la pluie journalière du jour k et E l'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même jour calendaire.

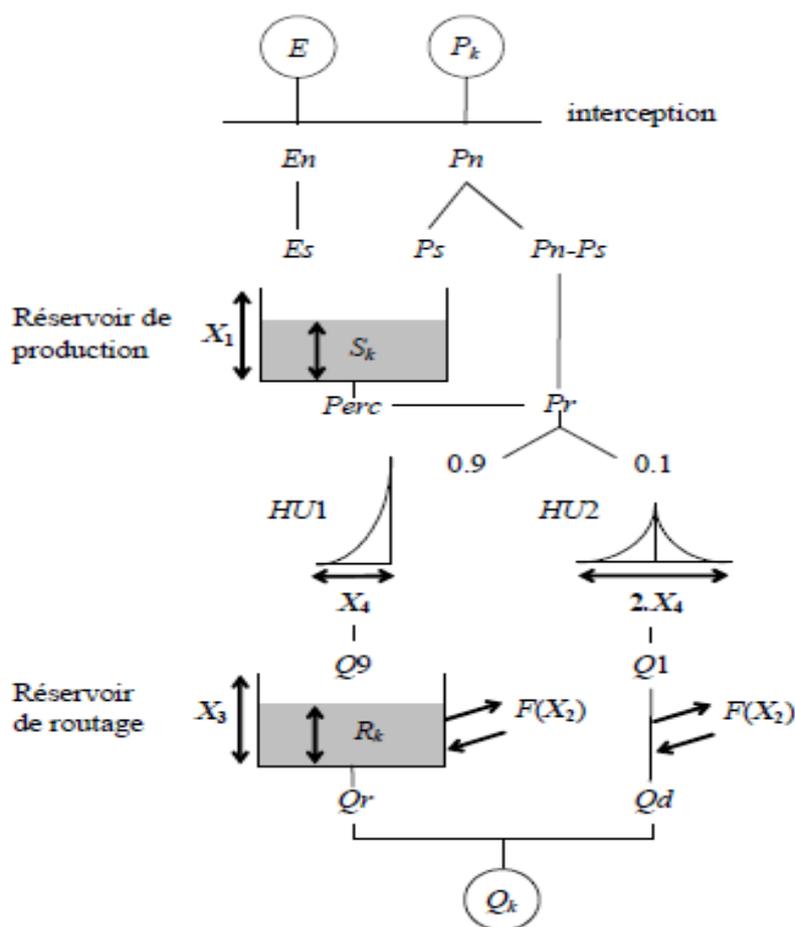


Figure 2: Schéma de la structure GR4J (Source : Perrin *et al* ,2007)

✓ Neutralisation

La première opération est la neutralisation de P_k par E pour déterminer une pluie nette P_n et une

évapotranspiration nette E_n calculée par :

Si $P_k \geq E$, alors $P_n = P_k - E$ et $E_n = 0$

Si $P_k < E$, alors $P_n = 0$ et $E_n = E - P_k$

✓ Fonction de rendement

Dans le cas où P_n est différente de zéro, une partie P_s de P_n alimente le réservoir de production et est calculée par :

$$P_s = \frac{X_1 \left(1 - \left(\frac{S_k}{X_1} \right)^2 \right) \tanh \left(\frac{P_n}{X_1} \right)}{1 + \frac{S_k}{X_1} \tanh \left(\frac{P_n}{X_1} \right)}$$

où X_1 (mm) est la capacité maximum du réservoir de production et S_k le contenu du réservoir de production au début du jour k .

Dans le cas contraire, lorsque E_n est différent de zéro, une quantité d'évaporation E_s est retirée du réservoir de production. Elle est donnée par :

$$E_s = \frac{S_k \left(2 - \frac{S_k}{X_1} \right) \tanh \left(\frac{E_n}{X_1} \right)}{1 + \left(1 - \frac{S_k}{X_1} \right) \tanh \left(\frac{E_n}{X_1} \right)}$$

Le contenu du réservoir qui résulte de ces opérations est donnée par :

$$S' = S_k + P_s - E_s$$

✓ Percolation

Une percolation P_{erc} issue du réservoir de production est alors calculée par l'équation suivante :

$$P_{erc} = S' \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{4 S'}{9 X_1} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\}$$

Par la suite, le contenu du réservoir devient :

$$S_{k+1} = S' - P_{erc}$$

et la quantité d'eau P_r qui atteint finalement la partie routage du modèle est donnée par :

$$P_r = P_{erc} + (P_n - P_s)$$

✓ Hydrogrammes unitaires

P_r est divisé en deux composantes d'écoulement, 90 % étant routés par un hydrogramme unitaire HU1 et un réservoir de routage et 10 % par un hydrogramme unitaire symétrique HU2. HU1 et HU2 dépendent du même paramètre X_4 , temps de base de HU1 exprimé en jours.

Les ordonnées des hydrogrammes sont calculées à partir des courbes en S notées respectivement SH1 et SH2, qui correspondent aux fonctions cumulées de l'hydrogramme. SH1 est défini en fonction du temps par:

$$\text{Pour } t \leq 0, \quad SH1(t) = 0$$

$$\text{Pour } 0 < t < X_4 \quad SH1(t) = \left(\frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}}$$

$$\text{Pour } t \geq X_4 \quad SH1(t) = 1$$

SH2 est défini de façon similaire par :

$$\text{Pour } t \leq 0, \quad SH2(t) = 0$$

$$\text{Pour } 0 < t \leq X_4 \quad SH2(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}}$$

$$\text{Pour } X_4 < t \leq 2X_4 \quad SH2(t) = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}}$$

$$\text{Pour } t \geq 2X_4 \quad SH2(t) = 1$$

Les ordonnées de HU1 et HU2 sont alors calculées par :

$$UH1(j) = SH1(j) - SH1(j - 1)$$

$$UH2(j) = SH2(j) - SH2(j - 1)$$

Où j est un entier.

A chaque pas de temps k, les sorties Q9 et Q1 des deux hydrogrammes correspondent à la convolution des pluies antérieures par la clé de répartition donnée par l'hydrogramme discrétisé et sont calculées par :

$$Q9(k) = 0,9 \sum_{j=1}^l UH1(j) P_r(k - j + 1)$$

$$Q1(k) = 0,1 \sum_{j=1}^m UH2(j) P_r(k - j + 1)$$

Où $l = \text{int}(X_4) + 1$ et $m = \text{int}(2X_4) + 1$ avec $\text{int}(\cdot)$ désignant la partie entière.

✓ Fonction d'échange avec l'extérieur non atmosphérique

Un échange souterrain en eau est calculé par :

$$F = X_2 \left(\frac{R_k}{X_3}\right)^{\frac{7}{2}}$$

où R_k est le niveau dans le réservoir en début de pas de temps, X_3 la capacité à un jour du réservoir et X_2 le coefficient d'échange en eau qui peut être positif dans le cas d'apports, négatif dans le cas

de pertes vers des nappes profondes ou nul. En fait, l'interprétation physique de cette fonction d'échange n'est pas directe.

- ✓ Réservoir de routage

Le niveau dans le réservoir de routage est modifié en ajoutant la sortie Q_9 de l'hydrogramme HU1 et F :

$$R' = \max(0; R_k + Q_9(k) + F)$$

Il se vidange ensuite en une sortie Q_r donnée par :

$$Q_r = R' \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R'}{X_3} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\}$$

Le niveau dans le réservoir devient :

$$R_{k+1} = R' - Q_r$$

- ✓ Écoulement total

La sortie Q_1 de l'hydrogramme HU2 est soumise au même échange pour donner la composante d'écoulement Q_d :

$$Q_d = \max(0; Q_1(k) + F)$$

Le débit total Q est alors donné par :

$$Q_k = Q_r + Q_d$$

- ✓ Paramètres

Le modèle GR4J ne comporte que quatre paramètres à caler :

X1 : capacité du réservoir de production [mm]

X2: coefficient d'échanges souterrains []

X3 : capacité à un jour du réservoir de routage [mm]

X4 : temps de base de l'hydrogramme unitaire HU1 [j]

I.1.2. Le modèle GARDÉNIA

Le modèle GARDÉNIA (Global A Réservoirs pour la simulation de DÉbits et de Niveaux Aquifères) (Thiéry, 2003) est un modèle hydrométéorologique global au pas de temps journalier qui simule les principaux mécanismes du cycle de l'eau par une succession de réservoir, depuis les précipitations sur un bassin versant jusqu'au débit à l'exutoire ou au niveau aquifère en un point. Ce modèle est global, car il considère des "entrées" moyennes (une "lame d'eau" sur le bassin et

une évapotranspiration potentielle) et un point de calcul unique qui est le débit à l'exutoire et/ou le niveau piézométrique en un point de la nappe sous-jacente. Le cycle de l'eau est représenté par une succession de réservoirs (Figure 3).

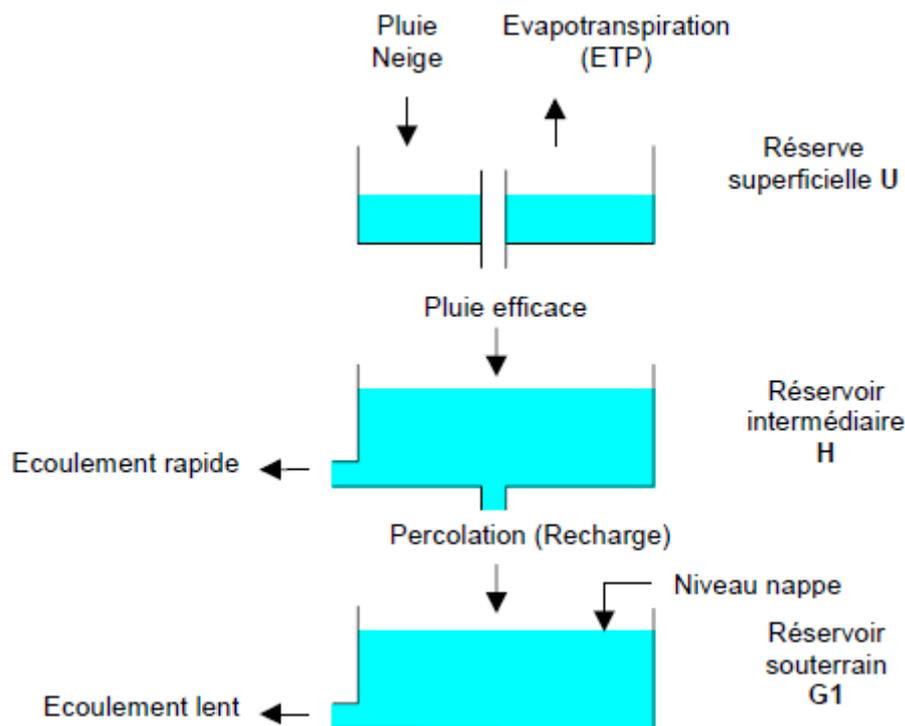


Figure 3: Schéma de la structure du modèle GARDENIA (Source : BRGM/RP-52832, 2003, Logiciel GARDENIA version 6.0, Guide d'utilisation)

Le premier réservoir, représentant la zone racinaire, permet de calculer, en fonction de son état de saturation, l'évapotranspiration réelle à partir de la pluie et de l'évapotranspiration potentielle et donc l'éventuel excédent de pluie. Le deuxième réservoir non linéaire, représentant la zone non saturée, permet de décomposer l'excédent de pluie en deux composantes : une composante rapide identifiée au ruissellement, et une composante lente identifiée à l'infiltration. Il est responsable du routing de l'infiltration en recharge de l'aquifère sous-jacent. Le troisième réservoir linéaire à vidange exponentielle représente le tarissement de la composante souterraine du débit d'un cours d'eau et son niveau représente le niveau piézométrique en un point représentatif de la nappe. L'hypothèse est que, au moins localement, les variations de niveaux piézométriques sont homothétiques. Le modèle GARDÉNIA intègre également un module de fonte de la neige s'il en existe. Des effets anthropiques comme des prélèvements ou des injections peuvent enfin être pris en compte explicitement, de manière analogique par le modèle.

Le modèle GARDÉNIA peut fonctionner à des pas de temps journalier, mais également à des

pas de temps plus fins, par exemple horaires ou même de quelques minutes, quand il est nécessaire de simuler des crues résultant de précipitations cycloniques par exemple.

L'originalité du modèle GARDÉNIA est, outre la prise en compte de pompages, la possibilité de simuler les niveaux aquifères et surtout de pouvoir simuler simultanément, avec le même jeu de paramètres le débit à l'exutoire du bassin et un niveau piézométrique représentatif de bassin. Cette fonctionnalité renforce la robustesse du modèle puisque les paramètres gérant les écoulements souterrains peuvent être calibrés explicitement sur les variations piézométriques ce qui limite les incertitudes liées à une mauvaise identification des deux composantes de l'écoulement résultant d'un non unicité de la calibration.

Le modèle GARDÉNIA permet de prendre en compte une fonction d'exportation, ou même une importation, de débit souterrain vers les bassins voisins, ou vers la mer. Cette fonction d'échange de débit souterrain a été améliorée pour dépendre de l'état du stock en eau souterraine dans le bassin pour permettre des résultats satisfaisants y compris avec des scénarios de changement climatique correspondant à des diminutions marquées de l'alimentation des bassins. Il faut noter que les paramètres hydrologiques pour ce modèle sont généralement au nombre de 4 à 6 et au maximum au nombre de 8 dans le cas général (15 si l'on tient compte des précipitations sous forme de neige).

I.1.3. Le modèle abcd

Le modèle "abcd" est un modèle au pas de temps mensuel. En interne, le modèle représente le stockage de l'humidité du sol, le stockage des eaux souterraines, l'écoulement direct, les eaux souterraines à l'exutoire et l'évapotranspiration réelle. C'est un modèle à quatre paramètres comme le nom l'indique : a, b, c, d, et s'articule autour de deux réservoirs : un réservoir sol de capacité maximale et un réservoir souterrain (Figure 4). Il a été initialement introduit par Thomas (1981) et Thomas et al. (1983) comme un modèle approprié pour effectuer l'évaluation des ressources en eau d'une région en utilisant une échelle de temps mensuelle. D'après Fernandez W, Vogel R.M. et Sankarasubramanian A. (2000) ; le modèle "abcd" a été comparé avec de nombreux modèles mensuels du bilan hydrique conduisant à sa recommandation par Alley (1984, 1985). Vandewiele et al. (1992) ont aussi constaté que le modèle "abcd" se compare favorablement avec plusieurs autres modèles de bilans hydriques mensuels plus récents.

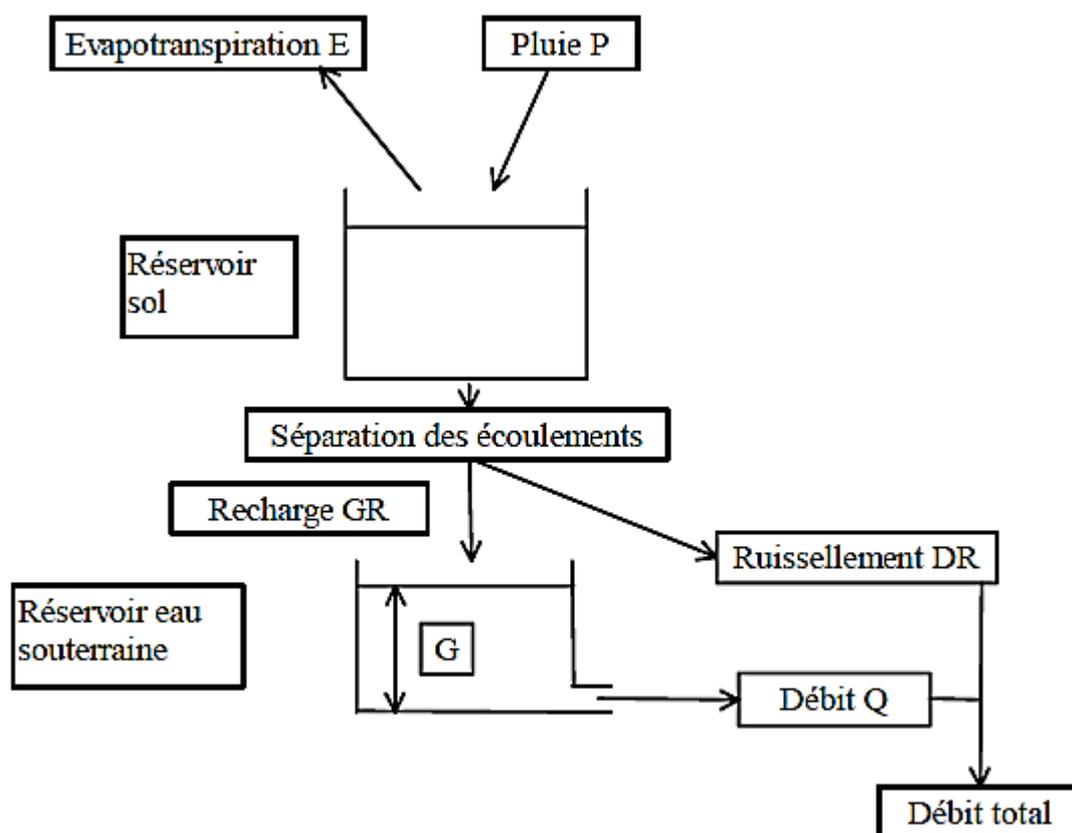


Figure 4: Schéma structurel du modèle abcd

➤ Description de la structure originale

Le modèle "abcd" définit deux variables d'état : W_i , appelée «eau disponible» et Y_i , «opportunité d'évapotranspiration ». L'eau disponible est définie comme suit :

$$W_i = P_i + S_{i-1}$$

où P_i est la précipitation durant la période i et S_{i-1} est le stockage de l'humidité du sol au début du pas de temps i . L'opportunité d'évapotranspiration est l'eau qui finira par quitter le bassin sous la forme d'évapotranspiration et est défini comme :

$$Y_i = E_i + S_i$$

Où i désigne le pas de temps, E_i représente l'évapotranspiration réelle au cours de la période i et S_i représente le stockage de l'humidité du sol à la fin du pas de temps i . L'opportunité d'évapotranspiration Y_i est considéré comme une fonction non linéaire de "l'eau disponible" W_i et se calcule par la relation suivante :

$$Y_i(W_i) = \frac{w_i + b}{2 * a} - \sqrt{\left[\frac{W_i + b}{2 * a}\right]^2 - W_i * \left(\frac{b}{a}\right)}$$

Où a et b sont des paramètres. Cette relation est une relation de lissage, qui permet d'éviter d'avoir un seuil de fonctionnement pour $W = b$. Elle assure une limite supérieure b à Y et on a toujours $Y \leq W$

✓ Humidité du sol :

Le niveau dans le réservoir sol à la fin d'un pas de temps est exprimé par :

$$S_i = Y_i * \exp(-PE_i/b)$$

où PE_i est l'évapotranspiration potentielle. La différence ($W_i - Y_i$) définit la somme de la recharge de la nappe GR et du ruissellement de surface DR , dont les proportions relatives sont déterminées par le paramètre c :

$$GR_i = c * (W_i - Y_i)$$

$$DR_i = (1 - c) * (W_i - Y_i)$$

✓ Réservoir eau-souterraine :

Le réservoir reçoit GR et se vidange en un débit Q exprimé par :

$$Q = d * (G_i + GR_i)$$

Où d est un paramètre et G le niveau du réservoir eau-souterraine dont les variations s'exprime par :

$$G_i = \frac{GR_i + G_{i-1}}{1 + d}$$

Le débit total est alors la somme du ruissellement et du débit Q .

✓ Paramètres

Le modèle comporte quatre paramètres :

a : capacité du sol à induire un ruissellement avant saturation ($0 < a \leq 1$). Des valeurs de $a < 1$ permettent d'avoir un ruissellement direct lorsque W_i est inférieur à b .

b : limite supérieure de W_i

c : fraction du débit moyen qui recharge la nappe (réservoir eau souterraine)

d : constante de vidange du réservoir eau-souterraine

En fonction du niveau de description des processus, le modèle peut être déterministe, stochastique ou mixte (Gnouma, 2006). Dans un modèle déterministe, on suppose que les variables d'entrées et les paramètres du système sont parfaitement déterminés ou déterminables. Par contre

dans un modèle stochastique, ce sont plutôt des distributions de probabilité qui sont associées à des grandeurs. La majorité des modèles sont déterministes. L'approche probabiliste est utilisée soit parce que le phénomène étudié est aléatoire soit parce qu'on cherche à représenter des permanences difficilement explicables physiquement (Chocat, 1997). On peut citer : les modèles SMAP, CREC.

I.1.4. Le modèle SMAP

Le modèle SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure) (J. Wellens & N.F. Compaoré, 2003) est un modèle au pas de temps mensuel et est constitué par des réservoirs virtuels qui simulent les phénomènes essentiels de retenue et de transfert des eaux de pluies. Deux réservoirs linéaires représentent le sol et la nappe phréatique (réservoir souterrain). Le taux de la hauteur en eau du sol est défini à chaque instant par l'expression :

$$TU = \frac{R_{SOL}}{SAT}$$

R_{SOL} Niveau du réservoir du sol [mm]

SAT Capacité de saturation du sol [mm]

Un bilan de masse est établi pour chaque pas de temps. Une fraction de l'eau précipitée passe directement comme écoulement de surface et est déduit du système, tandis qu'une partie alimentera le réservoir du sol :

$$ES = P.TU^{E2}$$

ES : Écoulement de surface [mm]

P : Précipitation [mm]

$E2$: Paramètre d'écoulement superficiel

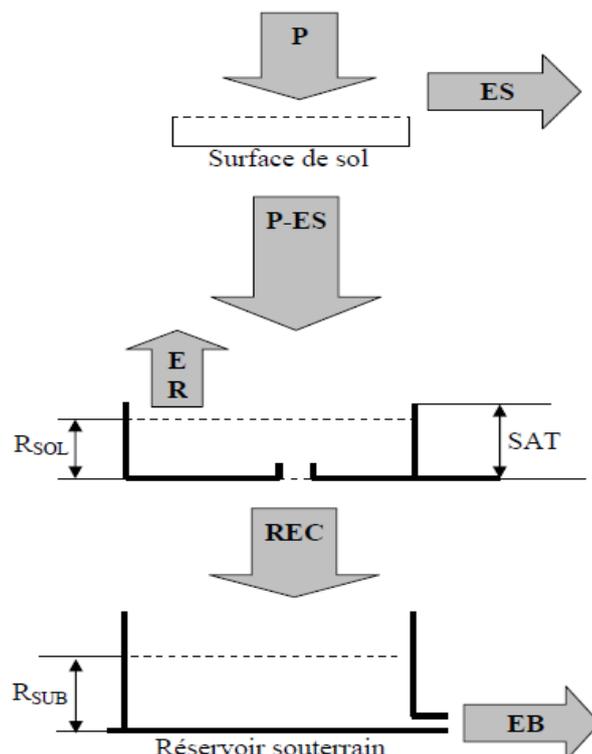


Figure 5 : Schéma de la structure du modèle SMAP (Source : GE eau, Rapport Annuel No 2 : Décembre 2002 - Novembre 2003 (Janvier 2004)

Dans le réservoir du sol, une partie de la pluie résiduelle se perd par évapotranspiration réelle selon l'équation :

$$ER = EP.TU^{E1}$$

ER : Évapotranspiration réelle [mm]

EP : Évapotranspiration potentielle [mm]

E1 : Paramètre qui contrôle l'évaporation du sol

La recharge du réservoir souterrain se déduit du niveau d'eau dans le réservoir du sol par l'équation :

$$REC = R_{SOL}.TU^4.CREC$$

REC : Recharge [mm]

CREC : Coefficient de recharge de la nappe.

La valeur de l'exposant TU est prise égale à 4 pour que la recharge s'approche de zéro quand la teneur en eau du sol s'approche de la capacité du terrain.

Dans le second réservoir linéaire, le niveau de l'eau est abaissé à un taux constant qui correspond à l'écoulement de base. L'expression suivante est utilisée :

$$EB = R_{SUB} \cdot (1 - C_K)$$

R_{SUB} : Niveau du réservoir souterrain en mm.

C_K : Constante de récession hydraulique du réservoir.

E_B : Ecoulement de base en mm.

Les équations suivantes définissent à chaque pas de temps le bilan de masse :

$$R_{SOL(i+1)} = R_{SOLi} + P - ER - ES - REC$$

$$R_{SUB(i+1)} = R_{SUBi} + REC - EB$$

Où i et $i+1$ indiquent les mois considérés et R_{SOL} et R_{SUB} les niveaux dans chaque réservoir.

De la somme des écoulements superficiels ES et de base EB , résulte le débit au point de contrôle du bassin (en mm), soit:

$$Q = ES + EB$$

Le niveau de chaque réservoir est actualisé à chaque pas de temps en fonction de l'écoulement superficiel, de l'évapotranspiration, de la recharge de la nappe phréatique et de l'écoulement de base par les algorithmes présentés ci-dessus.

Pour le calage du modèle, les données suivantes sont nécessaires : les précipitations (mm/mois), l'évapotranspiration potentielle (mm/mois) et les apports mensuels (mm³/mois).

✓ Paramètres

Le modèle SMAP comporte cinq paramètres à caler :

SAT : Capacité de saturation du réservoir du sol

$E1$: Coefficient de contrôle de l'ETP

$E2$: Coefficient de contrôle de l'écoulement

$CREC$: Coefficient de recharge de la nappe

C_K : Constante de récession du bassin

Le niveau d'eau initial dans le réservoir souterrain, R_{SUBi} est déterminé de la manière suivante :

$$R_{SUBi} = \frac{Q_{bin} \cdot T}{S \cdot (1 - C_K)}$$

S : Surface du bassin [km²]

T : Nombre de secondes dans le mois.

I.1.5. Le modèle CREC

Le modèle CREC, un modèle qui a été appliqué de nombreuses fois dans des conditions de

bassins versants très variées a montré une grande capacité d'adaptation (Guilbot, 1986). C'est un modèle au pas de temps journalier.

La version de CREC décrite ici est une version à cinq paramètres (X_1, X_2, \dots, X_5) (Combes, 1985). Il existe des versions à sept et onze paramètres permettant son application dans des conditions hydrologiques particulières. Classiquement, entre le sol recevant la pluie et l'exutoire du bassin, on définit une fonction de production et une fonction de transfert. La fonction de production tient compte de l'état d'humidité du sol par le biais du taux de remplissage d'un réservoir alimentant l'évapotranspiration et fournit la fraction de l'eau précipitée devant participer à l'écoulement. La fonction de transfert comprend un écoulement rapide et un écoulement lent à décroissance exponentielle. La figure 5 présente le schéma conceptuel du modèle CREC.

✓ La fonction de production

La fonction de production effectue un prélèvement sur la lame précipitée qui permet de respecter le caractère conservatif du système. Son élément principal est l'évapotranspiration, mais elle pourrait éventuellement prendre en compte des éléments différents. C'est le cas, par exemple, des fuites hors du bassin (fraction de la lame d'eau qui percole et ne se retrouve pas dans l'écoulement à l'exutoire du bassin) dont la prise en compte peut se faire par l'introduction de paramètres supplémentaires destinés à accroître le prélèvement effectué sur la lame précipitée, ou encore des biais systématiques dans les évaluations des précipitations, pris en compte par l'introduction d'un coefficient correcteur. Cette fonction de production est, en fait, représentée par un réservoir en cul de sac, S , soumis à un contrôle en amont (fonction de partage de la pluie) et L_i une sortie en aval modulée sur l'ETP et qui génère une ETR (qui n'a sans doute de réelle que le nom). (cf. Figure 6).

✓ La fonction de transfert

Dans le modèle CREC, la fonction de transfert est constituée d'un ensemble de deux réservoirs (H et G) à la fois en série et en parallèle grâce à la double sortie du réservoir H . (cf. figure 6).

Le réservoir H intervient à deux niveaux :

- laminage des débits permettant de rendre continue la réponse à une alimentation discontinue,

- répartition entre débit à décroissance rapide et débit à décroissance lente. Le transfert rapide se fait directement, alors que le transfert lent est régularisé par le biais d'un tarissement exponentiel (c'est le rôle du réservoir G).

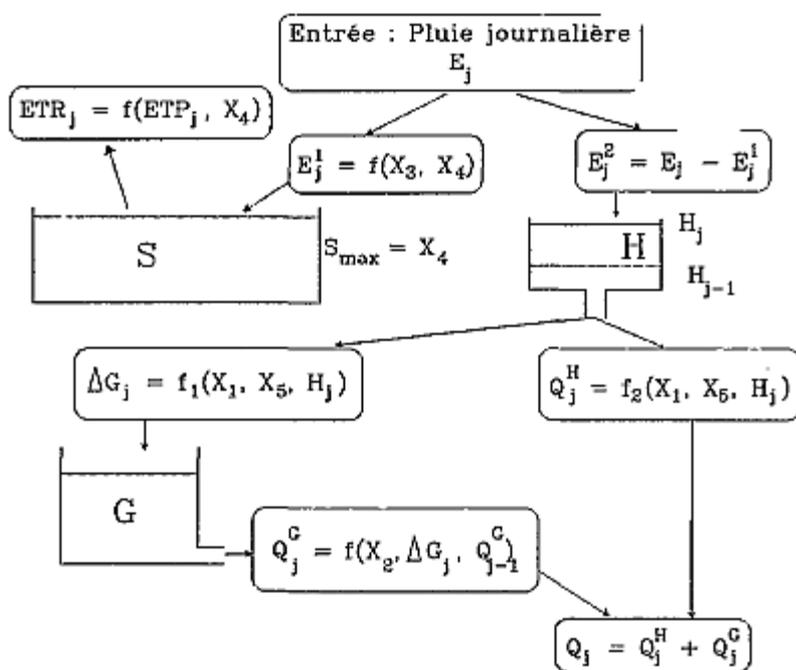


Figure 6: Schéma de la structure du modèle CREC

✓ Les paramètres

Dans le cas particulier du modèle CREC, la détermination des valeurs des paramètres s'effectue automatiquement à l'aide d'une procédure d'optimisation non linéaire minimisant un critère d'écart entre débits observés et calculés. Ces paramètres sont les suivants :

ETP : évapotranspiration potentielle,

ETR : évapotranspiration réelle,

S : fonction de production, réservoir en cul de sac,

H : fonction de transfert, réservoir à double sortie,

G : fonction de transfert, réservoir à tarissement exponentiel.

Dans la pratique, le choix d'un modèle est fortement lié non seulement aux composantes hydrologiques dont la reproduction est à travers la modélisation, mais aussi aux échelles spatio-temporelles. Étant donné les objectifs que l'on vise à atteindre dans ce mémoire, le choix s'est

porté sur les modèles : GR2M, GR4J, GARDENIA, ABCD, CREC et SMAP ce qui justifie leur description plus haut.

MATERIEL ET METHODE

I. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

I.1. Géographie et climatologie

Le Burkina Faso est un pays enclavé se situant entre les latitudes 9.5°N et 15°N et les longitudes 2°E et 5°O. Il est situé au cœur de l'Afrique de l'Ouest et a une superficie de 274 200 km² (cf. figure7). C'est un pays relativement plat qui se situe à une altitude moyenne de 400m et est constitué principalement de plateaux et de collines. Les trois quarts du pays sont situés sur une gigantesque pénéplaine appelée le "Plateau Central" qui voit s'étendre sur son ensemble de basses collines et des vallées peu profondes forgées par des rivières tout aussi peu capricieuses. Cet ensemble de cours d'eau constitue le réseau hydrographique dense du pays. Le pays est subdivisé en trois bassins principaux : celui de la Volta, de la Comoé et du Niger.

Le climat est à dominante sahélienne avec une zone plus humide au sud. Depuis la fin des années 1960, l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest dont fait partie le Burkina est touché par une sécheresse qui se caractérise par sa durée, son intensité et son extension (Ardoin-Bardin, 2004). Ainsi les précipitations annuelles ont nettement diminué. Le pays compte trois principales zones climatiques différenciées principalement par la quantité annuelle de précipitation. La zone sahélienne au nord (300-600 mm/an), la zone sub-sahélienne (ou soudano-sahélienne) au centre (600- 900 mm/an) et la zone nord soudanienne au Sud (900-1 200 mm/an). L'essentiel des ressources en eau du Burkina Faso est apporté par la pluviométrie dont le cumul annuel diminue du sud vers le nord (Boubacar, 2012). Les ressources en eaux exploitées par la population sont constituées de retenues d'eau dont le volume est estimé à 5 milliards de m³ et des nappes souterraines dont le volume est estimé à 402 milliards de m³ avec un volume renouvelable de 41 milliards de m³ (Ministère de l'environnement et de l'eau, 2001).

Les températures, elles, sont relativement homogènes sur l'ensemble du territoire avec des moyennes variant rarement de plus de 3°C entre les régions les moins chaudes et les zones les plus chaudes (Source : site service météo du Burkina Faso).

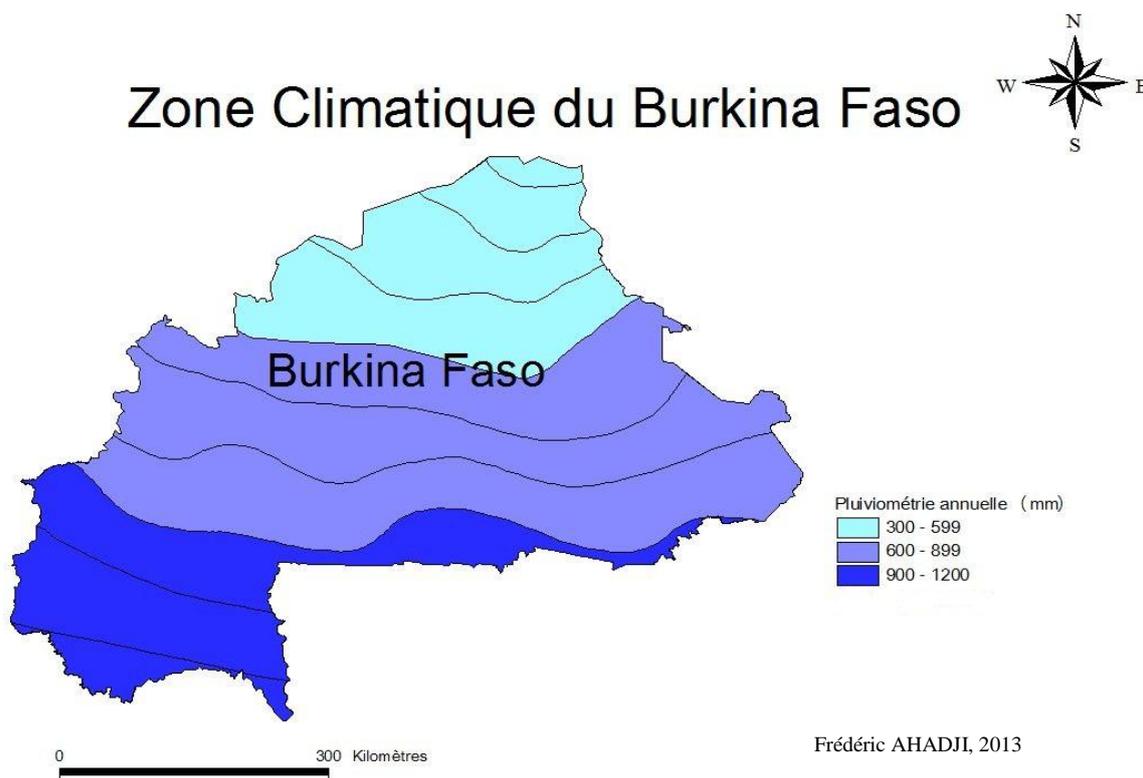


Figure 7 : Zone climatique du Burkina Faso

I.2. Caractéristiques physiques des bassins étudiés

L'étude présentée ici a pour cible des bassins versants de l'ordre de plusieurs milliers de km². Les critères de choix des bassins étudiés sont développés un peu plus loin dans le document (cf. II.2). Ces bassins sont partagés entre trois principaux bassins versants internationaux (la Volta, la Comoé et le Niger)

Le bassin de la Comoé est le plus méridional du pays. Il draine l'extrémité sud-ouest du Burkina Faso sur une superficie de 18 000 km². Cette zone reçoit le plus de précipitation. Constitués de plusieurs sous-bassins versants dans la partie burkinabè, ceux de Folonzo et Diarrabakoko seront étudiés.

Le bassin de la Volta couvre la plus grande partie du pays. De l'est à l'ouest du pays, il a une superficie de 178 000 km². Il est constitué par trois sous-bassins majeurs : ceux du Mouhoun, du Nakanbé et de la Pendjari. Les bassins étudiés font partie de deux de ces sous bassins à savoir le Mouhoun et le Nakanbé. Il s'agit des bassins de Samandeni, Nwokuy, Diebouyou, Yakala, Wayen et Niagho.

Le bassin du Niger draine le nord-est, l'est et une petite portion à l'ouest du pays sur un total de 72 000 km². Ses affluents soudano-sahéliens sont la Faga, la Sirba, la Bonsoaga, le Diamangou et la Tapoa.

Le réseau hydrographique du Burkina Faso est marqué par quatre bassins nationaux : Mouhoun, Nakanbé, Comoé et Niger (Figure 8).

Bassins Nationaux du Burkina Faso

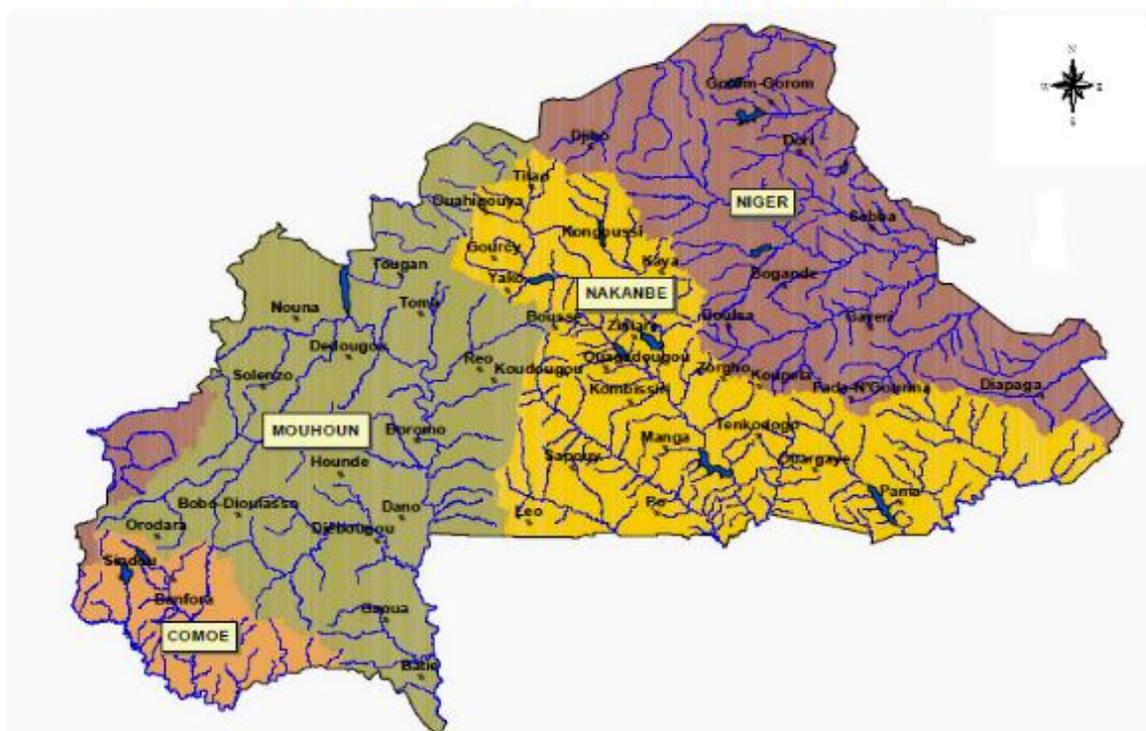


Figure 8 : Représentation des bassins hydrographiques nationaux du Burkina Faso (Source DGRE)

I.3. Géologie et hydrogéologie

I.3.1. Le bassin de la Comoé

Le bassin versant de la Comoé est situé au Sud-Ouest du Burkina Faso. Environ 20 % du bassin versant est situé sur la série sédimentaire, le reste étant sis sur le socle (Dakouré, 2003). L'ensemble sédimentaire à l'ouest du pays constitue la bordure nord-est du vaste bassin de la

Comoé. Les formations sédimentaires attribuées au Précambrien A (900-1100 millions d'années) et au Cambro-Ordovicien, sont composées de trois séries (Diello, 2007) :

- série 1 : gréseuse en général avec cependant des calcaires à stromatolithes du Précambrien supérieur,
- série 2 : débute par des tillites auxquels succèdent des calcaires dolomitiques et des pélites alternant avec des grès,
- série 3 : attribué à l'Ordovicien, elle est principalement détritique (grès, quartzites).

Le socle est un socle cristallin précambrien ou cratons ouest africains. Ces formations géologiques sont constituées principalement de granite et de grès.

Cette structure géologique permet d'avoir trois types d'aquifères superposé aussi bien dans le sédimentaire que dans la zone de socle (Dakouré, 2003). En zone de socle on distingue :

- les aquifères du milieu fissuré ;
- les aquifères de la zone altérée ;
- les aquifères des altérites.

Généralement les aquifères des altérites sont en contact hydraulique avec les aquifères des roches fracturées sous-jacentes ; ils forment le système bicouche avec la zone altérée, surtout capacitive et le milieu fissuré surtout conducteur.

En milieu sédimentaire, on a :

- la roche dure ;
- la zone altérée ;
- les latérites.

La roche dure est représentée par les grès, calcaires, silexites et schistes traversés par des réseaux de failles. Sur l'ensemble gréseux du bassin sédimentaire, les grès à galets de quartz et les grès de base s'avèrent de très bons aquifères.

Les aquifères des latérites ont une importance locale et souvent temporaire (aquifères perchés).

I.3.2. Le bassin du Mouhoun

Le bassin du Mouhoun présente à peu près les mêmes caractéristiques géologiques que celui de la Comoé. La géologie indique une formation sédimentaire du précambrien A constitué de grès, schistes, sable, argile. Ces formations contiennent des nappes dont le débit peut atteindre 20m³/h (Ouedraogo, 1994). On rencontre aussi des formations tertiaires, le continental terminal constitué d'argile et de sable. Ces formations renfermeraient une nappe continue (Archambault, 1951 et

1962 ; Defossez, 1958). En plus de ces deux types de formations, la grande partie du bassin est constitué de socle cristallin.

L'hydrogéologie montre qu'il existe deux types d'aquifères : les aquifères superficiels et les aquifères profonds des fractures et fissures.

I.3.3. Le bassin du Nakanbé

Le bassin du Nakanbé repose sur le socle cristallin précambrien. Les roches cristallines et cristalloyphylitiques de la plate-forme ouest-africaine constituent la presque totalité du sous-sol du bassin (IWACO, 1993). Ces formations géologiques sont constituées principalement d'un complexe granito-gnésique.

Le recouvrement de surface est dominé en grande partie par des plateaux latéritiques parfois très cuirassés. L'épaisseur de ces latérites varie selon la nature des formations sur lesquelles elles se reposent. Ces latérites sont particulièrement impressionnantes dans les régions où affleurent les formations birimiennes. C'est à travers ce recouvrement de latérites et d'alluvions que s'organisent les mécanismes de transfert d'eau verticaux vers les nappes. La coupe géologique montre une superposition de trois types d'aquifères (Savadogo, 1984 ; IWACO, 1993 ; Boker, 2003 ; Ouandaogo et Yameogo, 2008) :

- un aquifère supérieur formé de cuirasses ;
- un aquifère des arènes grenues et fluentes;
- un aquifère du socle fissuré ou fracturé.

Le premier aquifère est la matrice de la nappe libre exploitée à partir des puits traditionnels ou modernes à grand diamètre et est principalement alimenté par les infiltrations. Les eaux de cet aquifère sont transférées vers l'aquifère inférieur à travers les fissures. Ce transfert assure le renouvellement des eaux de la nappe profonde qui peut être captive à certains endroits.

I.3.4. Le bassin du Niger

C'est une vaste cuvette remplie de séries paléozoïques (grès et argile), au Nord, et de dépôts secondaires (grès et argilites) et tertiaires (calcaire, marnes, schistes et grès) du Continental Terminal, au Sud (Diello, 2007). La partie burkinabè est constituée d'une formation en majorité granitique.

En général, deux modes de recharge des nappes sont connus au Burkina Faso (Ministère de l'eau, 1990 ; Bazié, 1993) :

- le mode direct : l'eau de pluie s'infiltré à la verticale de l'aquifère. Cette eau parvient à la nappe par percolation à travers la zone non saturée après avoir comblé le déficit en eau du sol et l'évapotranspiration. C'est le cas des aquifères discontinus de la zone fissurée.
- le mode indirect : après le ruissellement, l'eau percole jusqu'à la nappe après la collecte dans les axes de drainage des cours d'eau (alluvions et colluvions de bas-fonds).

Du fait de la connexion entre les différents aquifères, leurs modalités d'alimentation peuvent être associées.

II. PRESENTATION DES DONNEES DE L'ETUDE

Rappelons avant de continuer que l'étude porte sur l'analyse des échanges eaux de surface - eaux souterraines de quelques modèles hydrologiques appliqués sur des bassins au Burkina Faso. Ces modèles, pour tourner, ont besoin de données climatiques (chroniques de pluies, d'ETP) et hydrologiques (débits et données piézométriques).

II.1. Données disponibles

II.1.1. Données climatiques : Chroniques de pluies et d'ETP

Les données utilisées dans cette étude, qui dérivent des observations, ont été générées à travers des procédures de spatialisation. Ces choix se justifient par rapport à la disponibilité des données. Les données concernent deux variables, la pluviométrie et l'évapotranspiration potentielle de Penmann-Monteith (ETP). Toutes les données utilisées sont au pas de temps journalier, ou agrégées au pas de temps mensuel et à la résolution spatiale de 0.5°x0.5°. Ces données, proviennent du CRU (Climate Research Unit) et ont déjà été utilisées dans le cadre de plusieurs études sur la modélisation hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale (Ardoin-Bardin, 2004 ; Held et al. 2005 ; Diello, 2007 ; Patrel *et al.*, 2010). Les données ne présentent aucune lacune.

II.1.2. Données hydrologiques

II.1.2.1. Débits

Les mesures hydrologiques de débits moyens journaliers sont des données issues de différentes stations hydrométriques (Voir Figure 9; en Annexe 1 a été reporté l'ensemble des cartes de localisation des stations hydrométriques). Ces données proviennent de la base de données de la DGRE du Burkina Faso. Elles sont gérées par le logiciel HYDRACCESS qui est un logiciel développé par l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement). On dispose pour cette étude

Analyse de quelques modèles hydrologiques comportant explicitement une prise en compte d'échange entre eaux de surface et eaux souterraines – Zoom sur le Burkina Faso

des données de débit moyen journalier pour des périodes variables d'une station à une autre (Voir Tableau 1). Les lacunes sont très importantes (supérieures à 19%) sur tous les bassins.

Tableau 1 : Périodes et pourcentage lacune des données hydrométriques

Bassins	Superficie (km ²)	Données hydrométriques			
		Période (pas de temps journalier)	Lacunes journalières	Période (pas de temps mensuel)	Lacunes mensuelles
Diarabakoko	1387,37	1961 - 1998	25.5%	1955 – 1998	28%
Diebougou	12696	1962 - 2003	40.6%	1955 - 2005	63.1%
Folonzo	8365.97	1969 – 2003	33.2%	1969 - 2001	46.8%
Niagho	31912	1964 – 1997	52.8%	1955 – 1995	51.2%
Nwokuy	15463	1961 – 2003	24.9%	1955 – 2004	38.6%
Samandeni	4454	1961 - 2003	19.8%	1955 – 2005	38.7%
Wayen	20241	1965 – 2003	24.1%	1955 – 2007	45.9%
Yakala	35110	1961 – 2001	75.8%	1955 – 2001	78%

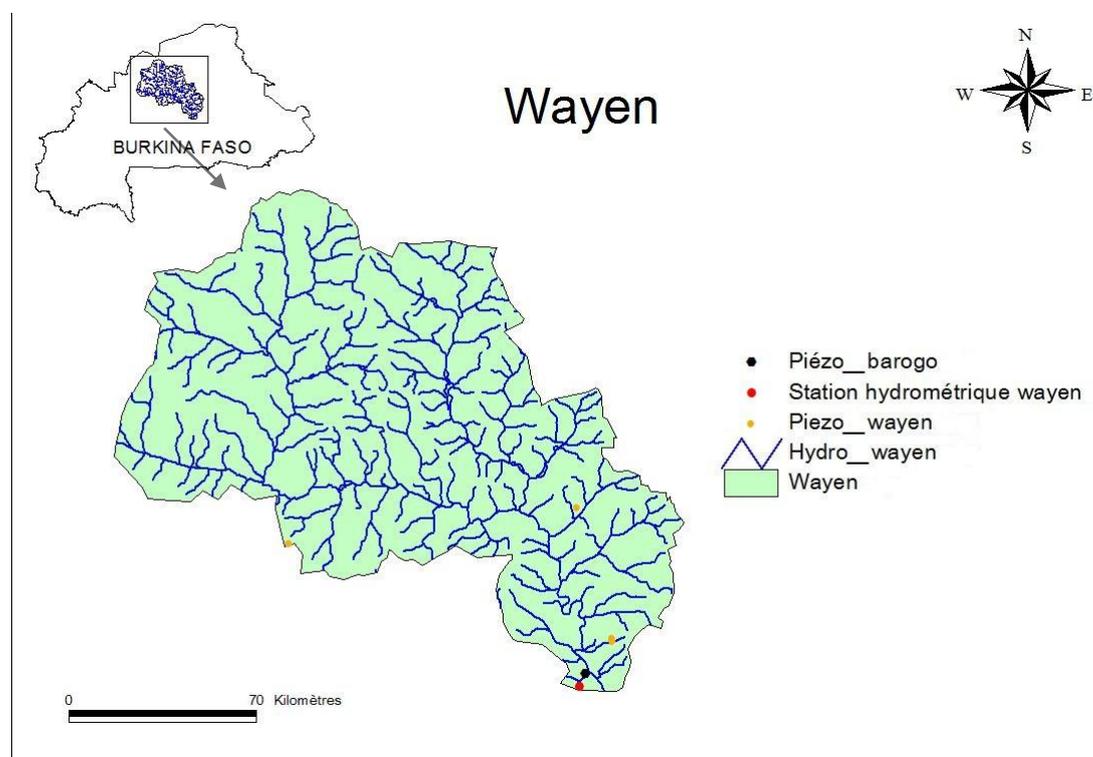


Figure 9 : Localisation de la station hydrométrique de Wayen

II.1.2.2. Données piézométriques

Le réseau de piézomètres a été mis en place par la DGRE afin de suivre l'évolution du niveau d'eau souterraine des aquifères. Ce réseau est composé de plusieurs piézomètres (cf. Annexe 1) sur tout l'ensemble des bassins étudiés. Ce sont des données issues d'observations de piézomètres de différentes campagnes piézométriques. S'agissant soit des données journalières, soit des données mensuelles, la période des données est variable d'un piézomètre à un autre (Voir Tableau 2) avec des lacunes très importantes. L'obtention de valeurs mensuelles à certains piézomètres s'est faite par une moyenne des valeurs journalières disponibles ; cela ne semble pas réhibitoire puisque la dynamique souterraine est bien plus lente que la dynamique superficielle.

Le bon emplacement des piézomètres est un élément important pour notre travail. Pour vérifier la qualité du positionnement des piézomètres, un SIG (Système d'Information Géographique) a été utilisé, Arcview3.2 ainsi que Google Earth afin de déterminer les distances qui séparaient nos piézomètres et le lit des cours d'eau proche. Nous remarquons que les piézomètres se situaient à une distance variant de 0.16 à 1.22 km des lits.

Dans les années 1980, les SIGs n'étant pas développés, pour repérer un objet sur une carte on lui attribuait souvent les coordonnées du village le plus proche ; ce qui est vraisemblablement le cas avec les piézomètres qui portent le nom de ces villages (Voir Figure 10, un exemple de localisation de piézomètre). Etant situé en zone de socle, il serait nécessaire de faire du terrain pour reconnaître l'emplacement des piézomètres et avoir une idée claire si la nappe mesurée a un quelconque lien avec le cours d'eau. Dans le cadre de ce travail, on estime que chaque piézomètre situé mesure une nappe qui effectue des échanges avec ce cours d'eau.

Tableau 2 : Périodes et pourcentage lacune des données piézométriques

Bassins	Données Piézométriques			
	Période (pas de temps journalier)	Lacunes journalières	Période (pas de temps mensuel)	Lacunes mensuelles
Diarabakoko	Pas de données		1985 - 2008	51.1%
Diebougou	Pas de données		1990 - 1996	9.3%
Folonzo	1985 - 2007	88.7%	1985 - 2007	57.8%
Niagho	1988 - 1996	79.1%	1988 - 1996	6.5%
Nwokuy	1990 - 1996	92.7%	1990 - 1996	8.2%
Samandeni	1985 - 1997	77.7%	1985 - 1997	44.7%
Wayen	1989 - 2000	92.9%	1989 - 2000	52.9%

Analyse de quelques modèles hydrologiques comportant explicitement une prise en compte d'échange entre eaux de surface et eaux souterraines – Zoom sur le Burkina Faso

Yakala	1988 - 2003	95.6%	1988 - 2003	46.5%
--------	-------------	-------	-------------	-------

Tableau 3 : Quelques données sur les piézomètres

Bassin	Nom piézomètre	Coordonnées		Lithologie	Profondeur moy (ns)
		Longitude	Latitude		
Diarabakoko	Nanfona	-0.49	11.40	Pas de données (bassin situé sur une série sédimentaire)	
Diebougou	Loba	-3.17	10.98	grès	9.80m
Folonzo	Sideradougou	-4.60	9.94	gabbro	5.01m
Niagho	Ouda	-0.74	11.85	Granite schiste	
Nwokuy	Kimidougou	-3.56	12.44	Alter schiste	13.7
Samandeni	Lemouroudougou	-4.47	11.42	Alter schiste	8.76
Wayen	Barogo	-1.06	12.428	Méta-gabbro, Volcanite	17.5
Yakala	Bindé	-0.48	11.41	Grès	4.29

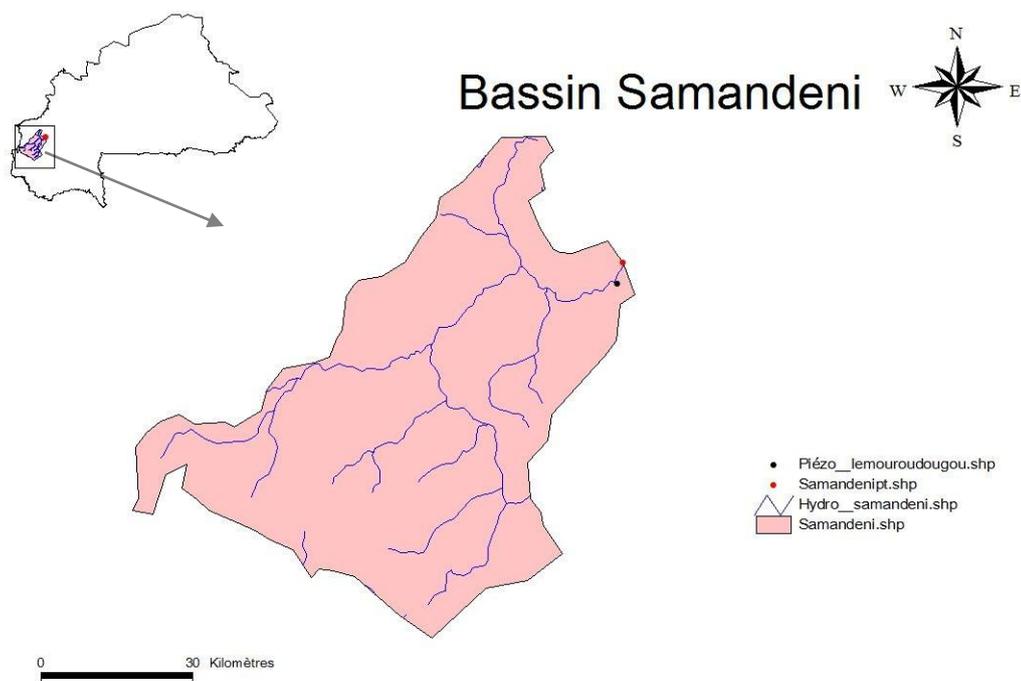


Figure 10 : Localisation du piézomètre de lemouroudougou à Samandeni

II.2. Récapitulatif des bassins versants retenus

Huit(8) bassins versant (cf. Annexe 1) appartenant aux grands bassins du pays ont été retenu dans le cadre de cette étude. Chaque bassin présente un exutoire où ont été effectuées les mesures piézométriques et hydrométriques (débits). Quelques données sur ces bassins sont présentées dans le tableau 1. On s'est limité aux bassins ayant au moins une série de chronique de pluie, d'ETP, de données hydrométriques et piézométriques concomitantes.

Tableau 4: Bassins versants étudiés

Bassins nationaux	Sous bassins versants	Station hydrométrique		Période Données Pluviométriques journalières	Données ETP	Données Piézométrique
		Longitude	Latitude			
Comoé	FOLONZO	-4.61	9.9	1955 - 2009	1955 - 2009	1985 - 2007
Comoé	DIARABAKOKO	-4.78	10.49	1955 - 2009	1955 - 2009	1985 - 2008
Mohoun	DIEBOUGOU	-3.16	10.94	1955 - 2009	1955 - 2009	1990 - 1996
Mohoun	NWOKUY	-3.55	12.52	1955 - 2009	1955 - 2009	1990 - 1996
Mohoun	SAMANDENI	-4.46	11.46	1955 - 2009	1955 - 2009	1985 - 1997
Nakanbé	WAYEN	-1.08	12.37	1955 - 2009	1955 - 2009	1989 - 2000
Nakanbé	YAKALA	-0.50	11.40	1955 - 2009	1955 - 2009	1988 - 2004
Nakanbé	NIAGHO	-0.75	11.77	1955 - 2009	1955 - 2009	1988 - 1996

III. MODELES HYDROLOGIQUES

III.1. Modèles utilisés

Comme mentionné plus haut dans la revue bibliographique, les modèles utilisés dans le cadre de cette étude sont les modèles GR2M, GR4J, GARDENIA, ABCD, SMAP et CREC. Il s'agit de modèles conceptuels globaux empiriques et déterministes. Ces six modèles utilisent des schémas à réservoirs et pour chacun d'eux définissent un échange entre l'eau de pluie à la surface et un réservoir eau souterraine.

III.2. Justification du choix des modèles

Le choix des modèles s'est basé principalement sur l'existence d'un compartiment eau souterraine ou non. La particularité de ces modèles réside dans leur simplicité et leur parcimonie (nombre peu élevé des paramètres, deux à cinq), la nécessité de données peu nombreuses et facilement disponibles. Les données disponibles sont des données journalières et mensuelles. Ces

modèles ont déjà servi pour autres objectifs de modélisation en Afrique subsaharienne. Le modèle GR4J a été utilisé pour l'estimation des apports en eau, Servat E. et Dezetter A. (1992) ; GR2M par Paturel et al (1995), Ouédraogo M. (2001) et Haziza E (2003). Le modèle SMAP a été introduit par le programme Gestion Intégrée des Ressources en Eau (G.I.R.E) et a contribué à l'estimation de la disponibilité en eau du Burkina Faso (Wellens J. & Compaoré N.F., 2003). Quant au modèle GARDENIA, il fut l'objet d'une modélisation pour l'évaluation de la recharge naturelle des aquifères au Burkina Faso. Le modèle CREC a été utilisé sur six bassins versants du sud-ouest du Burkina Faso (NDIAYE J, 1997). Seul le modèle ABCD n'a pas été utilisé dans la sous-région mais a été comparé avec de nombreux modèles mensuels (Vandewiele *et al.*, 1992 ; Makhlouf & Michel, 1992), conduisant à sa recommandation par Alley (1984).

III.3. Moyens informatiques

Le logiciel utilisé pour l'exploitation des modèles est le logiciel Excel de Microsoft (Versions 2007 et 2010). L'optimisation des paramètres s'est faite par les solveurs Excel 2007 et 2010.

La méthode d'optimisation employée par le solveur Excel 2010, dans le cas où les contraintes sont multiples et ne sont pas linéaires, est la méthode du GRG, en Anglais General Reduced Gradient (Gradient Réduit Généralisé), une méthode d'optimisation non linéaire (cf. Annexe 2). Il s'agit d'algorithme développé par Leon Lasdon, de l'Université du Texas et Allan Waren, de l'Université de Cleveland.

L'algorithme est une généralisation de la méthode qui consiste à utiliser les contraintes égalités (ou inégalités) pour éliminer les variables. Les contraintes et la cellule optimale sont des fonctions (c'est-à-dire qu'ils dépendent), des cellules variables. La première dérivée d'une fonction mesure son taux de variation autant que l'entrée est variée. Lorsqu'il y a plusieurs valeurs d'entrées, la fonction a plusieurs dérivées partielles mesurant son taux de changement par rapport à chacune des valeurs d'entrée ; les dérivées partielles forment un vecteur appelé gradient de la fonction.

Les dérivés et gradient fournissent des indices quant à la façon dont les cellules variables doivent être modifiées. Par exemple, si la cellule optimale est maximisée et sa dérivée partielle par rapport à une cellule variable est un grand nombre positif, tandis qu'une autre dérivée partielle est proche de zéro, Microsoft Excel Solveur va probablement augmenter la valeur de la première cellule variable sur la prochaine itération. Une dérivée partielle négative indique que la valeur de la variable liée à la cellule doit être modifiée dans la direction opposée.

Sur certains bassins, certains modèles et/ou certaines périodes, c'est le solveur Excel 2007 (le solveur d'Excel 2010 utilise le même algorithme que celui d'Excel 2007 avec certaines améliorations d'après Microsoft Office, voir Annexe 2) qui a été utilisé. Curieusement, il aboutit souvent à de meilleures optimisations que le solveur Excel 2010.

IV. METHODOLOGIE

Cette partie est consacrée à la présentation de la méthodologie de travail et l'application proprement dite des modèles. Il s'agira dans un premier temps de caler les modèles, ensuite de comparer l'évolution du niveau d'eau du réservoir souterrain avec la piézométrie disponible

IV.1. Méthode de calage

Le calage consiste à déterminer les valeurs des paramètres du modèle utilisé qui permettent de reconstituer le plus fidèlement possible l'hydrogramme observé (les débits observés à l'exutoire, Ardoin, 1999). La qualité de la reproduction de ces débits est mesurée par une valeur numérique appelée fonction critère (critère d'évaluation). Deux types de calage sont possibles :

IV.1.1. Le calage manuel

Par essais successifs, l'utilisateur change un à un les paramètres et observe les effets produits. Il peut ainsi arriver à trouver un jeu de paramètres qui permet une reproduction satisfaisante des débits observés. L'arrêt du calage est donc laissé à l'appréciation de l'utilisateur qui a la possibilité de reproduire plus fidèlement les crues, les étiages ou les débits écoulés. L'avantage du calage manuel repose sur le fait qu'il constitue un bon outil pédagogique, utile pour le "modélisateur" novice. Il permet à ce dernier de se rendre compte de la sensibilité et du rôle des différents paramètres et d'appréhender visuellement le fonctionnement du modèle testé.

IV.1.2. Le calage automatique

Les paramètres sont modifiés selon une technique d'optimisation permettant la convergence vers une solution optimale. Le calage automatique nécessite l'utilisation d'une ou plusieurs méthodes d'optimisation.

Dans ce travail, la méthode d'optimisation est celle des solveurs Excel 2010 ou 2007.

Les plages de calage et validation se présente sous la forme de deux périodes :

- Calage sur toute la période des données
- Calage et validation : avant 1970 et après 1970.

Ce découpage se base sur le fait que depuis la fin des années 1960 et début des années 1970, on a assisté à une baisse des valeurs pluviométriques et hydrométriques en Afrique de l'ouest

(Servat et al., 1996 ; Paturel et al., 1997) entraînant ainsi une baisse constante des ressources en eau (Olivry, 1994).

On rappelle que les calages ont porté sur les écoulements et non sur les hauteurs du réservoir souterrain des modèles.

IV.2. Critère d'évaluation des modèles

L'étude systématique des performances de 5 critères numériques de calage sur quelques bassins versants de la zone de savanes soudanaises en Côte d'Ivoire a montré que c'est le critère de Nash (Nash & Sutcliffe, 1970) qui permet d'accéder aux meilleurs calages (Servat & Dezetter, 1991). D'après Nou (2012), sa détermination permet ainsi d'évaluer les modèles par comparaison des débits observés aux débits simulés ; du niveau d'eau dans le réservoir eau souterraine des modèles et les piézométries observées sur les bassins ; du débit des exutoires de chaque aquifère et du débit de sortie du réservoir d'eau souterraine.

C'est ce critère qui sera utilisé. Il a pour formulation :

$$Nash = 1 - \frac{\sum_i^n (Q_{i, sim} - Q_{i, obs})^2}{\sum_i^n (Q_{i, obs} - moy(Q_{obs}))^2}$$

avec : $Q_{i, sim}$ = débit simulé au pas de temps i

$Q_{i, obs}$ = débit observé au pas de temps i

$moy(Q_{obs})$ = moyenne des débits observés

L'évolution de la hauteur d'eau dans les réservoirs souterrains des différents modèles n'est pas directement comparable aux données piézométriques observées. Il faut donc transformer ces hauteurs d'eau en valeur de « piézométrie simulée ». Le réservoir souterrain, en réalité, est un ensemble constitué par les formations géologiques. Les modèles ne tenant pas compte de ces différents paramètres, la transformation des hauteurs d'eau s'est faite par la méthode proposée par Nou (2012).

Par ailleurs, avant toute comparaison il est nécessaire de présenter l'évolution du niveau de la nappe phréatique après un évènement pluviométrique.

IV.3. Evolution du niveau des nappes et de la pluviométrie

L'évolution du niveau de la nappe est représentée par les données piézométriques mensuelles (cf. Annexe 5) ; sur ces figures sont portées les amplitudes des précipitations mensuelles.

On remarque que le niveau de la nappe remonte après chaque épisode de pluie. La recharge des nappes se réalise avec un temps propre à chaque bassin, fonction de la géologie. A partir de ce constat, on peut se permettre de faire une comparaison entre les observations des piézomètres et les valeurs piézométriques des modèles hydrologiques.

IV.4. Calcul de la piézométrie par le modèle

La méthode de Nou (2012) utilisée est la suivante : tout d'abord, un rapport est déterminé au pas de temps du modèle sur la période de calage (c'est-à-dire après 1970). Ce rapport s'exprime :

$$r = \frac{NP}{R}$$

Avec : r = rapport entre le niveau piézométrique observé et le niveau d'eau du réservoir eau souterraine,

NP = niveau piézométrique observé,

R = Niveau d'eau du réservoir sur la période de calage.

Ensuite, le rapport r est exprimé en fonction du niveau du réservoir eau souterraine pour chaque pas de temps (cf. figure 9). Une courbe de régression puissance est ajustée. L'équation de cette courbe est de la forme: $y = a * x^{-\beta}$

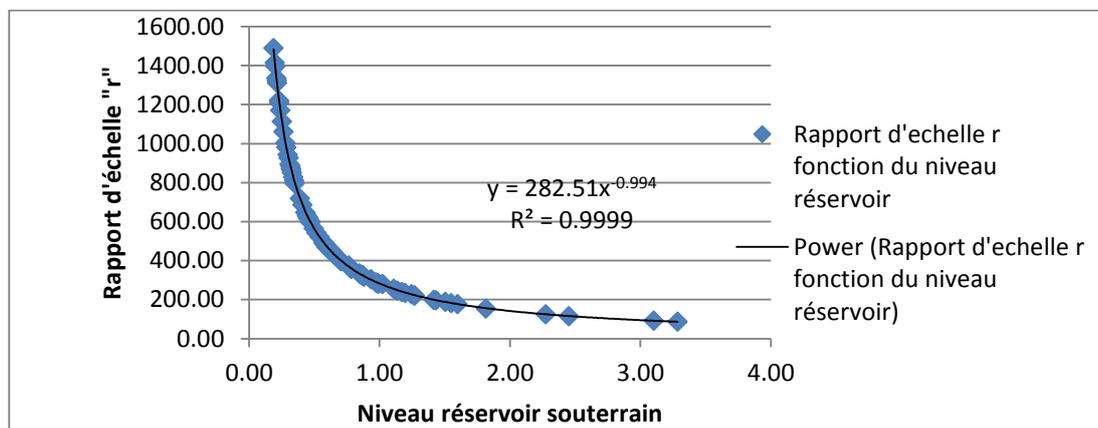


Figure 11 : Représentation du rapport d'échelle "r" en fonction du niveau réservoir souterrain

L'expression de cette relation permet alors d'exprimer le niveau du réservoir souterrain en niveau piézométrique simulé (NPr) qui peut être comparé au niveau piézométrique observé (NP). L'expression de la relation est définie de la manière suivante :

$$NPr = a * R^{1-\beta}$$

Avec NPr = niveau piézométrique simulé sur la période de calage

R = niveau d'eau du réservoir souterrain sur la période de calage

A la suite de cette transformation, un critère Nash-Sutcliffe (NSE) est calculé pour évaluer la qualité de la simulation entre la « piézométrie simulée » et la piézométrie observée.

RESULTATS ET ANALYSE

I. RESULTATS

En annexe 4, sont reportés l'ensemble des ajustements. Ici, on ne présente que les résultats obtenus pour le bassin de Diarabakoko et le modèle mensuel ABCD ainsi que les résultats obtenus pour le bassin de Folonzo avec le modèle journalier GR4J.

On rappelle que l'obtention de valeurs mensuelles à certains piézomètres s'est faite par une moyenne des valeurs journalières disponibles.

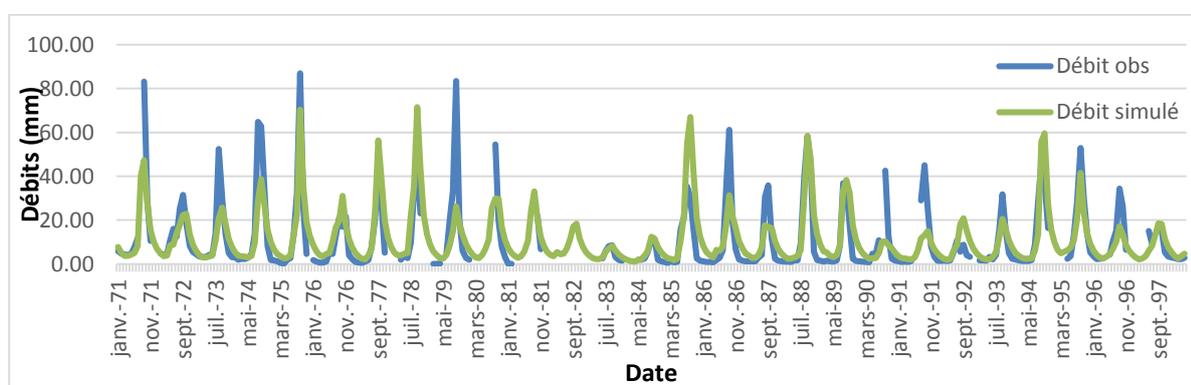


Figure 12: Simulation des débits à la station de Diarabakoko entre Janv1971 et Mai 1998, NSE(%)=62.7

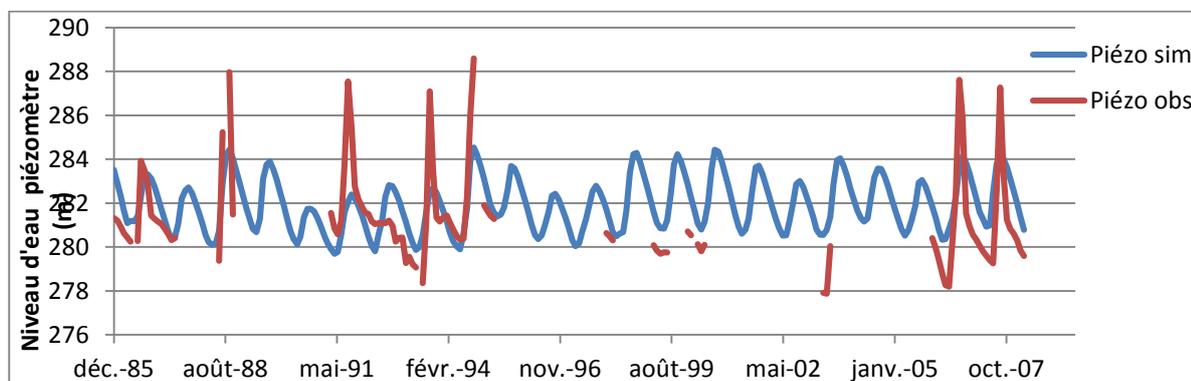


Figure 13: Comparaison piézométrie observée et piézométrie simulée sur Diarabakoko

Pour certains bassins, le calcul du NSE sur la piézométrie n'a pas été possible car on ne disposait pas de ces données au pas de temps journalier.

I.1 Bassin de Diarabakoko

La qualité de la simulation des débits peut être qualifiée d'acceptable avec notamment une simulation présentant un critère de NSE dans la plage de 57.5 à 72.7 (voir Figure 12 ci-dessus, cas du modèle ABCD). Les valeurs des paramètres sont présentées en Annexe 7

L'évolution de la piézométrie simulée par les modèles au pas de temps mensuel après calage sur 1971-1998 est pratiquement identique (les Figure 24, Figure 40, Figure 54 présentent les résultats de la simulation). Un critère de NSE de 23.3 à 37.2% sur la période de calage est obtenu. L'écart moyen entre minimums, maximums simulés et observés varie de 0.52 à 2.06%. Les Tableaux 5 et 13 (voir. Annexe 4) présentent les critères et écart obtenus entre les valeurs des modèles et les valeurs observées.

Tableau 5 : Critères de NSE obtenu sur les différents modèles, Diarabakoko

Modèles hydrologiques	ABCD		GR2M		SMAP		GR4J	
	Période (1971-1998)		Période (1971-1998)		Période (1971-1998)		Période (1971-1998)	
	Débits	Piézométrie	Débits	Piézométrie	Débits	Piézométrie	Débits	Piézométrie
Critère de Nash (%)	62.7	36.1	72.7	37.2	70.3	23.3	19.4	-

Interprétation

De manière générale les modèles modélisent bien les débits de la Comoé à la station de Diarabakoko, avec une tendance à la surestimation par GR4J. Quant à la piézométrie, elle est mal simulée. Cependant, en période de recharge de la nappe, les modèles tendent aussi à représenter une recharge de la nappe mais à des valeurs inférieures aux valeurs observées.

Ces observations peuvent être expliquées par le problème de positionnement des piézomètres (cf.II.1.2.2), une non prise en compte par les modèles de la totalité des interactions eau de surface-eau souterraine et/ou une surestimation de la partie de l'eau qui s'évapore des modèles.

I.2 Bassin de Folonzo

La qualité de la simulation des débits peut être qualifiée d'acceptable avec notamment une simulation présentant un critère de Nash dans la plage de 51.3 à 82.2 (voir Figure 14, cas du modèle GR2M).

L'évolution de la piézométrie simulée par les modèles au pas de temps mensuel est parfaitement identique (Figure 15, Figure 43 et Figure 58 présentant les résultats de la simulation).

Analyse de quelques modèles hydrologiques comportant explicitement une prise en compte d'échange entre eaux de surface et eaux souterraines – Zoom sur le Burkina Faso

Un critère de NSE de 43.7 à 71% sur la période de calage est obtenu. L'écart moyen entre minimums, maximums simulés et observés varie de 0.04 à 0.58%. Les Tableaux 6 et 14 (voir Annexe 4) présentent les critères et écart obtenus entre les valeurs des modèles et les valeurs observées sur la période de calage.

Tableau 6 : Critères de NSE obtenu sur les différents modèles, Folonzo

Modèles hydrologiques	ABCD		GR2M		SMAP		GR4J	
	Période (1971-1995)		Période (1971-1995)		Période (1971-1995)		Période (1971-1995)	
	Débits	Piézométrie	Débits	Piézométrie	Débits	Piézométrie	Débits	Piézométrie
Critère de Nash (%)	67.3	71	72.2	57.6	68.7	43.7	58	61.3

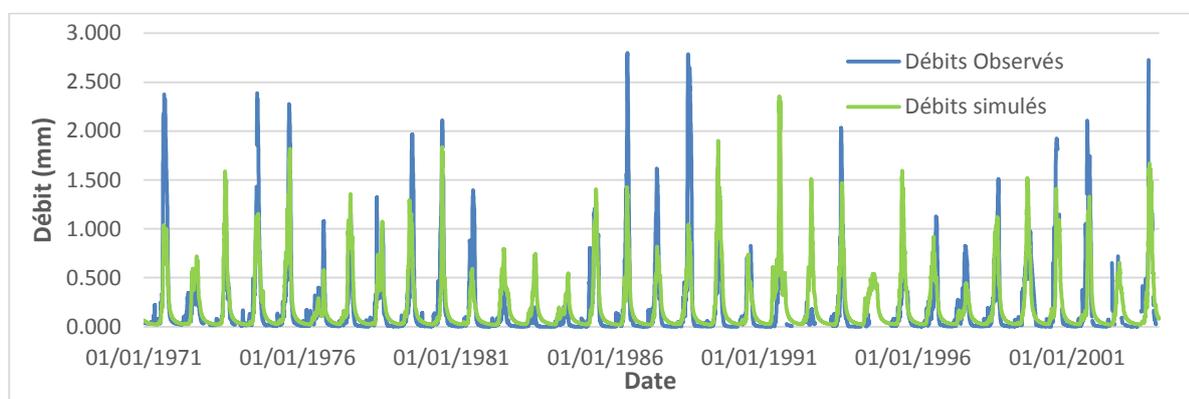


Figure 14 : Simulation des débits à la station de Folonzo entre Janv1971 et Dec 2003, NSE(%)=58

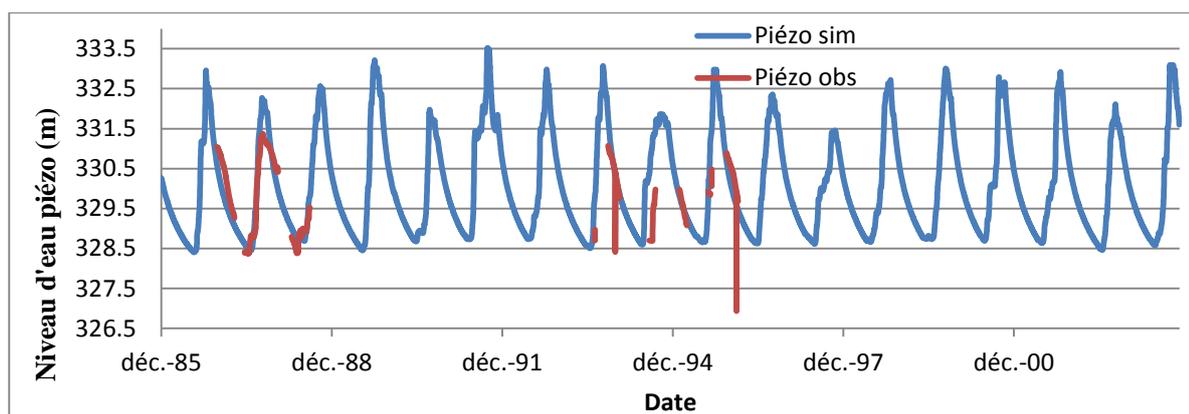


Figure 15 : Comparaison piézométrie observée et piézométrie simulée sur Folonzo

Interprétation

De manière générale les modèles représentent bien les débits de la Comoé à la station de Folonzo avec une tendance à la surestimation par GR4J. Quant à la piézométrie, la simulation est acceptable. Les périodes de recharge de la nappe obtenues par les modèles coïncident avec les observations (cf. Figure 78). Néanmoins, il existe toujours un écart entre la simulation et l'observation. Cela peut être expliqué par le problème de positionnement des piézomètres (Remarquons qu'ici le piézomètre est très proche du lit du cours d'eau), une non prise en compte par les modèles de la totalité des interactions eau de surface – eau souterraine et/ou une surestimation de la partie de l'eau qui s'évapore des modèles.

I.3 Bassin de Diébougou

La qualité de la simulation des débits peut être qualifiée d'acceptable avec notamment une simulation présentant un critère de NSE dans la plage de 11.3 à 80.5 (voir Figure 26, Figure 56, cas du modèle GR2M).

L'évolution de la piézométrie simulée par les modèles au pas de temps mensuel est parfaitement identique (les Figure 32, Figure 46, Figure 61 présentent les résultats de la simulation). Un critère de Nash de 43.7 à 71% sur la période de calage est obtenu. L'écart moyen entre minimums, maximums simulés et observés varie de 0.04 à 0.58%. Les Tableaux 7 et 20 (voir Annexe 4) présentent les critères et écart obtenus entre les valeurs des modèles et les valeurs observées sur la période de calage.

Tableau 7 : Critères de NSE obtenu sur les différents modèles, Diébougou

Modèles hydrologique	ABCD		GR2M		SMAP		GR4J	
	Période (1971-2005)		Période (1971-2005)		Période (1971-2005)		Période (1971-2005)	
	Débits	Piézométrie	Débits	Piézométrie	Débits	Piézométrie	Débits	Piézométrie
Critère de Nash (%)	11.4	51.1	75.1	15.9	41.3	38.6	20.5	-

Interprétation

De manière générale les modèles illustrent bien les débits du Mouhoun à la station de Diébougou avec une surestimation par le GR4J. Quant à la piézométrie, elle est mal simulée. Cependant, en période de recharge de la nappe (niveau maximums piézométries), les modèles tendent aussi à représenter une recharge de la nappe mais à des valeurs inférieurs aux valeurs observées. Ces observations peuvent être expliquées par le problème de positionnement des

piézomètres, une non prise en compte par les modèles de la totalité des interactions eau de surface – eau souterraine et/ou une surestimation de la partie de l'eau qui s'évapore par les modèles.

I.4 Bassin de Niagho

La simulation des débits n'est pas vraiment satisfaisante, des critères de NSE de l'ordre de 19.7 à 31.3 sont obtenus (voir Annexe 7).

L'évolution de la piézométrie simulée par les modèles au pas de temps mensuel n'est pas identique. Néanmoins l'évolution des piézométries se rapproche. Le comportement simulé de la fluctuation de la nappe du modèle SMAP tend plus à se rapprocher de celle observée (cf. Figure 60) avec un écart entre les minimums et maximums allant de 0.47 à 0.69% (cf. Tableau 19). Pour les autres modèles l'écart est de 0.55 à 0.90% (cf. Tableau 19). Les critères de Nash obtenus sont très faibles. Le modèle GR4J reproduit mal le comportement de la nappe. Cela peut être dû à un mauvais calage des débits (NSE= 31.3%) ou au taux de lacune très élevé des valeurs piézométriques journalières.

Tableau 8 : Critères de NSE obtenu sur les différents modèles, Niagho

Modèles hydrologique	ABCD		GR2M		SMAP		GR4J	
	Période (1971-2004)	Période (1971-2003)						
	Débits	Piézométrie	Débits	Piézométrie	Débits	Piézométrie	Débits	Piézométrie
Critère de Nash (%)	19.7	5.6	21.6	4.6	31.3	12	36.3	10

Interprétation

En générale les modèles n'illustrent pas bien les débits du Nakanbé à la station de Niagho avec une surestimation par le GR4J. Quant à la piézométrie, elle très est mal simulée. Cela peut s'expliquer par une lithologie du piézomètre constituée par du granite et de schiste, un positionnement des piézomètres et une non prise en compte par les modèles de la totalité des interactions eau de surface – eau souterraine, des paramètres comme la porosité et/ou une surestimation de la partie de l'eau qui s'évapore par les modèles.

I.5 Bassin de Nwokuy

La simulation des débits est acceptable, des critères de NSE de l'ordre de 47.6 à 66.3% sont obtenus (voir Annexe 7).

L'évolution de la piézométrie simulée par les modèles au pas de temps mensuel n'est pas identique. Le comportement simulé de la fluctuation de la nappe du modèle GR2M se rapproche plus de celui observé (cf. Figure 47) avec un écart entre les minimums et maximums allant de 0.01 à 0.35% (cf. Tableau 16) et un critère de NSE de 74.3%. Pour les autres modèles l'écart est de 0.08 à 8.62% (cf. Tableau 16), les critères de NSE obtenus sont 14.5 et 23.4. Le modèle GR4J reproduit mal le comportement de la nappe. Les Tableau 9 et 16 (voir. Annexe 4) présentent les critères et écarts obtenus entre les valeurs des modèles et les valeurs observées sur la période de calage.

Tableau 9 : Critères de NSE obtenu sur les différents modèles, Nwokuy

Modèles hydrologique	ABCD		GR2M		SMAP		GR4J	
	Période (1971-2004)		Période (1971-2004)		Période (1971-2004)		Période (1971-2003)	
	Débits	Piézométrie	Débits	Piézométrie	Débits	Piézométrie	Débits	Piézométrie
Critère de Nash (%)	66.2	14.5	47.6	74.3	52.9	23.4	66.3	20.6

Interprétation

Les modèles modélisent bien les débits du Mouhoun à Nwokuy. Quant à la piézométrie, la simulation est acceptable avec le modèle GR2M (voir Figure 79). On note que le bassin a une géologie constituée de séries sédimentaires. Le niveau de la nappe est peu profonde (inférieur à 15m) et se situe dans un contexte où les nappes sont généralement libre (Direction Générale de l'Hydraulique, 2001) ; ce qui pourrait expliquer une meilleure simulation des piézométries. Par ailleurs, peuvent expliquer ce décalage entre les minimums et maximums, le problème de positionnement des piézomètres, une non prise en compte par les modèles de la totalité des interactions eau de surface – eau souterraine, et ou une surestimation de la partie de l'eau qui s'évapore par les modèles.

I.6 Bassin de Samandeni

Pour les débits : le critère de NSE obtenu se trouve dans la plage de 41.3 à 57.6, (voir Annexe 7).

L'évolution de la piézométrie simulée par les modèles au pas de temps mensuel est identique (cf. Figure 80) mais, avec des minimums et maximums différents d'un modèle à l'autre. Le comportement simulé de la fluctuation de la nappe de ces modèles est différent de celui observé avec un écart entre les minimums et maximums allant de 0.0% à 1.5% (cf. Tableau 17) et un critère de NSE allant de 6.3 à 39%. Les Tableau 10 et 17 (voir. Annexe 4) présentent les critères et écarts obtenus entre les valeurs des modèles et les valeurs observées sur la période de calage.

Tableau 10 : Critères de NSE obtenu sur les différents modèles, Samandeni

Modèles hydrologique	ABCD		GR2M		SMAP		GR4J	
	Période (1971-2005)		Période (1971-2005)		Période (1971-2005)		Période (1971-2003)	
	Débits	Piézométrie	Débits	Piézométrie	Débits	Piézométrie	Débits	Piézométrie
Critère de Nash (%)	41.3	6.3	56	39.7	57.6	10.7	54.9	33

Interprétation

De manière générale les modèles modélisent bien les débits du Mouhoun à la station de Samandeni avec une surestimation par le GR4J. Quant à la piézométrie, elle est mal simulée. Cependant, en période de recharge de la nappe (niveau maximums piézométries), les modèles tendent aussi à représenter une recharge de la nappe mais à des valeurs inférieurs aux valeurs observées. Situé dans le même contexte géologique que le bassin Nwokuy, l'on devrait s'attendre ici à une bonne simulation de la piézométrie. Cette mauvaise simulation, peut s'expliquer surtout par le positionnement des piézomètres, une non prise en compte par les modèles de la totalité des interactions eau de surface – eau souterraine, et ou une surestimation de la partie de l'eau qui s'évapore par les modèles.

I.7 Bassin de Wayen

La simulation des débits est acceptable (critère de NSE appartenant à [58.3 ; 73.4]) pour les modèles mensuels et pas vraiment satisfaisante pour le modèle GR4J (NSE = 36.1). (Voir Annexe 7).

L'évolution de la piézométrie simulée par les modèles au pas de temps mensuel diffère (cf. Figure 82). Le comportement simulé de la fluctuation de la nappe de ces modèles est différent de celui observé avec un écart entre les minimums et maximums allant de 0.25% à 1.97% (cf. Tableau

18, Annexe 4) et un critère de NSE faible. Pour le modèle GR4J, il reproduit mal le comportement de la nappe. Cela peut être dû à un mauvais calage des débits (Nash= 36.1%).

Tableau 11: Critères de NSE obtenu sur les différents modèles, Wayen

Modèles hydrologique	ABCD		GR2M		SMAP		GR4J	
	Période (1971-2004)		Période (1971-2004)		Période (1971-2004)		Période (1971-2003)	
	Débits	Piézométrie	Débits	Piézométrie	Débits	Piézométrie	Débits	Piézométrie
Critère de Nash (%)	58.3	8.2	68.6	5.9	73.4	9.4	36.1	1.9

Interprétation

De manière générale les modèles modélisent bien les débits du Nakanbé à la station de Wayen. L'évolution de la piézométrie n'est pas similaire sur tous les modèles.

Ces observations peuvent être expliquées par le problème de positionnement des piézomètres (cf.II.1.2.2), une non prise en compte par les modèles de la totalité des interactions eau de surface–eau souterraine, et ou une surestimation de la partie de l'eau qui s'évapore par les modèles.

I.8 Bassin de Yakala

La simulation des débits est acceptable (critères de NSE appartenant à [70 ; 74.3]) pour les modèles mensuels et pas vraiment satisfaisante pour le modèle GR4J (NSE = 31.7). (Voir Annexe7).

L'évolution de la piézométrie simulée par les modèles au pas de temps mensuel est semblable mais avec une différence entre les minimums et maximums (cf. Figure 83. Le comportement simulé de la fluctuation de la nappe de ces modèles est différent de celui observé avec un écart entre les minimums et maximums allant de 0.40% à 8.18% (cf. Tableau 19, Annexe 4), critère de Nash faible. Pour le modèle GR4J, il reproduit mal le comportement de la nappe.

Tableau 12 : Critères de NSE obtenu sur les différents modèles, Yakala

Modèles hydrologique	ABCD		GR2M		SMAP		GR4J	
	Période (1971-2004)		Période (1971-2004)		Période (1971-2004)		Période (1971-2003)	
	Débits	Piézométrie	Débits	Piézométrie	Débits	Piézométrie	Débits	Piézométrie
Critère de Nash (%)	74.3	0.4	73.7	1.9	70	2.5	31.7	1.2

Interprétation

La modélisation des débits est acceptable à la station de Yakala. L'évolution de la piézométrie est similaire sur tous les modèles. En période de recharge et vidange de la nappe, les modèles tendent à représenter une recharge de la nappe mais à des valeurs inférieures aux valeurs observées.

II. RESULTATS MODELES CREC, GARDENIA

Les modèles CREC, GARDENIA n'ont pas pu être utilisés pour le travail en raison de certaines difficultés rencontrées : tout d'abord un problème d'équations qui ne semblent pas complètes a été rencontré dans les documentations qu'on a pu avoir ; ensuite les moyens informatiques utilisés (Excel 2010 ou à défaut Excel 2007) ne permettent pas d'obtenir de résultats toujours probants lors de la modélisation.

Cela a alors conduit à ne pas prendre en compte les résultats de ces modèles.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

I. SYNTHÈSE

L'objectif principal de ce travail était d'analyser le comportement de modèles hydrologiques prenant en compte des échanges entre eaux de surface et eaux souterraines. A cette fin, on a comparé l'évolution du niveau des réservoirs souterrains des modèles avec des piézométries observées sur différents bassins du Burkina Faso.

Une recherche bibliographique a été entreprise pour faire une synthèse de quelques modèles prenant en compte ces échanges et pour sélectionner les plus simples d'entre eux : tenir compte du nombre de leurs paramètres et du pas de temps des modèles. La sélection a porté sur les modèles hydrologiques GR4J, GR2M, ABCD, SMAP. Deux autres modèles ont été identifiés, GARDENIA et CREC, mais on s'est heurté à des problèmes d'écriture et d'optimisation de ces modèles sous Excel 2010 et 2007.

La zone d'étude pour mener ce travail est le Burkina Faso. Les bassins versants ont une superficie de l'ordre de quelques milliers de km² et sont des sous-bassins des principaux bassins internationaux qui drainent le pays : Volta, Niger et Comoé. Ils ont au moins une série de chronique de pluie, d'ETP, de données hydrométriques et piézométriques concomitantes.

Le principal écueil de ce travail a été la trop faible disponibilité des données de piézométrie : on a été amené à faire des moyennes mensuelles de piézométrie sur des mois où le taux de lacune atteignait parfois 90% ! Cela n'est peut-être pas rédhibitoire quand on sait que la dynamique souterraine est lente. De même, on n'a pas pu effectuer de missions de terrain pour vérifier les emplacements des piézomètres afin de s'assurer qu'ils mesuraient bien une éventuelle relation entre la nappe phréatique et le cours d'eau. Mais comme l'objectif de ce travail était avant tout exploratoire, nous nous sommes permis ces approximations.

On pourra faire également la remarque suivante : en zone sédimentaire, il semble effectivement de s'intéresser au point soulevé juste avant ; en zone de socle, puisque les aquifères sont diffus, cela est peut-être moins important.

On a choisi d'écrire ces modèles sous Excel et d'utiliser les algorithmes d'optimisation proposés par ce logiciel. Les difficultés rencontrées parfois pour optimiser ces modèles laissent à penser que ces algorithmes ne sont pas forcément optimaux.

Les résultats obtenus, au pas de temps mensuel (modèles GR2M, ABCD et SMAP), montrent que les modèles reproduisent mieux (NSE entre 11.4 et 75.1) l'évolution de la piézométrie des

nappes observées, qui se chargent pendant les périodes de pluie importante et se déchargent pendant les saisons non pluvieuses, que le modèle au pas de temps journalier GR4J. Une analyse comparative entre les piézométries simulées par les modèles mensuels et les piézométries observées donne des écarts de l'ordre de 0,04% à 8,62% sur les minimums et maximums. Entre modèles, l'évolution de la piézométrie est semblable sur la majorité des bassins à l'exception du bassin de Wayen où on remarque un net décalage pour le modèle SMAP (retard). Cependant, le modèle SMAP, en général, tend à sous-estimer la recharge de la nappe et surestimer sa vidange. Parmi les trois modèles mensuels, le modèle GR2M reproduit le mieux l'évolution de la nappe.

Au pas de temps journalier, seul le modèle GR4J a été utilisé. Ce modèle journalier reproduit mal l'évolution de la nappe.

Ainsi on peut conclure que les modèles mensuels sélectionnés semblent être mieux adaptés pour cette étude, peut-être à cause des données qui sont plus disponibles au pas de temps mensuel qu'au pas de temps journalier.

En outre, il faut aussi noter qu'en ce qui concerne la modélisation hydrologique, notamment le calage et la validation des modèles utilisés sur les différents bassins étudiés du Burkina Faso, il existe une difficulté pour faire le lien entre les valeurs des paramètres et les propriétés physiques d'un bassin versant et sa réponse hydrologique. La reproduction du comportement hydrologique reste un sujet de recherche de forte actualité dans le domaine de l'hydrologie.

II. PERSPECTIVES

Pour la suite de ce travail, on propose les recommandations :

Sur l'étude, des jeux de données restent à acquérir pour la diminution du taux de lacune des séries piézométriques. Il serait notamment intéressant :

- de vérifier les coordonnées des piézomètres,
- d'envisager la réalisation d'autres piézomètres à proximité des stations hydrométriques ainsi qu'un suivi journalier régulier. Cela pourrait permettre une meilleure représentation et modélisation de la piézométrie observée

Il faudrait peut-être envisager de faire ce travail avec un autre langage de programmation (par exemple Matlab) et d'utiliser d'autres algorithmes d'optimisation.

BIBLIOGRAPHIE

- Abadie J., Haggag A., 1979.** Brève communication. Performance du gradient réduit généralisé avec une méthode quasi newtonienne pour la programmation non linéaire. Revue française d'automatique, d'informatique et de recherche opérationnelle. Recherche opérationnelle, tome 13, n°2 (1979), p. 209-216
- Abbott M. B., Bathurst J. C., Cunge J. A., et al. 1986.** An introduction to the European Hydrological System – Système Hydrologique Européen, "SHE", 2. Structure of a physically based, distributed modeling system. Journal of Hydrology, 1986b, vol. 87, pp. 61-77.
- Ambroise B., 1991.** Hydrologie des petits bassins versants ruraux en milieu tempéré : Processus et Modèles. Séminaire du Conseil Scientifique du Département « Science du Sol » de l'INRA, 1991, (26-27/03/1991), Dijon, 34p.
- Ambroise B., 1999.** La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant : Processus, Facteurs, Modèles. HGA, Bucarest, 200p.
- Boubacar I., 2012,** Caractérisation des saisons de pluies au Burkina Faso dans un contexte de changement climatique et évaluation des impacts hydrologiques sur le bassin du Nakanbé, Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie.
- Chocat B., 1997.** Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement. Paris : Lavoisier TEC&DOC, 1124p.
- Dakouré D., 2003.** Etude hydrogéologique et géochimique de la bordure sud-est du bassin sédimentaire de Taoudéni (Burkina Faso - mali) - Essai de modélisation. Thèse de doctorat
- Diello P., 2007,** Interrelations Climat – Homme – Environnement dans le Sahel Burkinabé : impacts sur les états de surface et la modélisation hydrologique, Thèse de doctorat
- Direction Générale de l'Hydraulique, 2001,** Etat des lieux des ressources en eau du Burkina Faso et de leur cadre de gestion, version finale 2001
- Fernandez W, Vogel R.M. et Sankarasubramanian A., 2000,** Regional calibration of watershed model, Hydrological Sciences Journal 45(5), 689-707.
- Gnouma R., 2006.** Aide à la calibration d'un modèle hydrologique distribué au moyen d'une analyse des processus hydrologiques : application au bassin versant de l'Yzeron. Thèse INSA Lyon, Cemagref., 445p.
- Guilbot A., 1986.** - Des Multiples Applications d'un Modèle Conceptuel du Cycle de l'Eau en France. Rev. int. Sciences de l'Eau. Vol 2, 1: 19-26.
- Indardo K., 2002.** Découpages spatiaux et conséquences sur le bilan hydrologique – Application

- au bassin de l'Orb à travers une démarche de modélisation hydrologique distribuée. Thèse, ENGREF Montpellier, 252p.
- Le Moine N., 2005**, Déterminants du bilan en eau à l'échelle du bassin versant : Vers une estimation réaliste des pertes des bassins de surface, Cemagref.
- Le Moine N., 2008**, Le bassin versant de surface vu par le souterrain : une voie d'amélioration des performances et du réalisme des modèles pluie-débit ?, Thèse de doctorat, UPMC Paris, Cemagref, 348p
- Ndiaye, J.A. 1997**, Modélisation Pluie-Débit des apports de bassins versants du sud-ouest du Burkina-Faso, ORSTOM, Mémoire de Fin d'étude
- Nou A., 2012**, Approche interdisciplinaire pour l'estimation de la ressource en eau d'origine Karstique Application a l'hydrosysteme karstque tertiaire CESSÉ-POUZOLS (France, Minervois), Thèse, Montpellier I, 282p
- Olivry J.E, 1994**. De l'évolution de la puissance des crues des grands cours d'eau intertropicaux d'Afrique depuis deux décennies, Les dossiers de la revue de géographie Alpine, n°12, 05 Dec 1994, ORSTOM
- Ouédraogo Inoussa, 1994**. Géologie et hydrogéologie des formations sédimentaires de la boucle du mouhoun, Thèse de doctorat
- Paturel J.E, Boubacar I, L'Aour A and Mahé G, 2010**, Note de recherche : Grilles mensuelles de pluie en Afrique de l'Ouest et Centrale, Revue des Sciences de l'Eau 23(4), 325–333.
- Servat E, Paturel J.E et Lubès H. (1996)**, La sécheresse gagne l'Afrique tropicale, La recherche, 290, 24-25
- Thomas H. A. (1981)**. Improved methods for rational water assement. Report, Contract WR15249270, US Water Ressources Council, Washington, DC, USA.
- Vandewiele G.L, Xu C.Y. et Ni-Lar-Win (1992)**, Methodology and comparative study of monthly water balance models in Belgium, China and Birmania, Journal of Hydrology,134, 315-347
- Wellens J. et Compaoré N.F.**, Renforcement de la capacité de gestion des ressources en eau dans l'agriculture moyennant des outils de suivi-évaluation, GE eau, Rapport Annuel No 2 : Décembre 2002 - Novembre 2003 (Janvier 2004)

Sites internet

<http://sierem.org>

<http://www.brgm.fr/publication/pubDetailRapportSP.jsp?id=RSP-BRGM/RP-52832-FR>, 23

Février 2013

<http://www.emse.fr/~beaune/solveur/Algo.html>, 24 Mai 2013

<http://support.microsoft.com/kb/82890>, 24 Mai 2013

http://www.numdam.org/item?id=RO_1979_13_2_209_0, 25 Mai 2013

ANNEXES

Annexe 1 : Cartes et réseaux piézométriques des bassins	II
Annexe 2 : Principe générale de la méthode du Gradient Réduit Généralisé (GRG), (Abadie J., Haggag A., 1979).....	VI
Annexe 3: Graphiques des résultats des simulations.....	VII
Annexe 4 : Tableaux des écarts entre piézométrie simulée et observée.....	XX
Annexe 5 : Représentation de l'évolution des nappes en réponse aux précipitations.....	XXIV
Annexe 6 : Comparaison modèles mensuels	XXVII
Annexe 7 : Paramètres et critères de NSE obtenus sur le modèle ABCD des différents bassins	XXX

Annexe 1 : Cartes et réseaux piézométriques des bassins

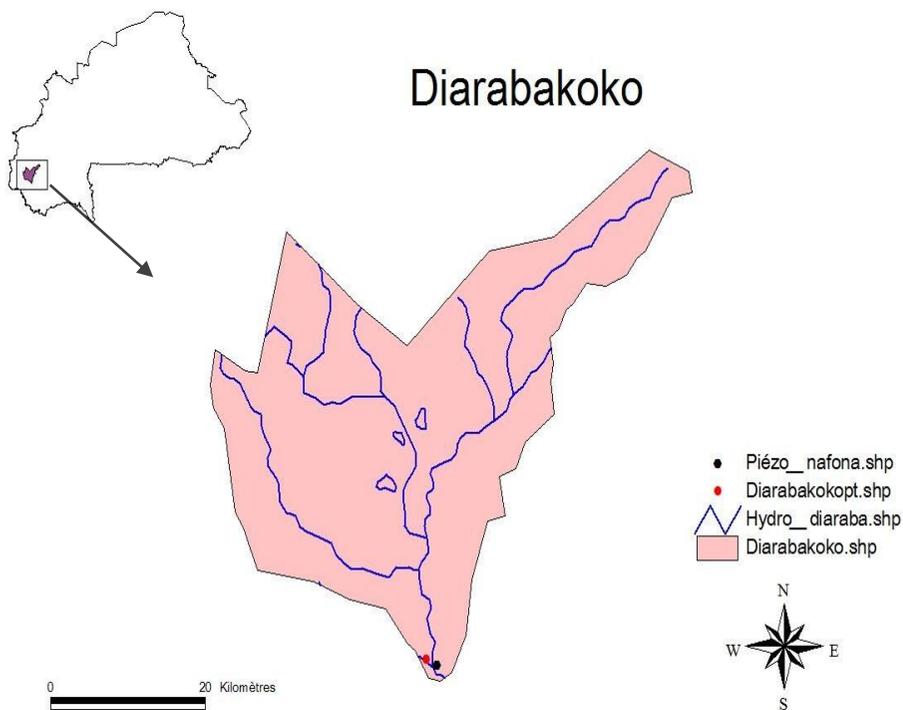


Figure 16: Localisation des stations piézométriques et hydrométriques sur le bassin de Diarabakoko

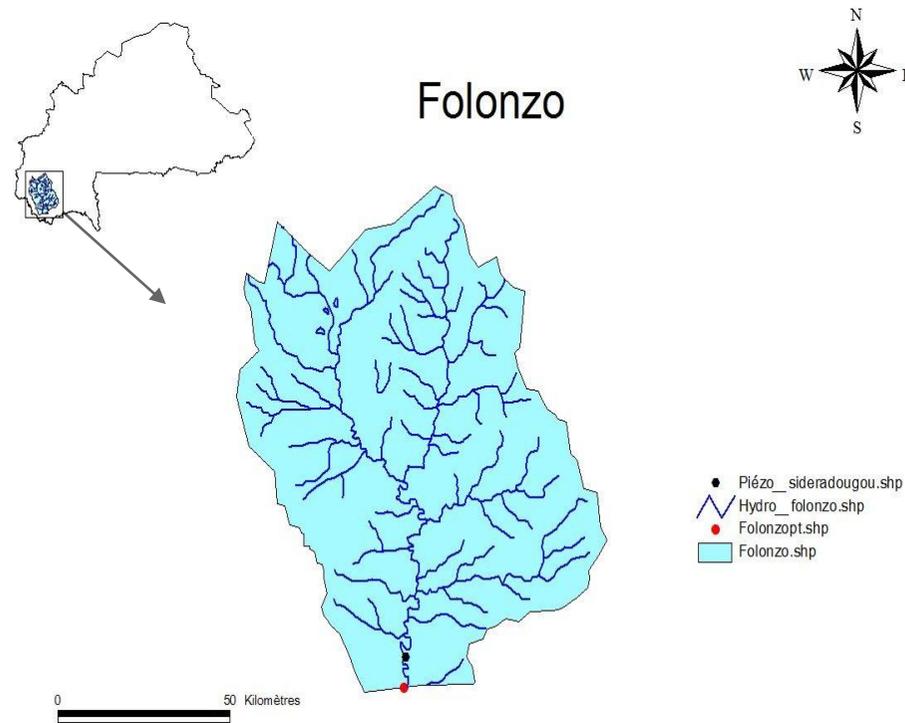


Figure 17: Localisation des stations piézométriques et hydrométriques sur le bassin de Folonzo

Analyse de quelques modèles hydrologiques comportant explicitement une prise en compte d'échange entre eaux de surface et eaux souterraines
– Zoom sur le Burkina Faso

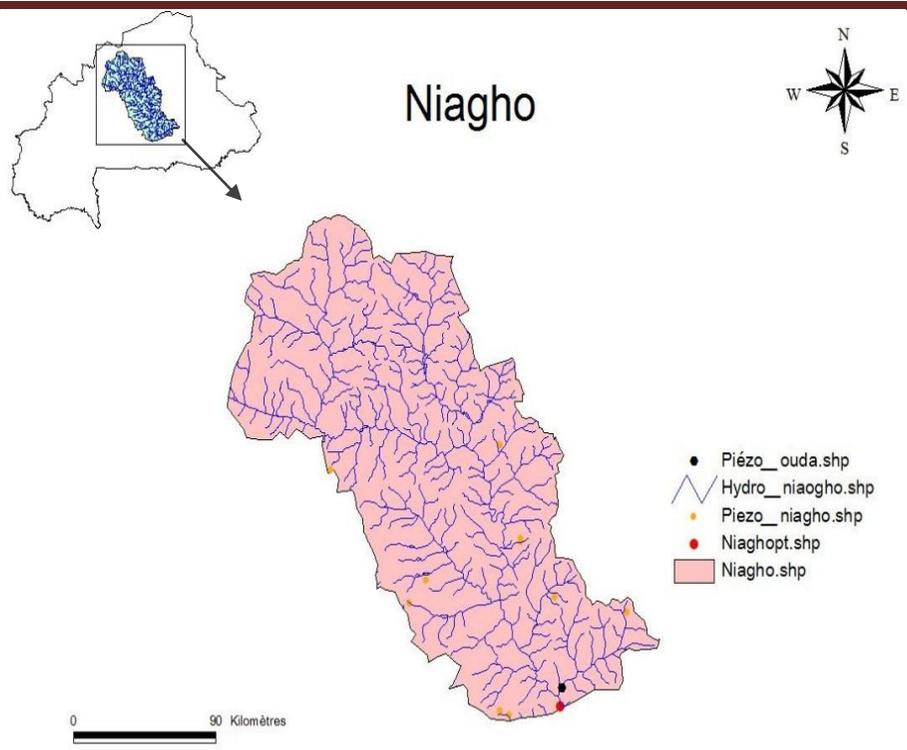


Figure 19: Localisation des stations piézométriques et hydrométriques sur le bassin de Niagho

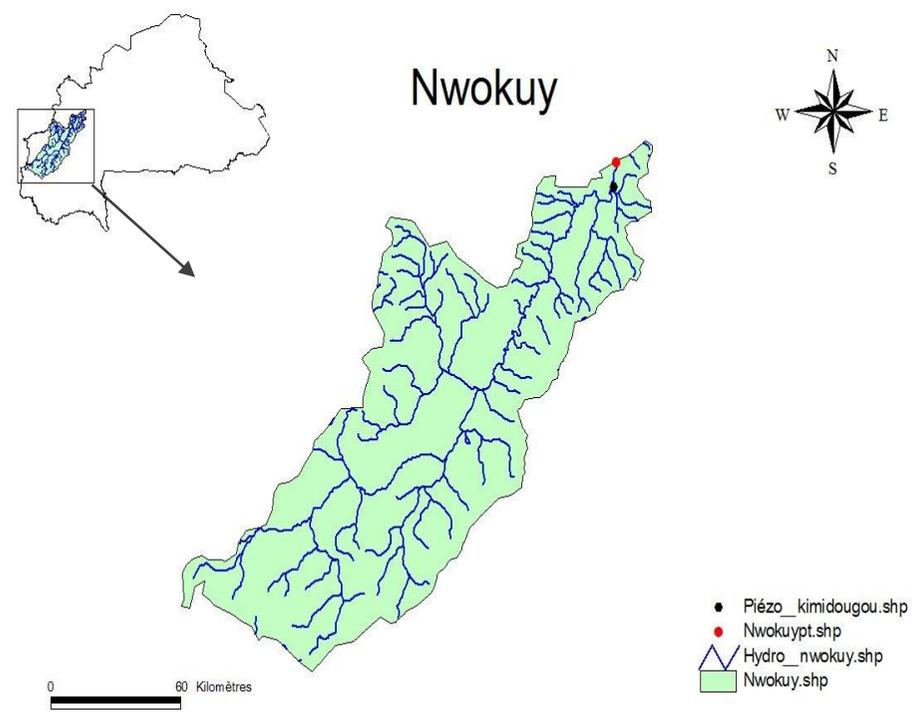


Figure 18: Localisation des stations piézométriques et hydrométriques sur le bassin de Nwokuy

**Analyse de quelques modèles hydrologiques comportant explicitement une prise en compte d'échange entre eaux de surface et eaux souterraines
– Zoom sur le Burkina Faso**

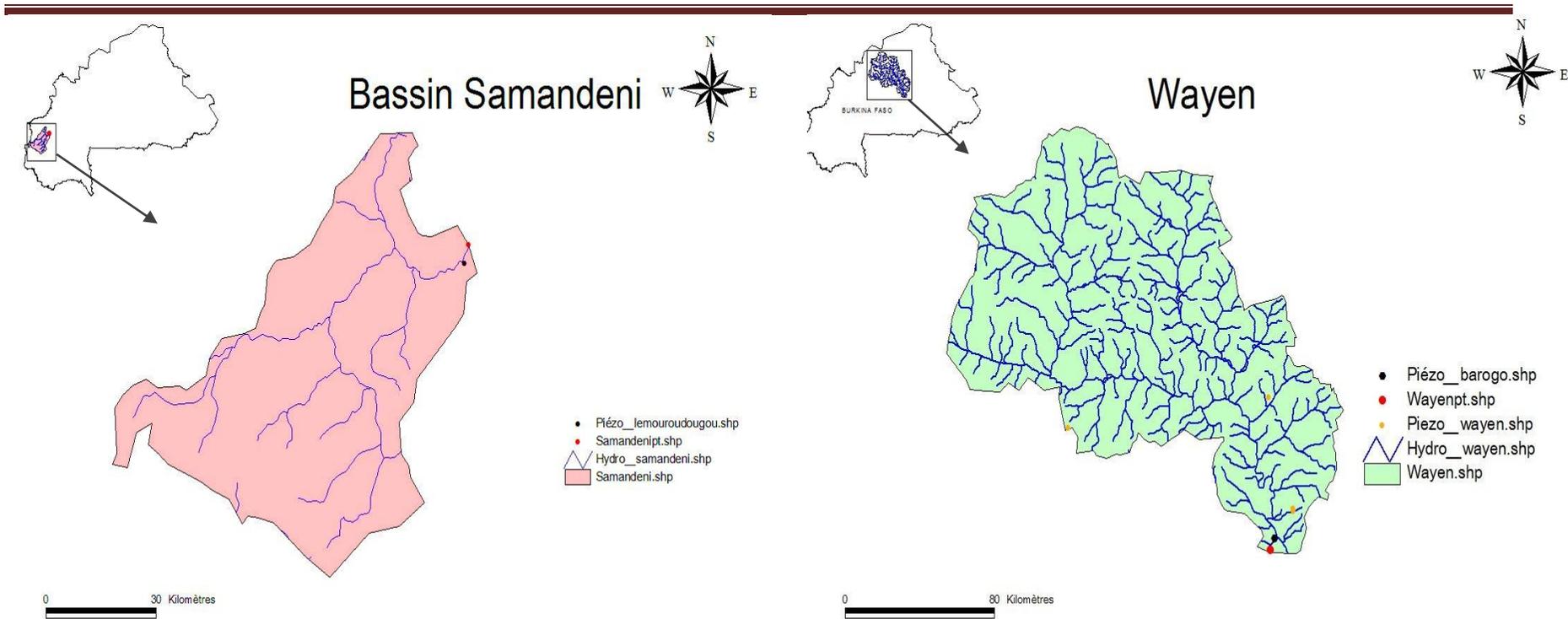


Figure 21: Localisation des stations piézométriques et hydrométriques sur le bassin de Samandeni

Figure 20: Localisation des stations piézométriques et hydrométriques sur le bassin de Wayen

Analyse de quelques modèles hydrologiques comportant explicitement une prise en compte d'échange entre eaux de surface et eaux souterraines
 – Zoom sur le Burkina Faso

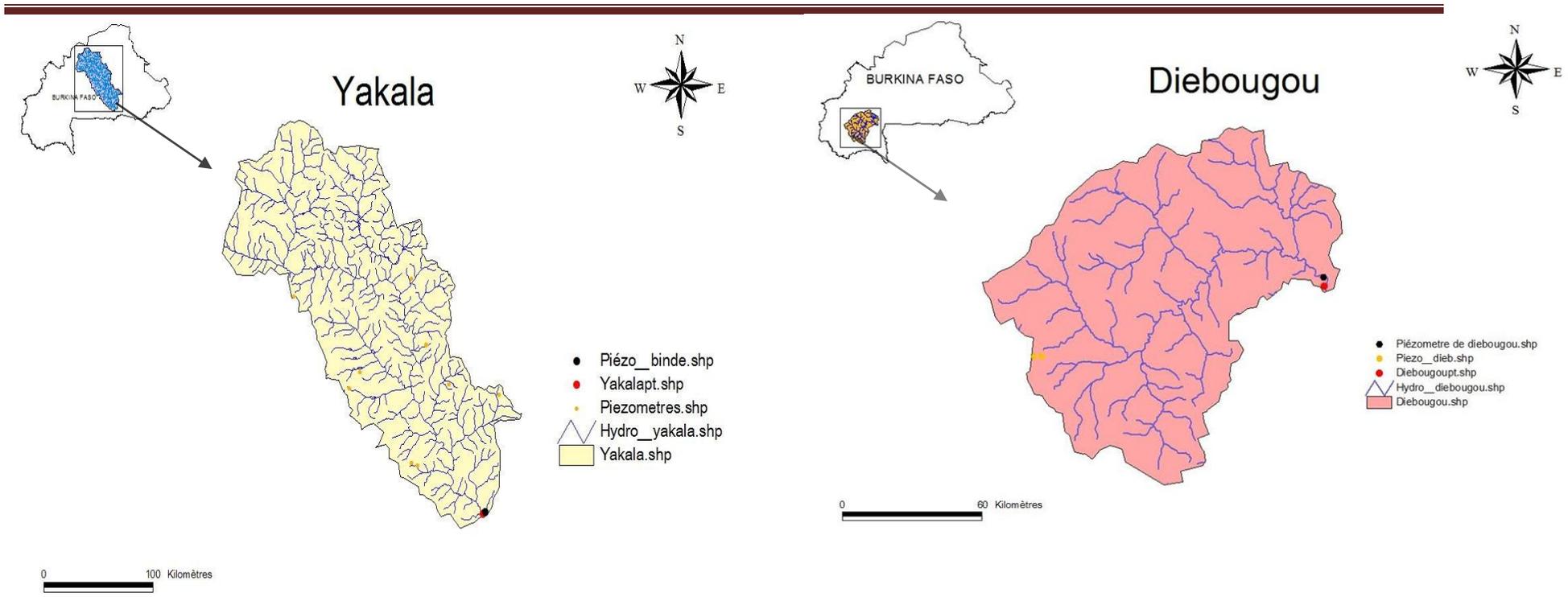


Figure 23: Localisation des stations piézométriques et hydrométriques sur le bassin de Yakala

Figure 22 : Localisation des stations piézométriques et hydrométriques sur le bassin de Diebouougou

Annexe 2 : Principe générale de la méthode du Gradient Réduit Généralisé (GRG), (Abadie J., Haggag A., 1979)

1. Choisir un point initial $X^0 \in P \cap V$ (dans la suite, pour simplifier la présentation et sauf mention expresse du contraire, on supposera pour tout j , $\alpha_j = -\infty$ et $\beta_j = +\infty$), puis séparer les variables en variables basiques (dépendantes, en nombre m , formant un vecteur y) et non basiques (indépendantes, en nombre $n-m$, formant un vecteur x) de sorte qu'en posant :

$$X^0 = (y^0, x^0) \text{ et } f'(X^0) = \left(\left(\frac{\partial f}{\partial y^0}, \frac{\partial f}{\partial x^0} \right) \right) = (B, N), \text{ la matrice } B \text{ (la base) soit régulière (condition$$

de non – dégénérescence). La même séparation est appliquée à :

$$F'(X^0) = \left(\frac{\partial F}{\partial y^0}, \frac{\partial F}{\partial x^0} \right) = (C_B, C_N).$$

D'après le théorème des fonctions implicites, il existe un voisinage Ω de x^0 et une fonction continue unique y telle que : $f(y(x), x) = 0 \forall x \in \Omega, y(x^0) = y^0$

La dérivée existe et est continue dans un voisinage de x^0 , en outre : $\frac{dy}{dx^0} = -B^{-1}N$

Lorsqu'on exprime la fonction économique selon les seules variables indépendantes, on a $\Phi(x) = F(y(x), x)$; la méthode consiste à faire une itération du problème sans contrainte :

$$\text{Min} \Phi(x)$$

2. Calculer le gradient réduit, qui est la dérivée de $\Phi(x)$: $g^T = \Phi'(x) = C_N - C_B B^{-1}N$, où $u = -C_B B^{-1}N$ est une estimation du multiplicateur de Lagrange. Ici se placent les tests d'arrêt (par exemple, g suffisamment proche de zéro).
3. Déterminer la direction de recherche $d = (dB, dN) = (k, h)$;
 - a) choisir une direction h tel que le produit scalaire g^T soit strictement négatif, et un pas λ dans cette direction pour faire progresser les variables indépendantes : $x^{i+1} = x^i + \lambda h^i$
 - b) la direction des variables dépendantes est données par $k = -B^{-1}Nh$.
4. Calculer les variables dépendantes en résolvant le système de m équations à m variables y : $f(x^{i+1}, y) = 0$, ce que l'on fait par une méthode pseudo-newtonienne : $\hat{y}^{j+1} = \hat{y}^j - B^{-1} f(x^{i+1}, \hat{y}^j)$ Où $\hat{y}^j = y^0 + \lambda k$ et où B^{-1} est calculé une fois pour toute au début de l'itération extérieure en X^0 . Par conséquent, les itérations intérieures de la méthode pseudo-newtonienne ont une convergence linéaire à condition que le pas λ soit assez petit.
5. Améliorer la valeur de la fonction économique $\Phi(x)$ et retourner en 2.

Annexe 3: Graphiques des résultats des simulations

Annexe 3. a : Modèle ABCD

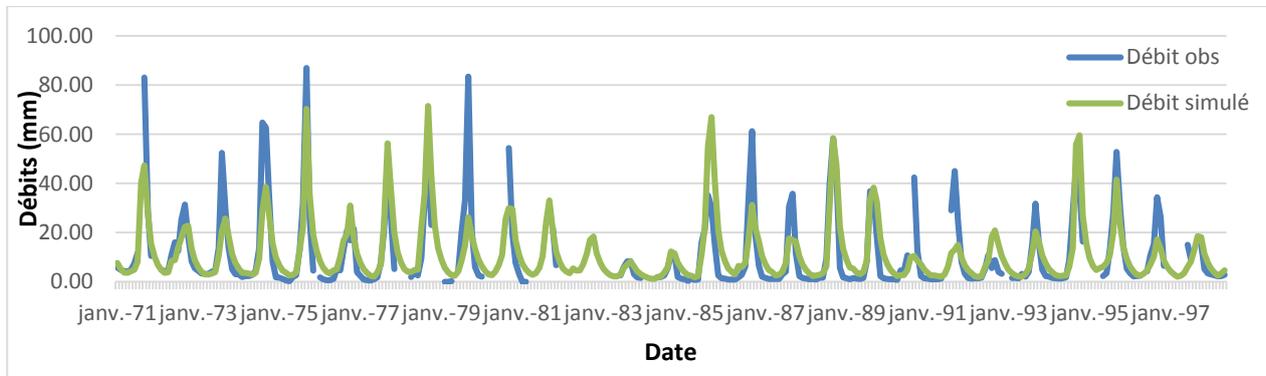


Figure 24: Simulation des débits à la station de Diarabakoko entre Janv1971 et Mai 1998, NSE(%)=62.7

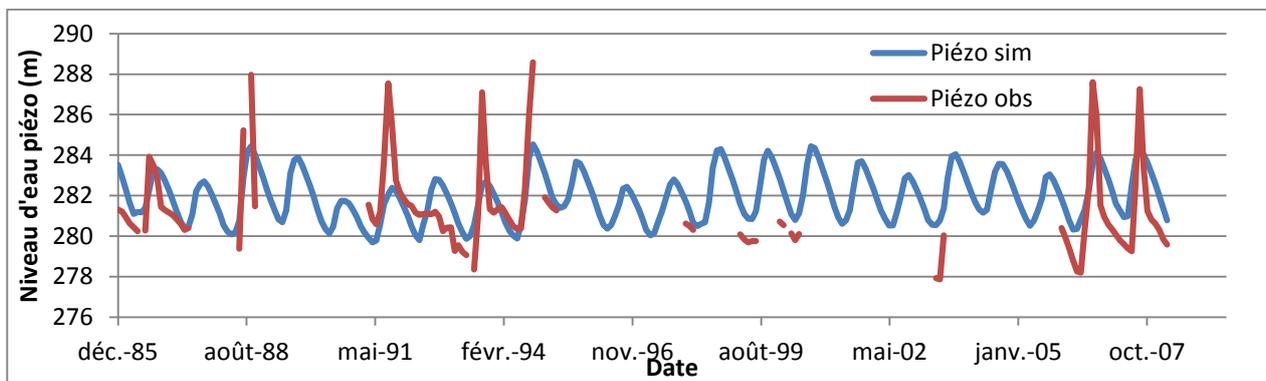


Figure 25: Comparaison piézométrie observée et piézométrie simulée sur Diarabakoko

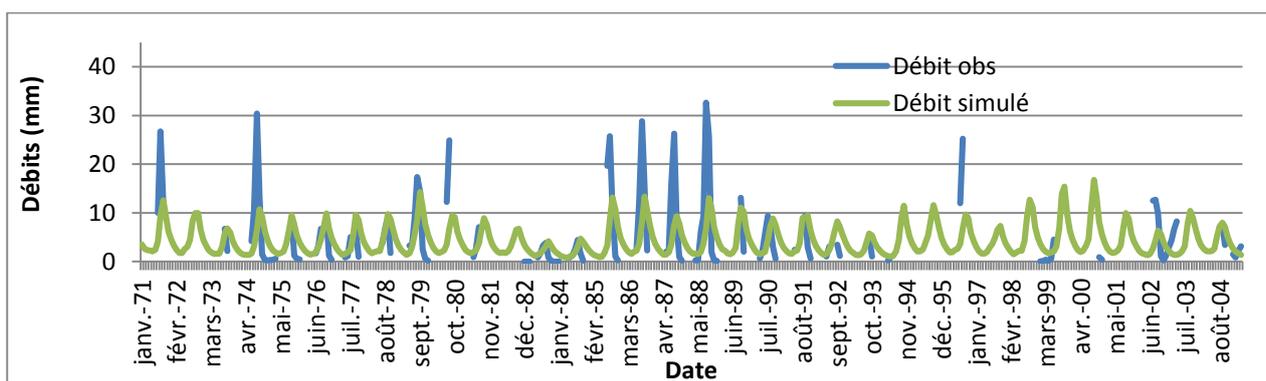


Figure 26 : Simulation des débits à la station de Diebougou entre Janv1971 et Avr 2005, NSE(%)=11.4

Analyse de quelques modèles hydrologiques comportant explicitement une prise en compte d'échange entre eaux de surface et eaux souterraines – Zoom sur le Burkina Faso

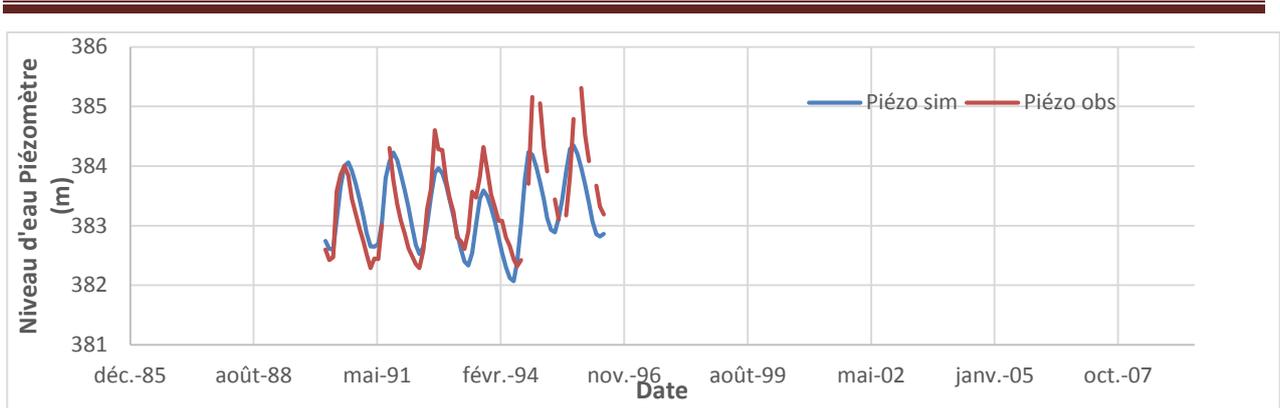


Figure 27 : Comparaison piézométrie observée et piézométrie simulée sur Diebougo

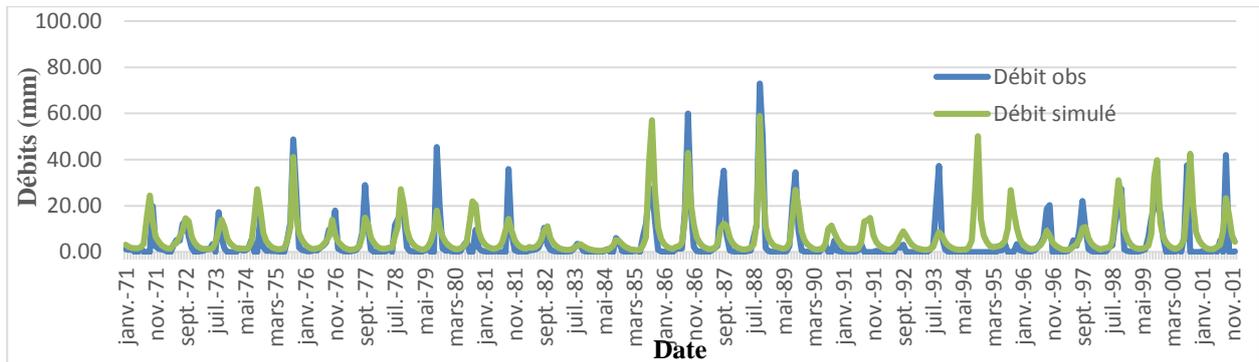


Figure 28: Simulation des débits à la station de Folonzo Janv1971–Déc.2001, NSE(%)=67.3

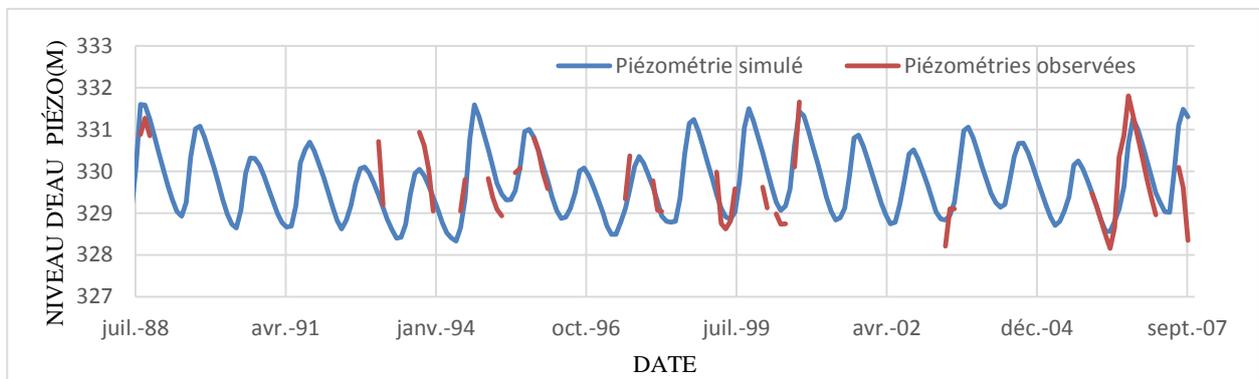


Figure 29: Comparaison piézométrie observée et piézométrie simulée sur Folonzo

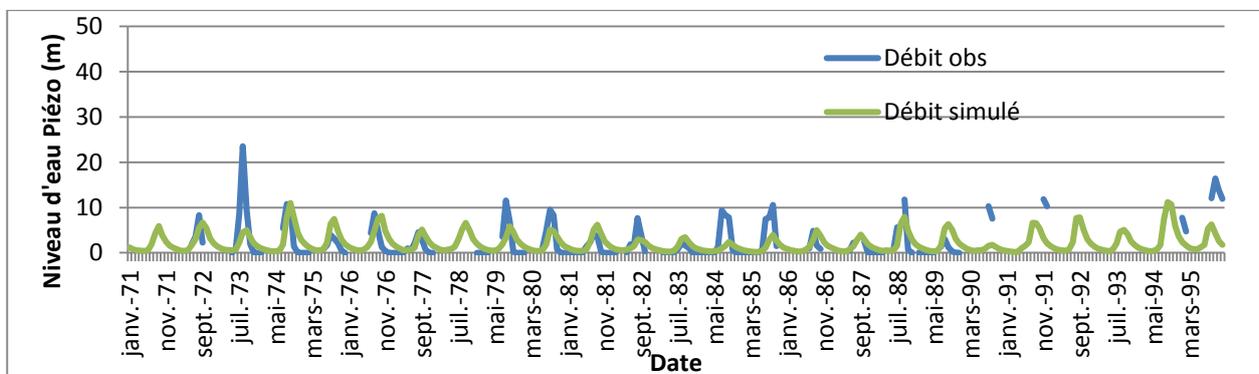


Figure 30: Simulation des débits à la station de Niagho Janv1971 – Déc. 1995, NSE(%)=19.7

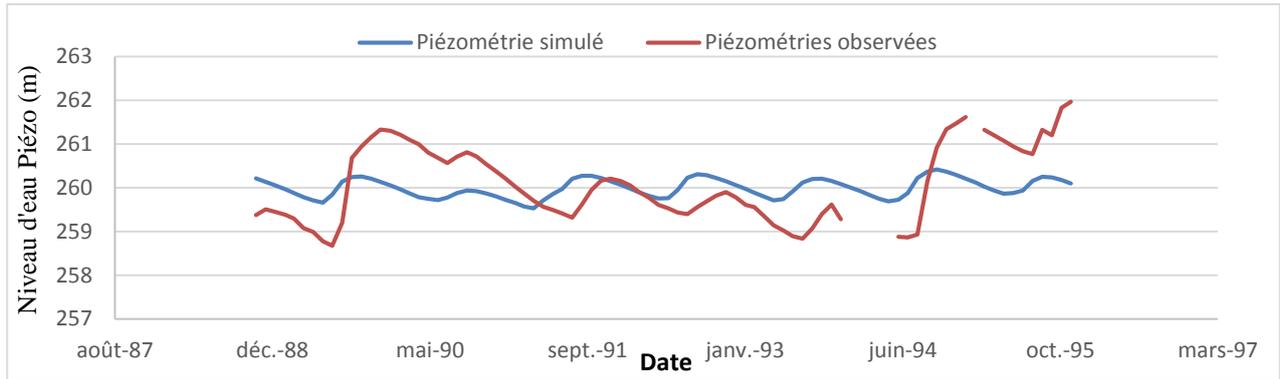


Figure 31: Comparaison piézométrie observée et piézométrie simulée sur Niagho

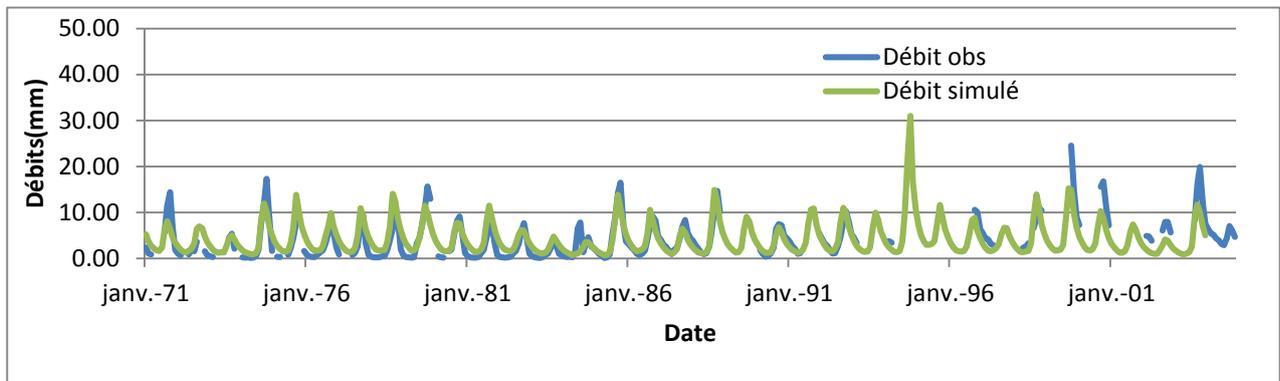


Figure 32: Simulation des débits à la station de Nwokuy Janv1971 – Déc. 2004, NSE(%)=66.2

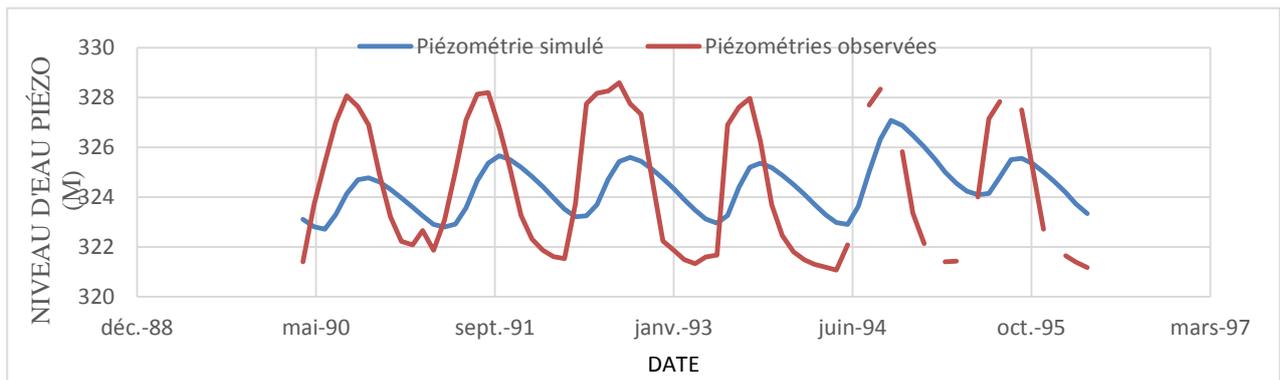


Figure 33: Comparaison piézométrie observée et piézométrie simulée sur Nwokuy

Analyse de quelques modèles hydrologiques comportant explicitement une prise en compte d'échange entre eaux de surface et eaux souterraines – Zoom sur le Burkina Faso

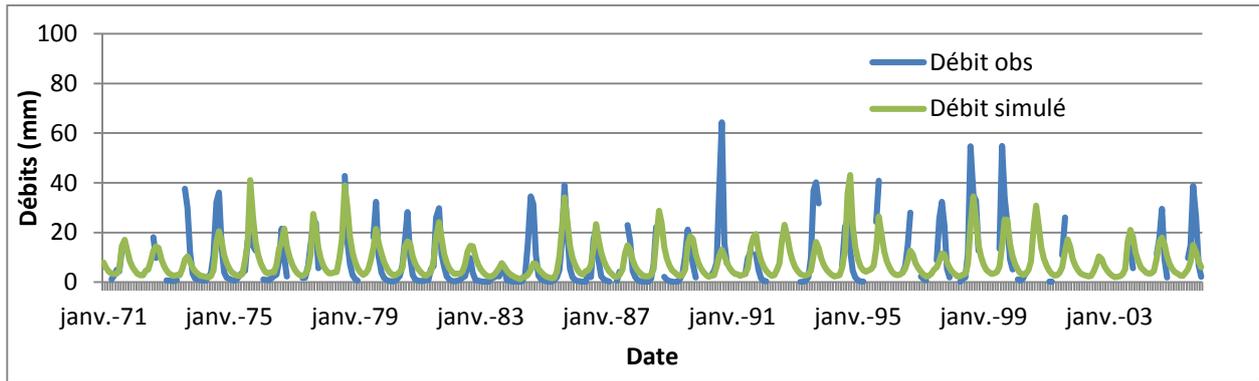


Figure 34: Simulation des débits à la station de Samadeni Janv1971 – Déc. 2005, NSE(%)=41.3

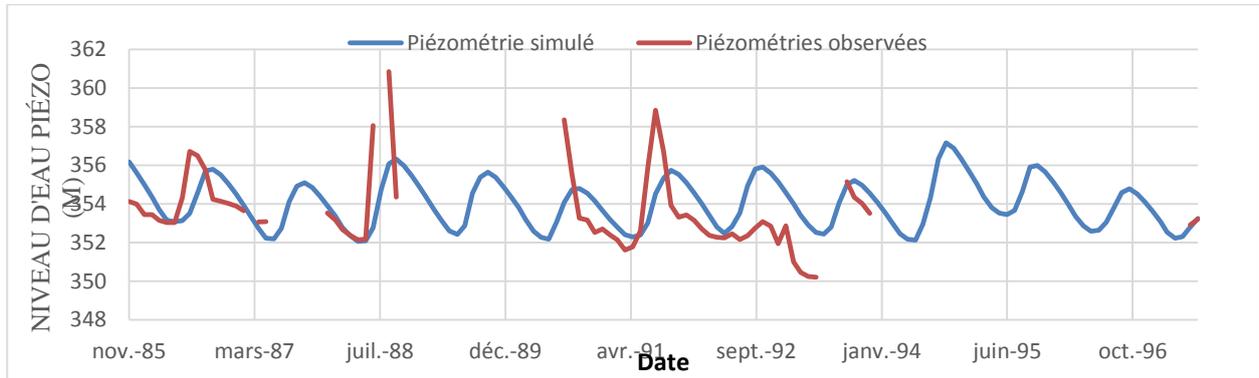


Figure 35: Comparaison piézométrie observée et simulée sur Samandeni

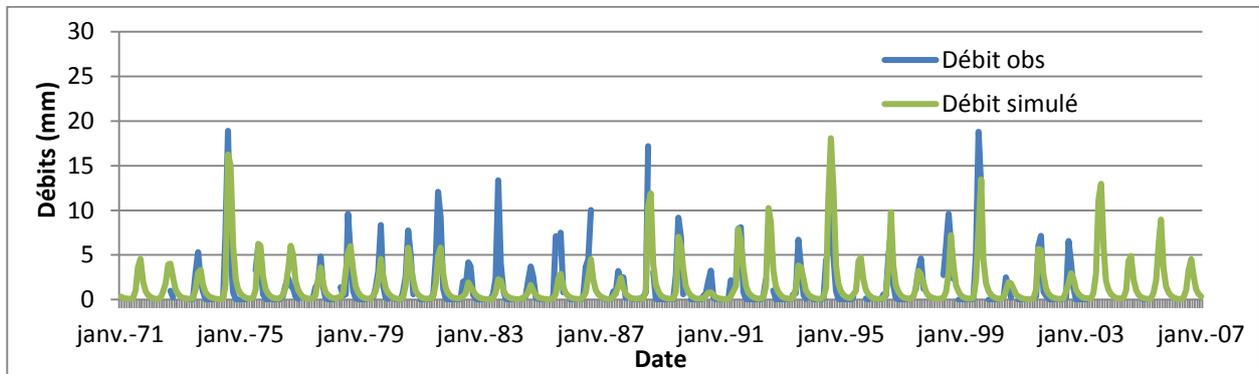


Figure 36: Simulation des débits à la station de Wayen Janv1971 – Déc. 2005, NSE(%)=58.3

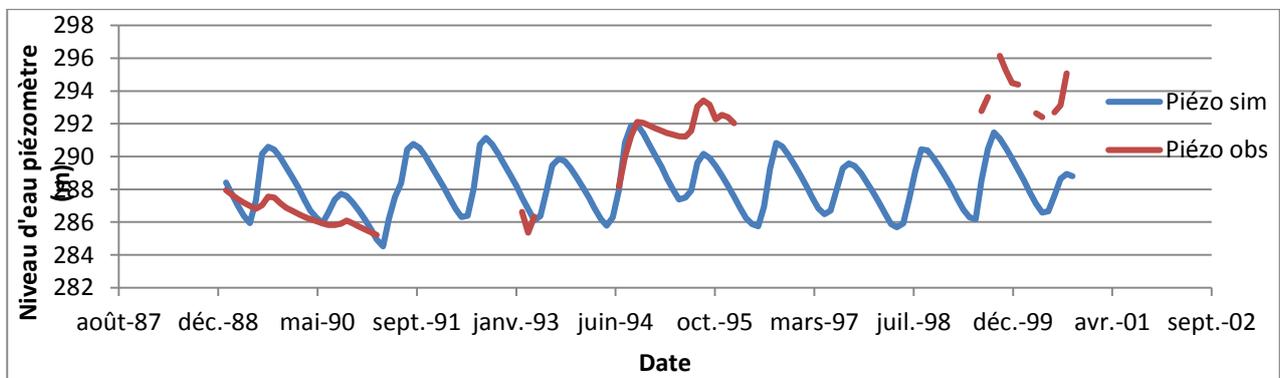


Figure 37 : Comparaison piézométrie observée et simulée sur Wayen

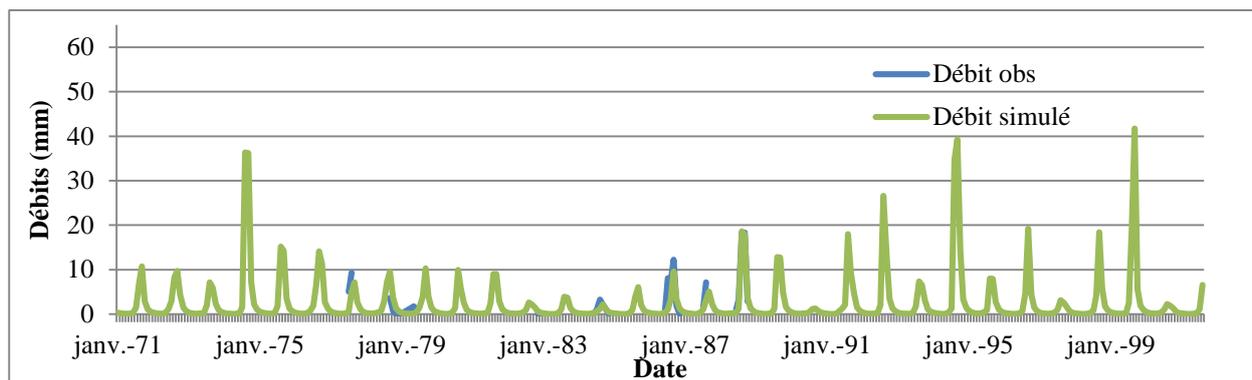


Figure 38: Simulation des débits à la station de Yakala Janv1971 – Déc. 2001, NSE(%)= 74.3

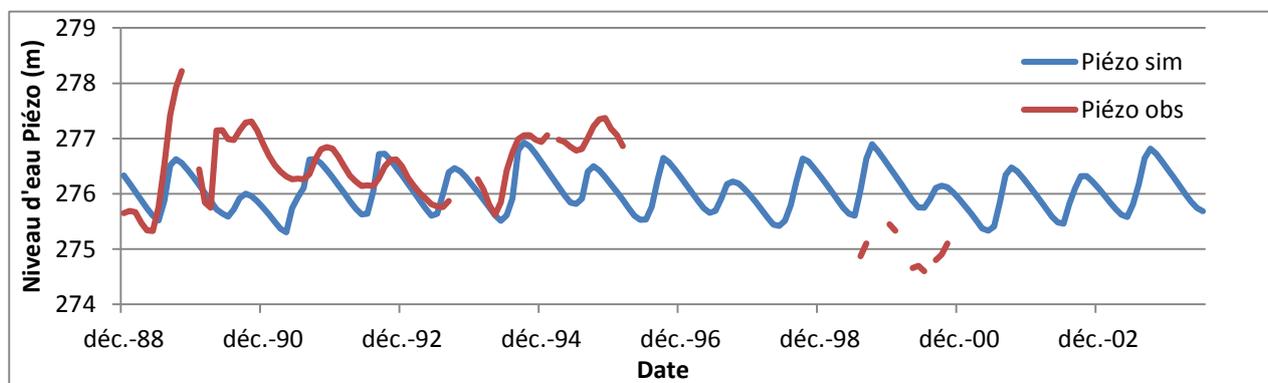


Figure 39 : Comparaison piézométrie observée et simulée sur Yakala

Annexe 3. b : Modèle GR2M

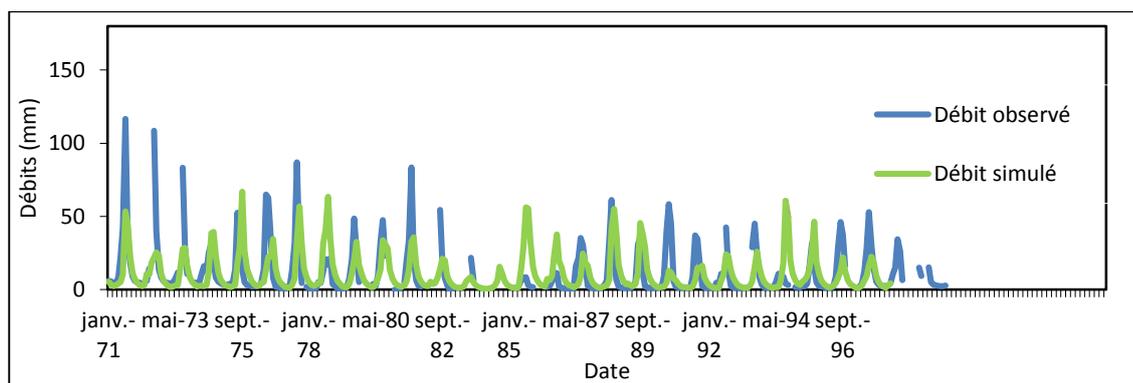


Figure 40 : Simulation des débits à la station de Diarabakoko entre Janv1971 et Dec 1998, NSE(%)=72.7

Analyse de quelques modèles hydrologiques comportant explicitement une prise en compte d'échange entre eaux de surface et eaux souterraines – Zoom sur le Burkina Faso

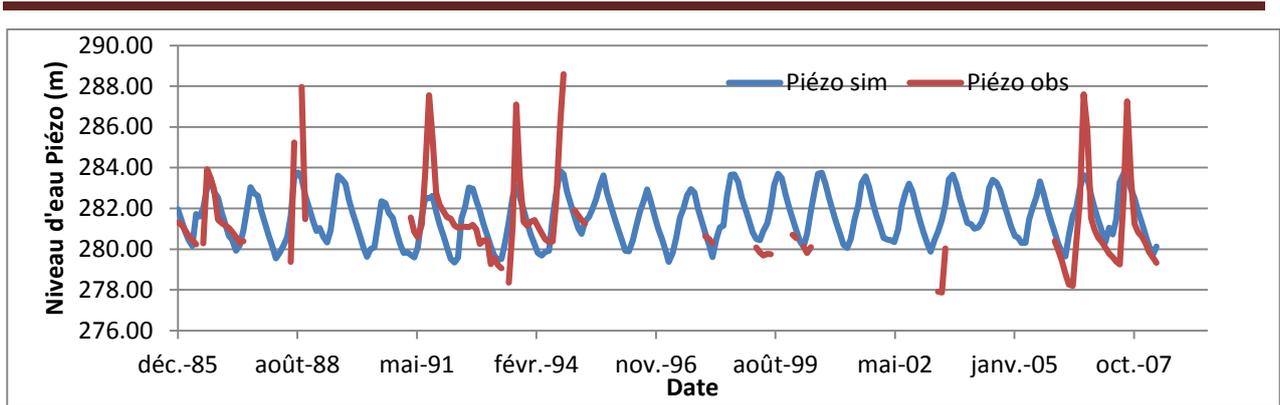


Figure 41 : Comparaison piézométrie observée et piézométrie simulée sur Diarabakoko

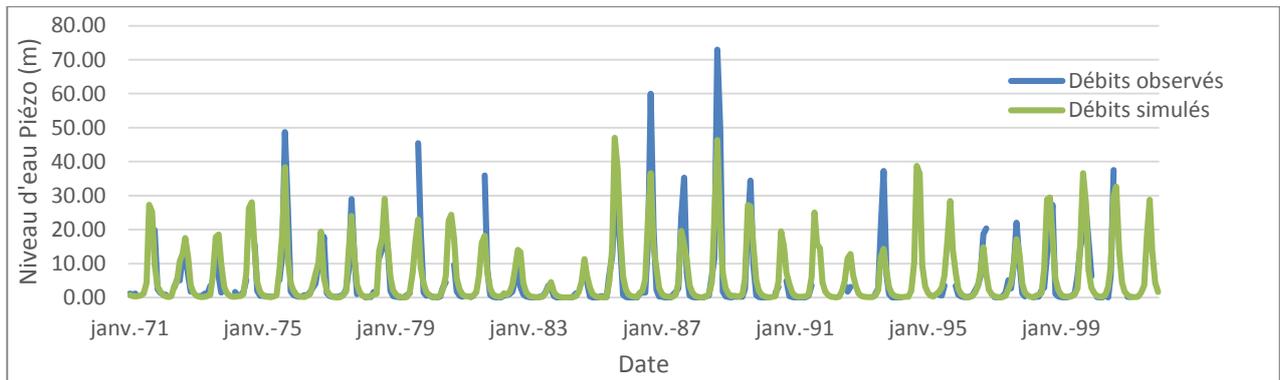


Figure 42 : Simulation des débits à la station de Folonzo

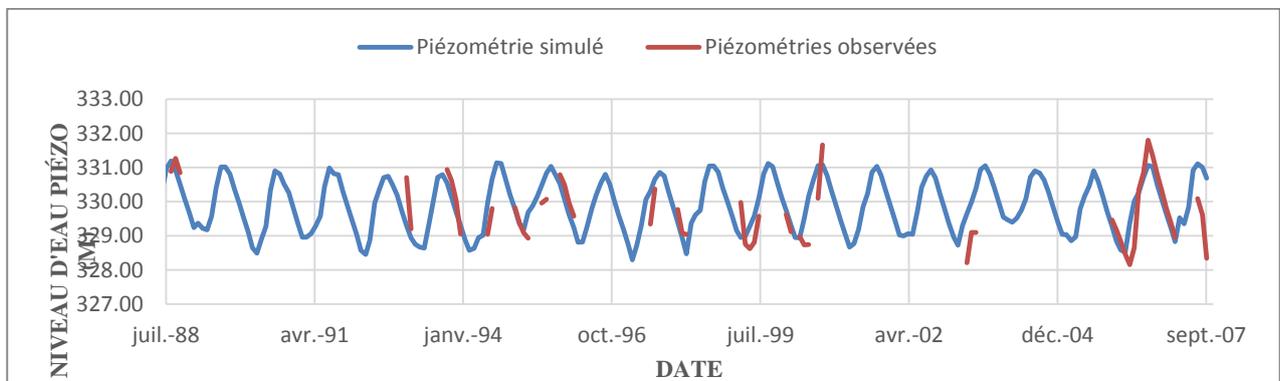


Figure 43 : Comparaison piézométrie observée et simulée sur Folonzo

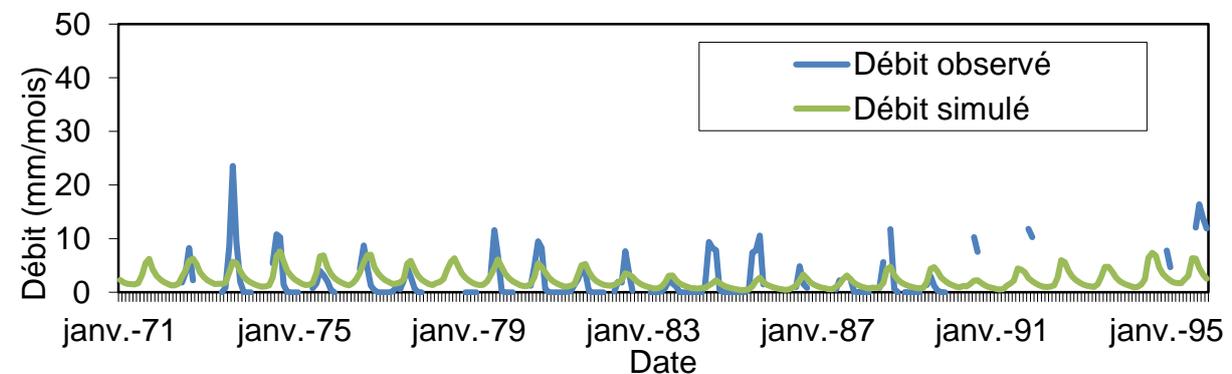


Figure 44 : Simulation des débits à la station de Niagho

Analyse de quelques modèles hydrologiques comportant explicitement une prise en compte d'échange entre eaux de surface et eaux souterraines – Zoom sur le Burkina Faso

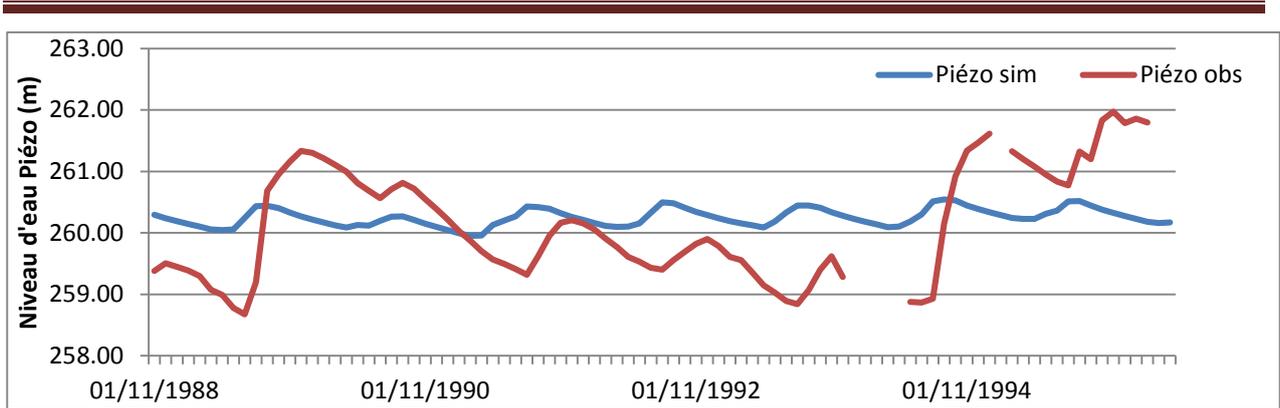


Figure 45: Comparaison piézométrie observée et simulée sur Niagho

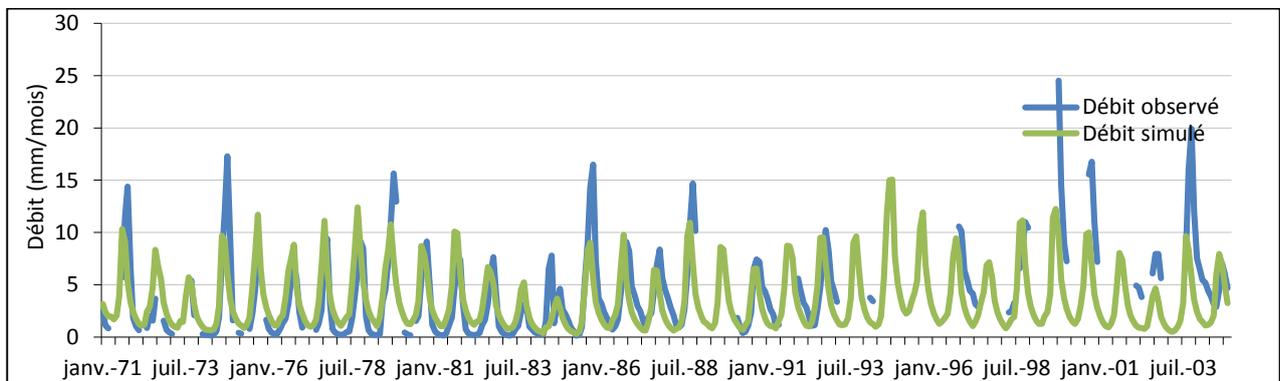


Figure 46: Simulation des débits sur Nwokuy

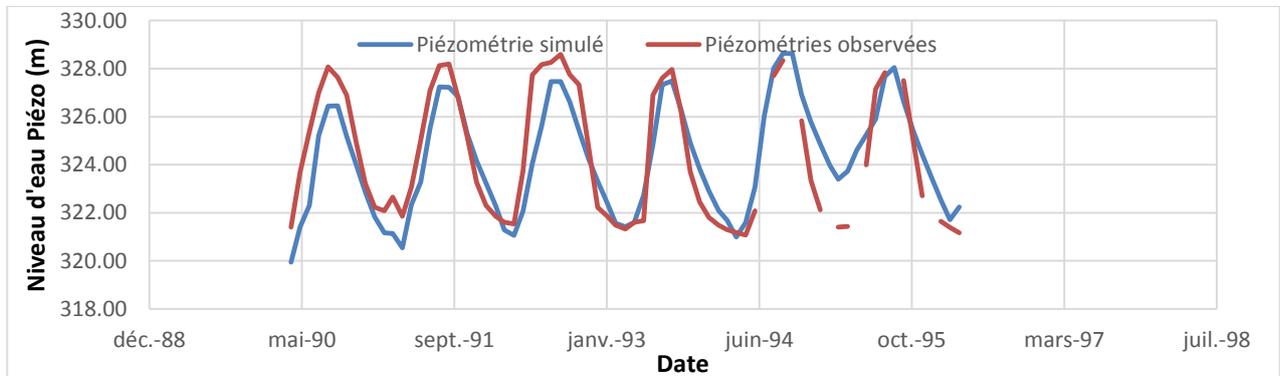


Figure 47 : Comparaison piézométrie observée et simulée sur Nwokuy

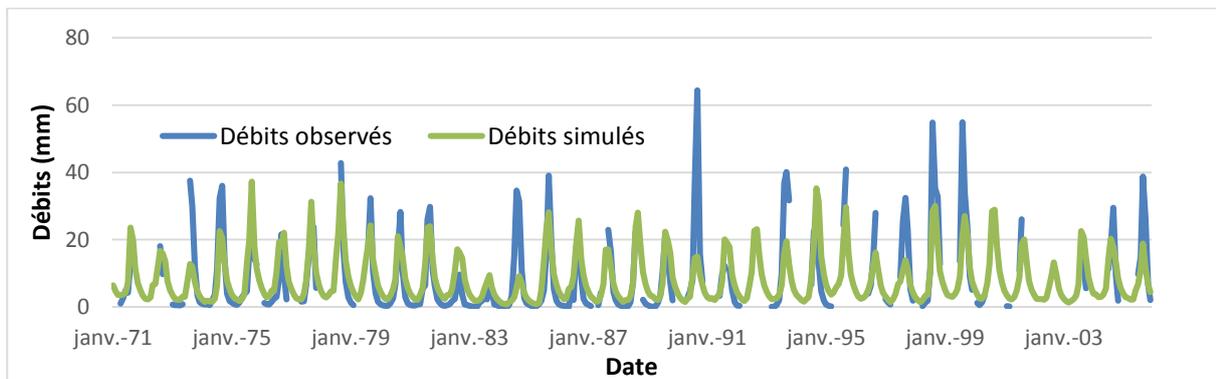


Figure 48 : Simulation des débits sur Samandeni

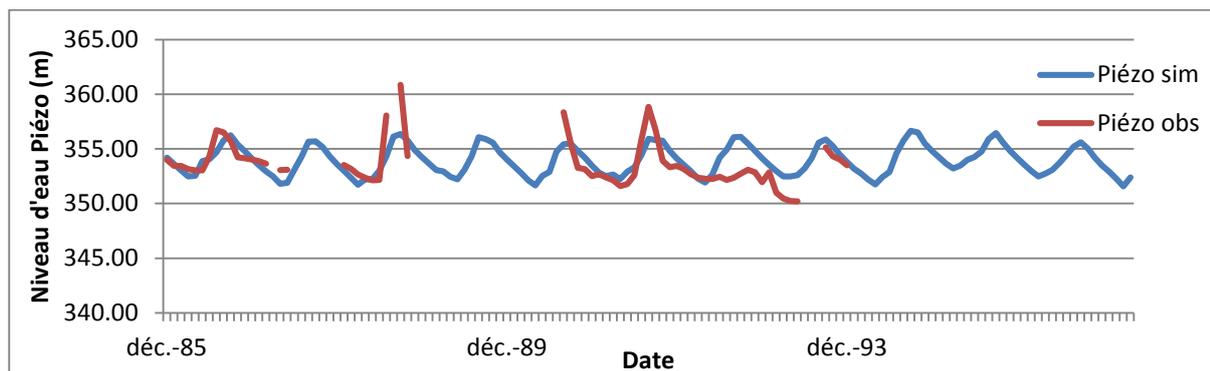


Figure 49 : Comparaison piézométrie observée et simulée sur Samandeni

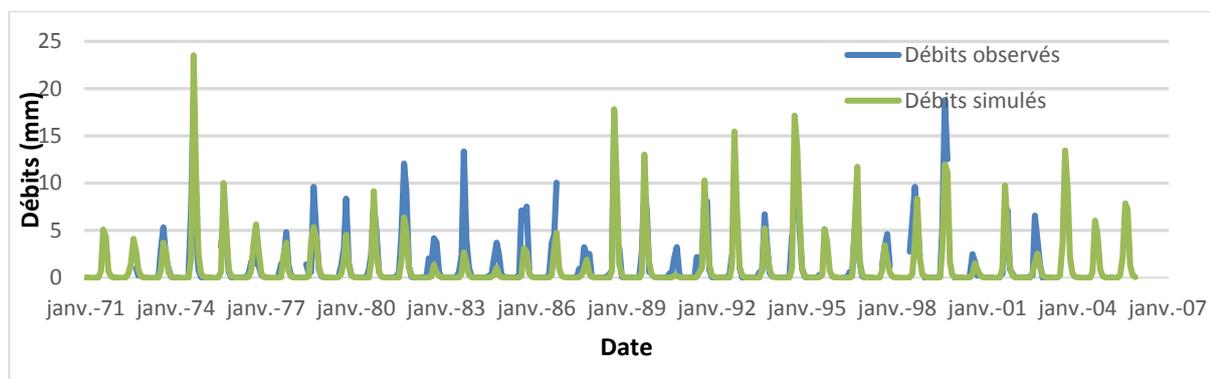


Figure 50 : Simulation des débits sur Wayen

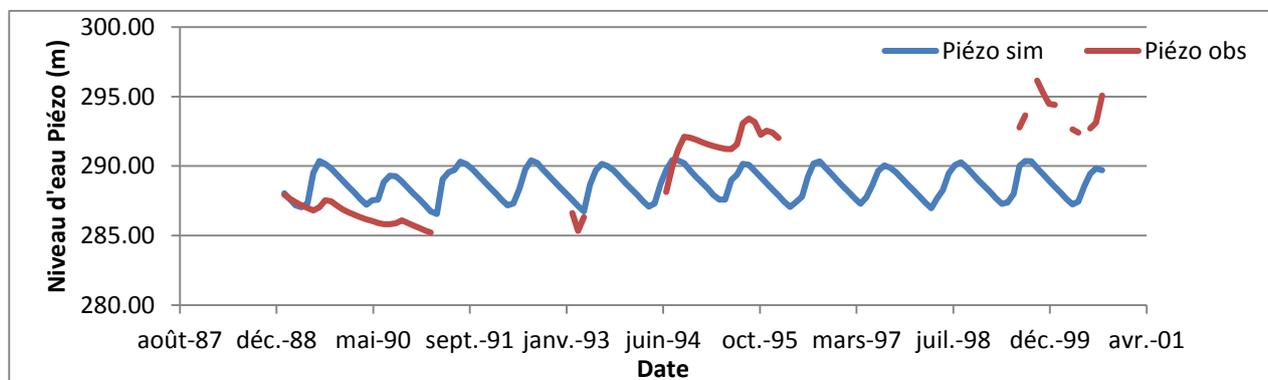


Figure 51 : Comparaison piézométrie observée et simulée sur Wayen

Analyse de quelques modèles hydrologiques comportant explicitement une prise en compte d'échange entre eaux de surface et eaux souterraines – Zoom sur le Burkina Faso

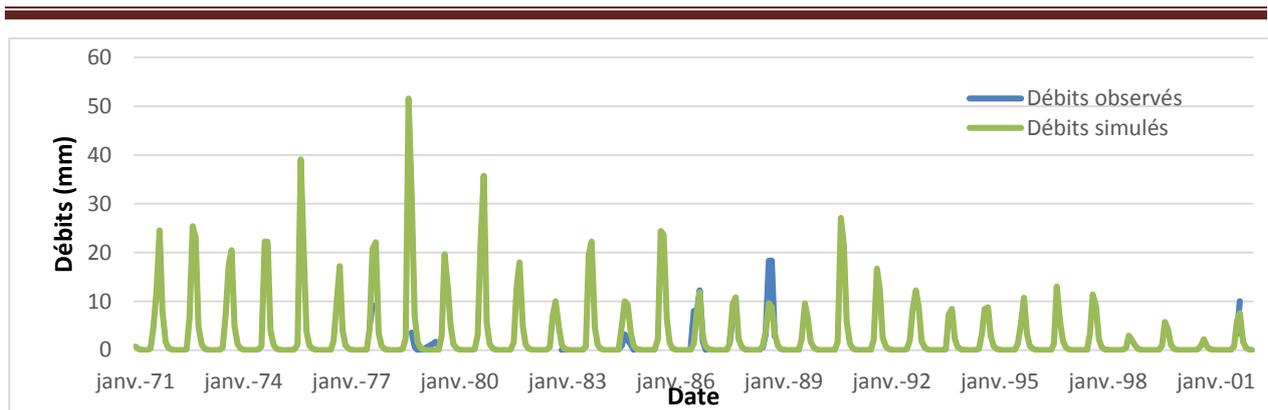


Figure 52 : Simulation des débits sur Yakala

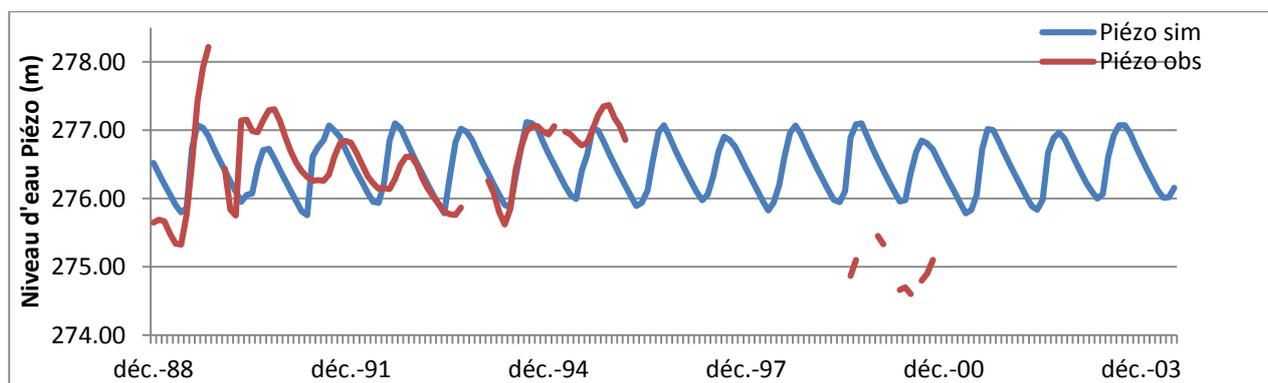


Figure 53 : Comparaison piézométrie observée et simulée sur Yakala

Annexe 3. c : Modèle SMAP

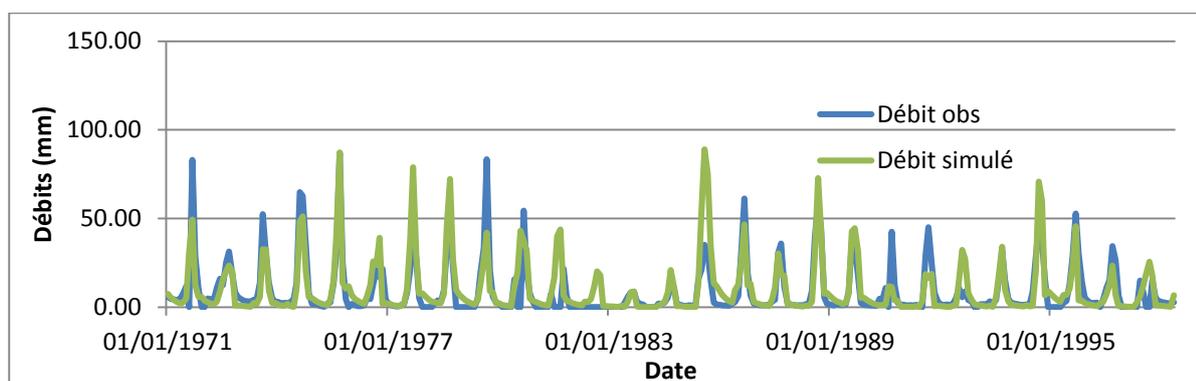


Figure 54: Simulation des débits à la station de Diarabakoko entre Janv1971 et Dec 1998, NSE(%)=70.3

Analyse de quelques modèles hydrologiques comportant explicitement une prise en compte d'échange entre eaux de surface et eaux souterraines – Zoom sur le Burkina Faso

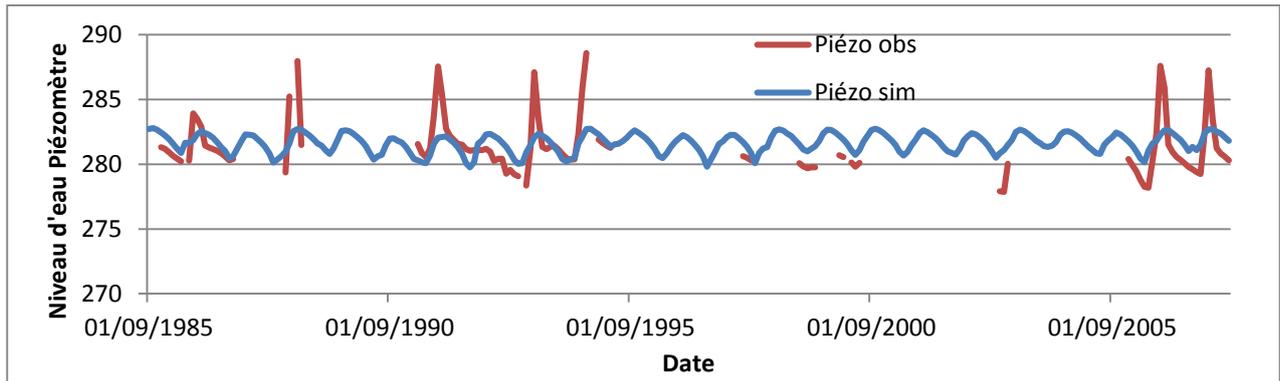


Figure 55 : Comparaison piézométrie observée et piézométrie simulée sur Diarabakoko

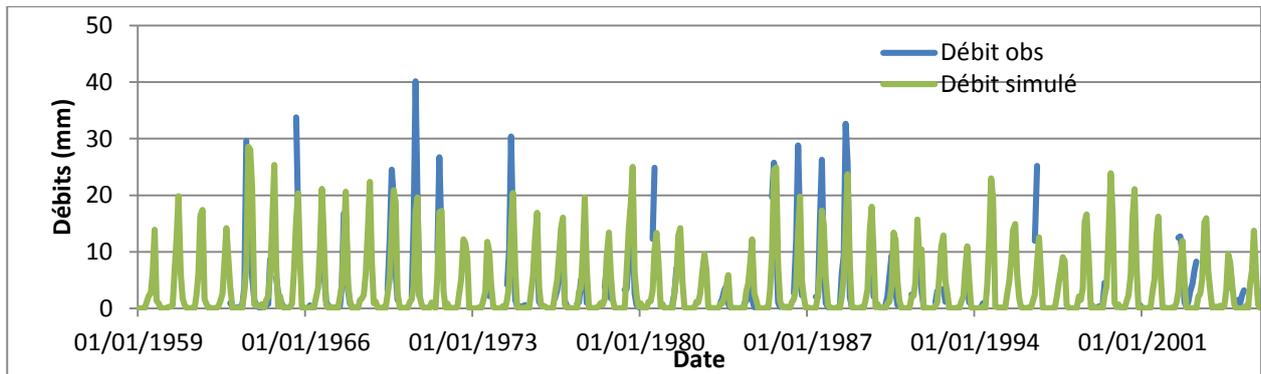


Figure 56 : Simulation des débits à la station de Diebougou entre Janv1971 et Dec 2005, NSE(%)=41.3

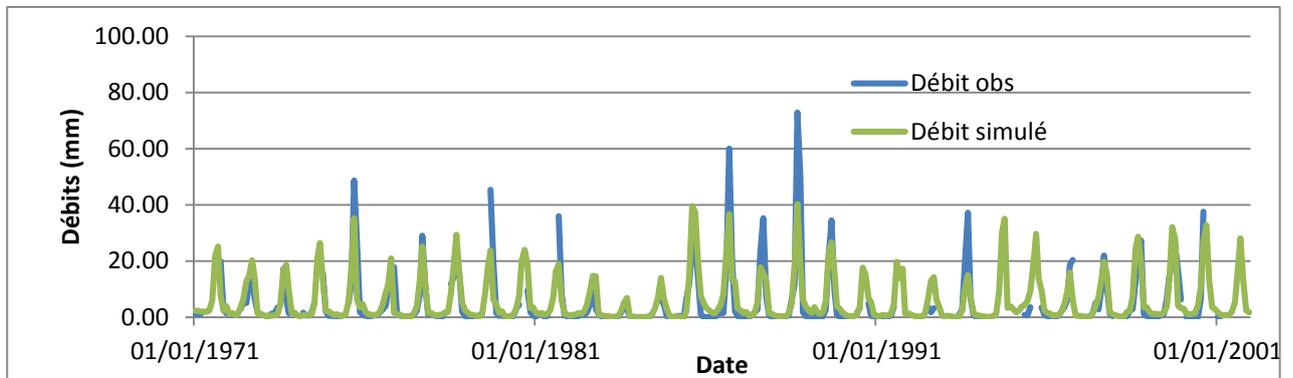


Figure 57 : Simulation des débits à la station de folonzo

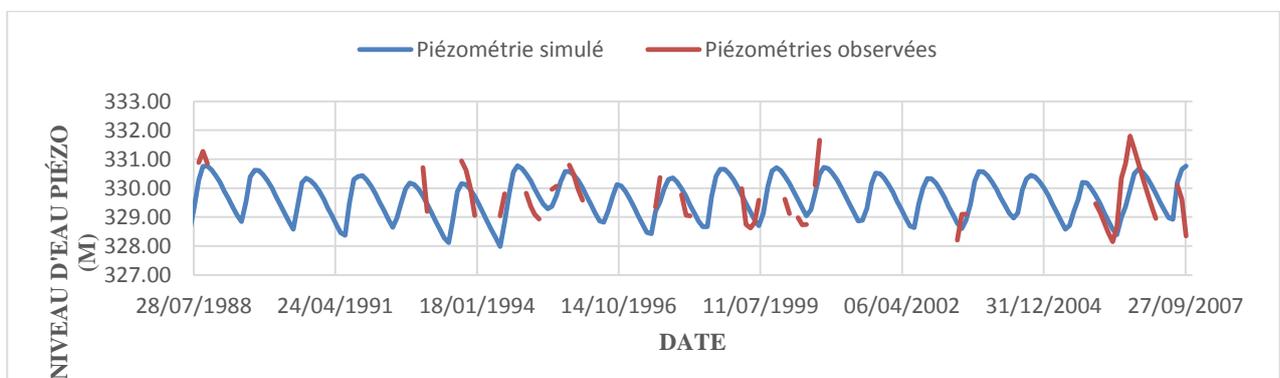


Figure 58 : Comparaison piézométrie observée et simulée sur Folonzo

Analyse de quelques modèles hydrologiques comportant explicitement une prise en compte d'échange entre eaux de surface et eaux souterraines – Zoom sur le Burkina Faso

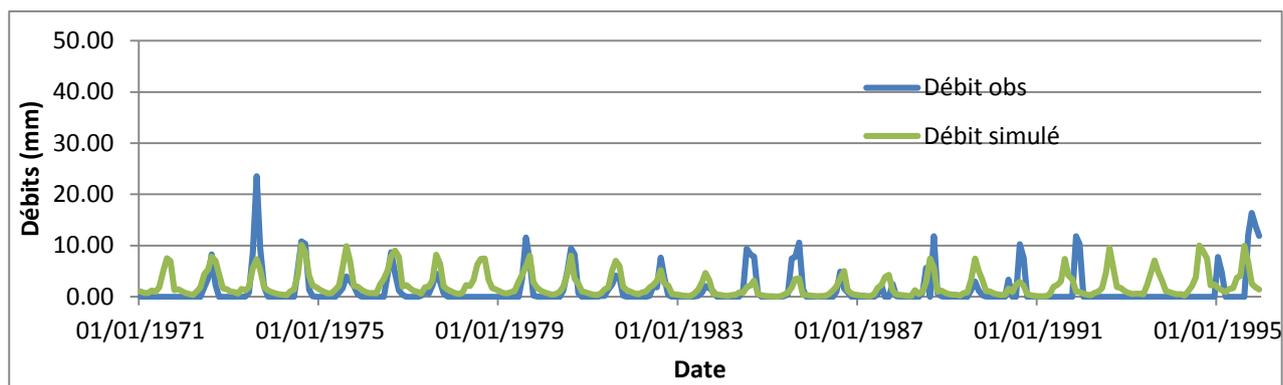


Figure 59: Simulation des débits sur Niagho

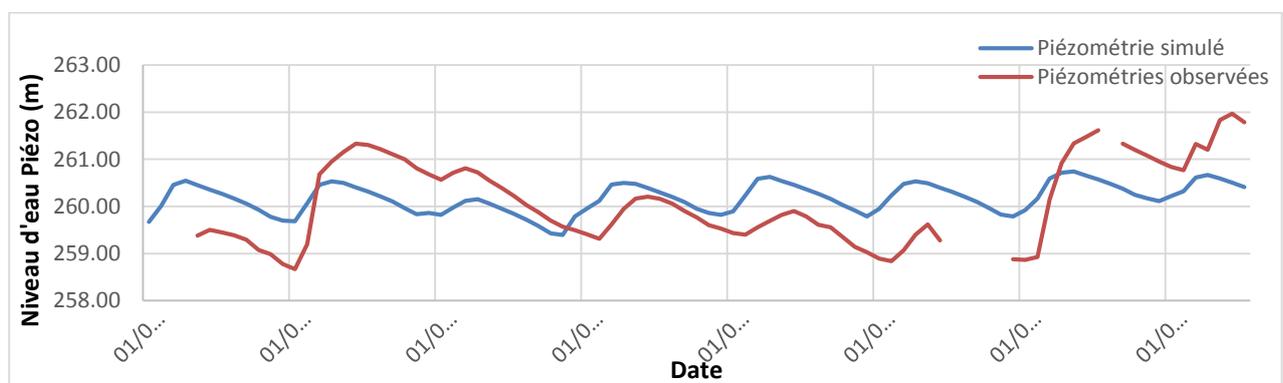


Figure 60 : Comparaison piézométrie observée et simulée sur Niagho

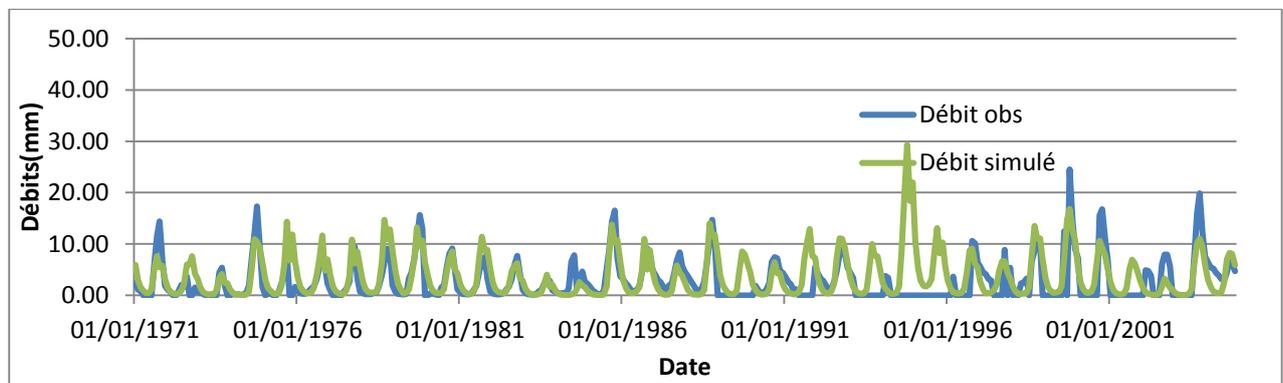


Figure 61: Simulation des débits à la station de Nwokuy

Analyse de quelques modèles hydrologiques comportant explicitement une prise en compte d'échange entre eaux de surface et eaux souterraines – Zoom sur le Burkina Faso

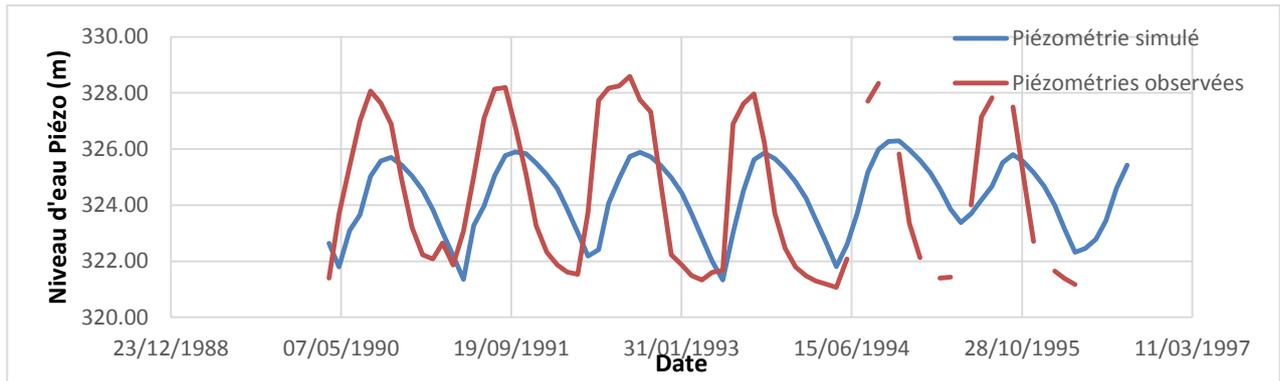


Figure 62 : Comparaison piézométrie observée et simulée sur Nwokuy

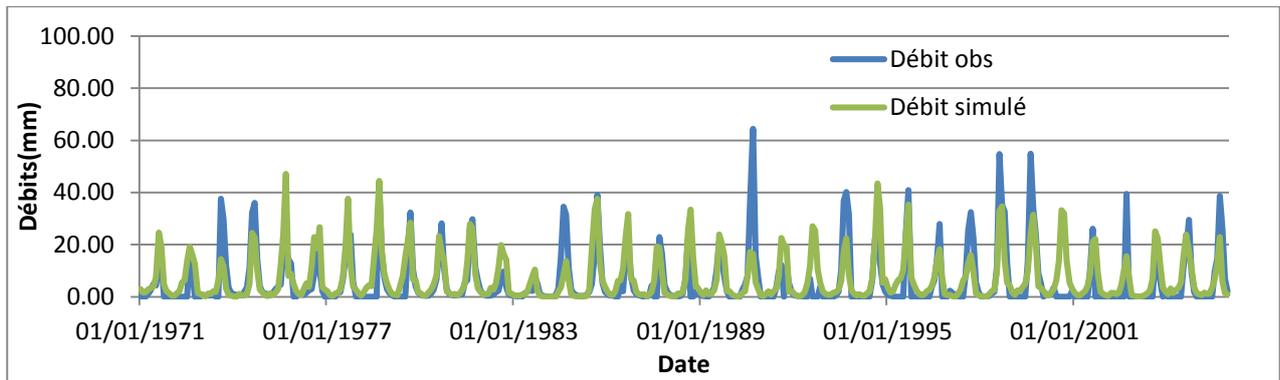


Figure 63 : Simulation des débits à la station de Samandeni

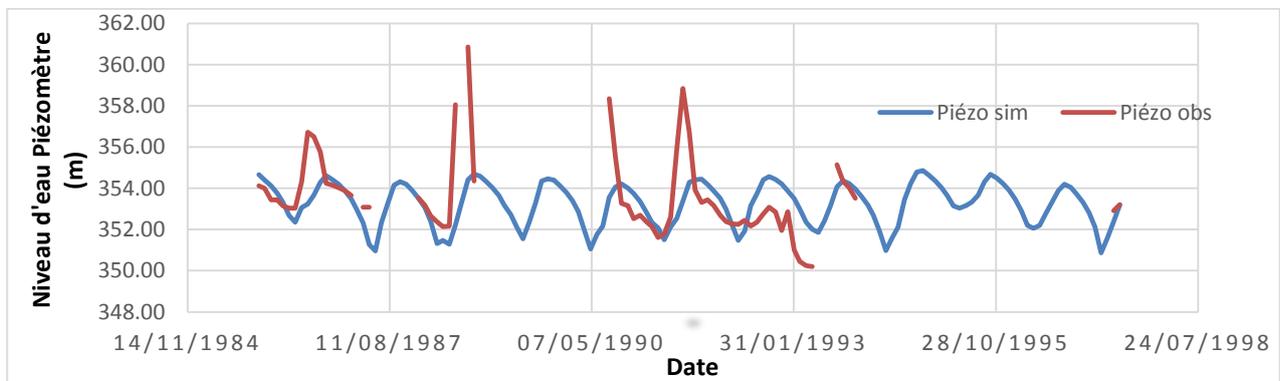


Figure 64 : Comparaison piézométrie observée et simulée sur Samandeni

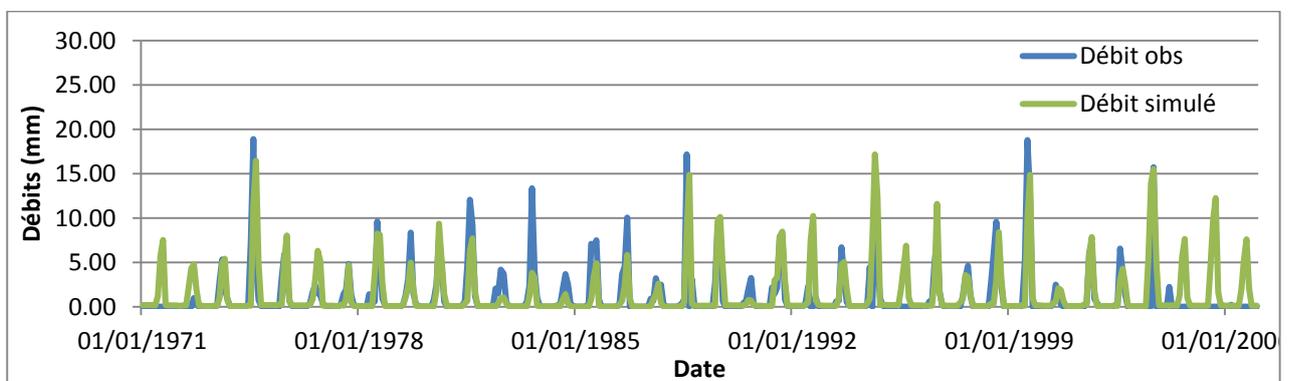


Figure 65 : Simulation des débits à la station de Wayen

Analyse de quelques modèles hydrologiques comportant explicitement une prise en compte d'échange entre eaux de surface et eaux souterraines – Zoom sur le Burkina Faso

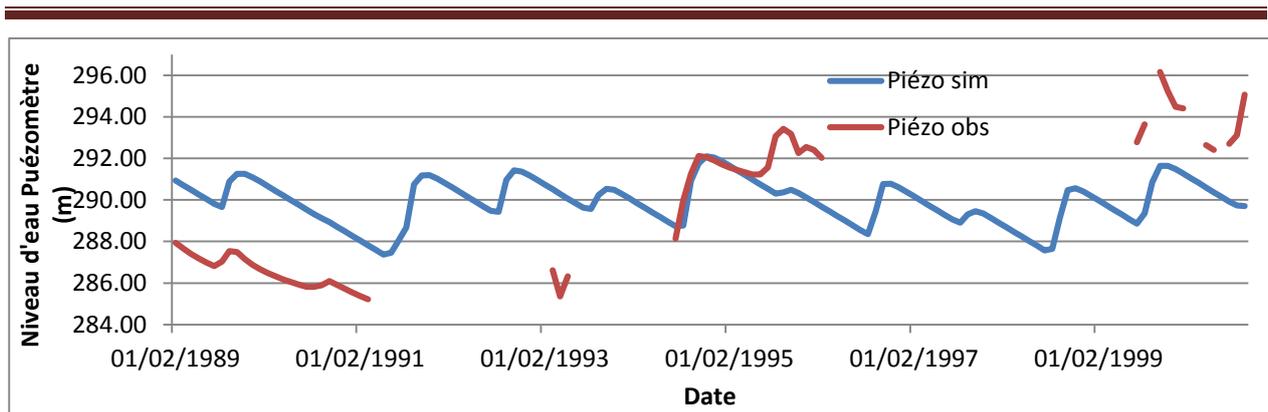


Figure 66 : Comparaison piézométrie observée et simulée sur Wayen

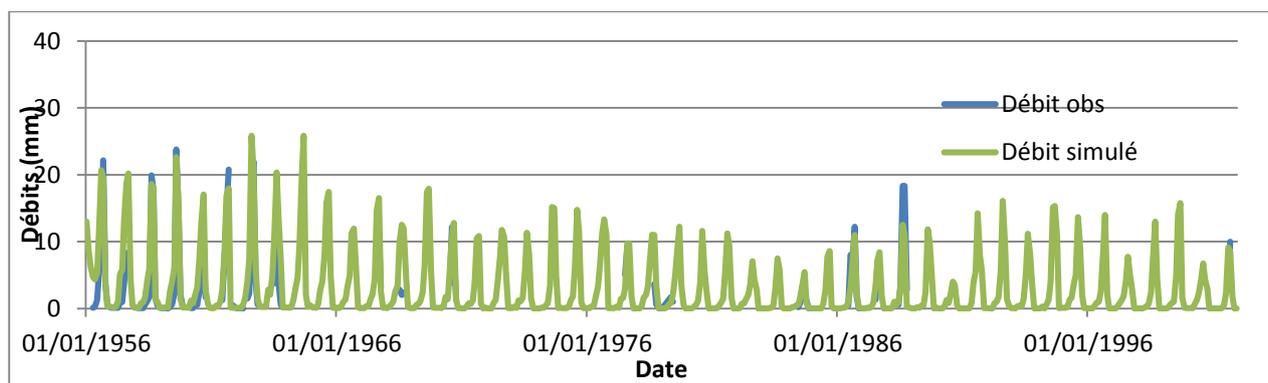


Figure 67 : Simulation des debits à la station de Yakala

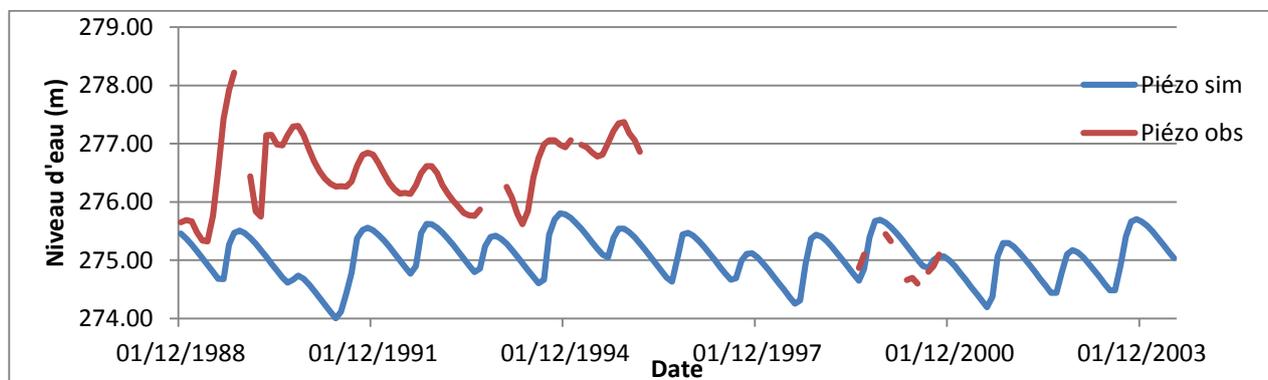


Figure 68 : Comparaison piézométrie observée et simulée sur Yakala

**Analyse de quelques modèles hydrologiques comportant explicitement une prise en compte d'échange entre eaux de surface et eaux souterraines
– Zoom sur le Burkina Faso**

Annexe 4 : Tableaux des écarts entre piézométrie simulée et observée

Tableau 13 : Pourcentage d'écart entre les niveaux piézométriques, Dirabakoko

Modèles	ABCD			GR2M			SMAP			GR4J		
	Niveau Piézométrie Observée	Niveau Piézométrie simulée	Ecart									
Valeur minimale	277.87	279.70	0.65%	277.87	279.34	0.52%	277.87	279.77	0.68%	Pas de données	-	
Valeur maximale	288.59	284.53	1.43%	288.59	283.84	1.67%	288.59	282.75	2.06%		-	-

Tableau 14 : Pourcentage d'écart entre les niveaux piézométriques, Folonzo

Modèles	ABCD			GR2M			SMAP			GR4J		
	Niveau Piézométrie Observée	Niveau Piézométrie simulée	Ecart									
Valeur minimale	328.13	328.33	0.06%	328.13	328.29	0.05%	328.13	327.99	0.04%	328.13	328.40	0.56%
Valeur maximale	331.89	331.60	0.09%	331.89	331.19	0.21%	331.89	330.77	0.34%	331.89	333.81	0.58%

**Analyse de quelques modèles hydrologiques comportant explicitement une prise en compte d'échange entre eaux de surface et eaux souterraines
– Zoom sur le Burkina Faso**

Tableau 15 : Pourcentage d'écart entre les niveaux piézométriques, Niagho

Modèles	ABCD			GR2M			SMAP			GR4J		
	Niveau Piézométrie Observée	Niveau Piézométrie simulée	Ecart									
Valeur minimale	257.61	259.53	0.74%	257.61	259.95	0.90%	257.61	259.39	0.69%	257.61	259.76	0.83%
Valeur maximale	261.97	260.42	0.60%	261.97	260.55	0.55%	261.97	260.74	0.47%	261.97	259.92	0.79%

Tableau 16 : Pourcentage d'écart entre les niveaux piézométriques, Nwokuy

Modèles	ABCD			GR2M			SMAP			GR4J		
	Niveau Piézométrie Observée	Niveau Piézométrie simulée	Ecart									
Valeur minimale	321.07	322.71	0.51%	321.07	319.94	0.35%	321.07	321.33	0.08%	321.07	351.34	8.62%
Valeur maximale	328.59	327.08	0.46%	328.59	328.64	0.01%	328.59	326.29	0.70%	328.75	356.63	7.82%

**Analyse de quelques modèles hydrologiques comportant explicitement une prise en compte d'échange entre eaux de surface et eaux souterraines
– Zoom sur le Burkina Faso**

Tableau 17 : Pourcentage d'écart entre les niveaux piézométriques, Samandeni

Modèles	ABCD			GR2M			SMAP			GR4J		
	Niveau Piézométrie Observée	Niveau Piézométrie simulée	Ecart	Niveau Piézométrie Observée	Niveau Piézométrie simulée	Ecart	Niveau Piézométrie Observée	Niveau Piézométrie simulée	Ecart	Niveau Piézométrie Observée	Niveau Piézométrie simulée	Ecart
Valeur minimale	350.20	352.06	0.53%	350.20	351.59	0.39%	350.20	350.87	0.19%	350.12	352.92	0.79%
Valeur maximale	360.86	357.17	1.5%	360.86	356.67	1.18	360.86	354.42	1.82%	352.76	356.99	1.19%

Tableau 18 : Pourcentage d'écart entre les niveaux piézométriques, Wayen

Modèles	ABCD			GR2M			SMAP			GR4J		
	Niveau Piézométrie Observée	Niveau Piézométrie simulée	Ecart	Niveau Piézométrie Observée	Niveau Piézométrie simulée	Ecart	Niveau Piézométrie Observée	Niveau Piézométrie simulée	Ecart	Niveau Piézométrie Observée	Niveau Piézométrie simulée	Ecart
Valeur minimale	285.22	284.51	0.25%	285.22	286.55	0.46%	285.22	287.37	0.75%	285.15	300.32	5.05%
Valeur maximale	296.15	291.94	1.44%	296.15	290.43	1.97%	296.15	292.10	1.39%	296.15	306.65	3.43%

**Analyse de quelques modèles hydrologiques comportant explicitement une prise en compte d'échange entre eaux de surface et eaux souterraines
– Zoom sur le Burkina Faso**

Tableau 19 : Pourcentage d'écart entre les niveaux piézométriques, Yakala

Modèles	ABCD			GR2M			SMAP			GR4J		
	Niveau Piézométrie Observée	Niveau Piézométrie simulée	Ecart	Niveau Piézométrie Observée	Niveau Piézométrie simulée	Ecart	Niveau Piézométrie Observée	Niveau Piézométrie simulée	Ecart	Niveau Piézométrie Observée	Niveau Piézométrie simulée	Ecart
Valeur minimale	253.21	275.30	8.03%	253.21	275.76	8.18%	253.21	274.00	7.59%	253.62	275.98	8.10%
Valeur maximale	278.22	276.92	0.47%	278.22	277.12	0.40%	278.22	275.80	0.88%	278.22	276.21	0.73%

Tableau 20 : Pourcentage d'écart entre les niveaux piézométriques, Diébougou

Modèles	ABCD			GR2M			SMAP			GR4J		
	Niveau Piézométrie Observée	Niveau Piézométrie simulée	Ecart	Niveau Piézométrie Observée	Niveau Piézométrie simulée	Ecart	Niveau Piézométrie Observée	Niveau Piézométrie simulée	Ecart	Niveau Piézométrie Observée	Niveau Piézométrie simulée	Ecart
Valeur minimale	382.29	382.07	0.06%	382.29	382.56	0.07%	382.29	383.24	0.25%	Pas de données	-	-
Valeur maximale	385.31	384.35	0.25%	385.31	383.60	0.45%	385.31	384.25	0.28%		-	-

Annexe 5 : Représentation de l'évolution des nappes en réponse aux précipitations

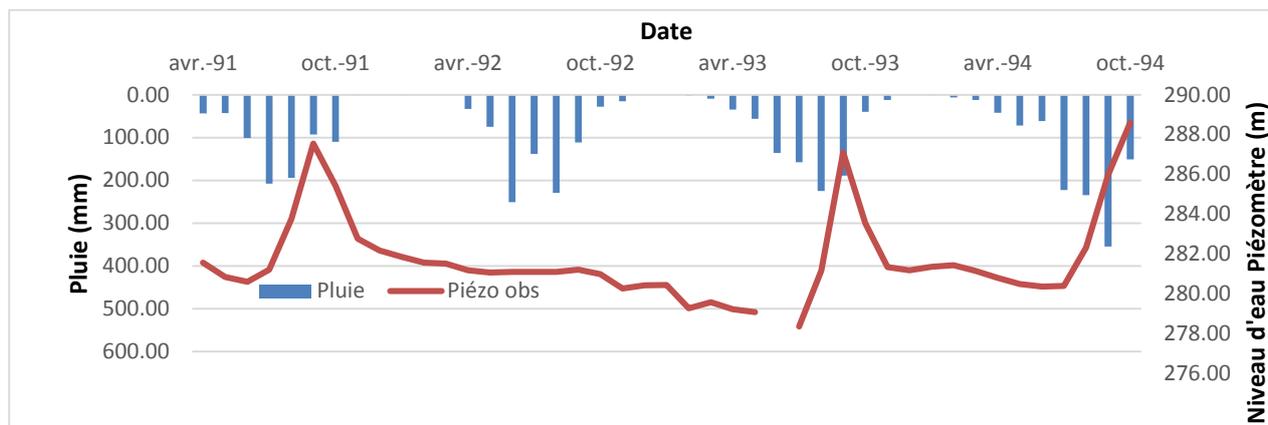


Figure 69 : Précipitations mensuelles sur le bassin de Diarabakoko, Période 1991 - 1994, fluctuation mensuelle du niveau de la nappe

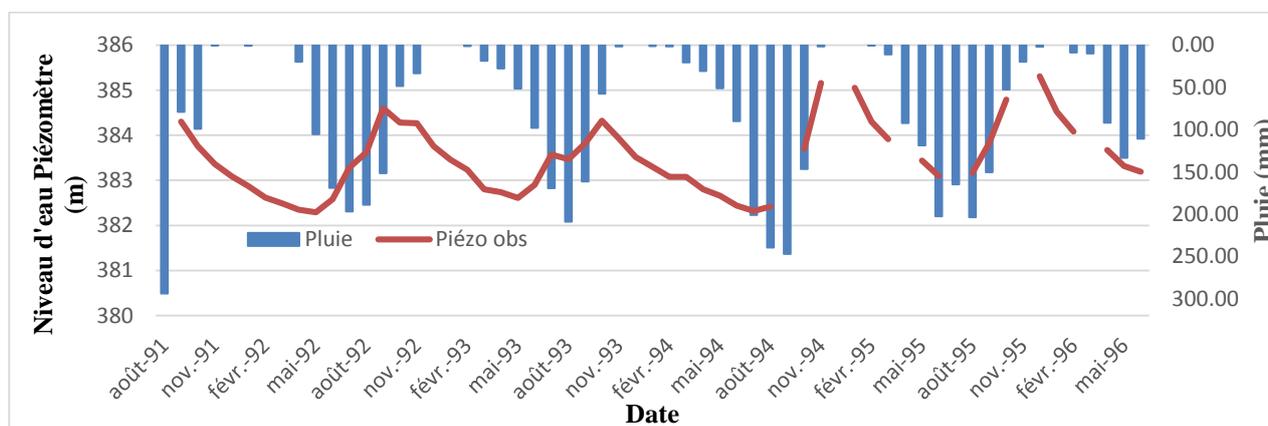


Figure 70 : Précipitations mensuelles sur le bassin de Diebouougou, Période 1991 - 1996, fluctuation mensuelle du niveau de la nappe

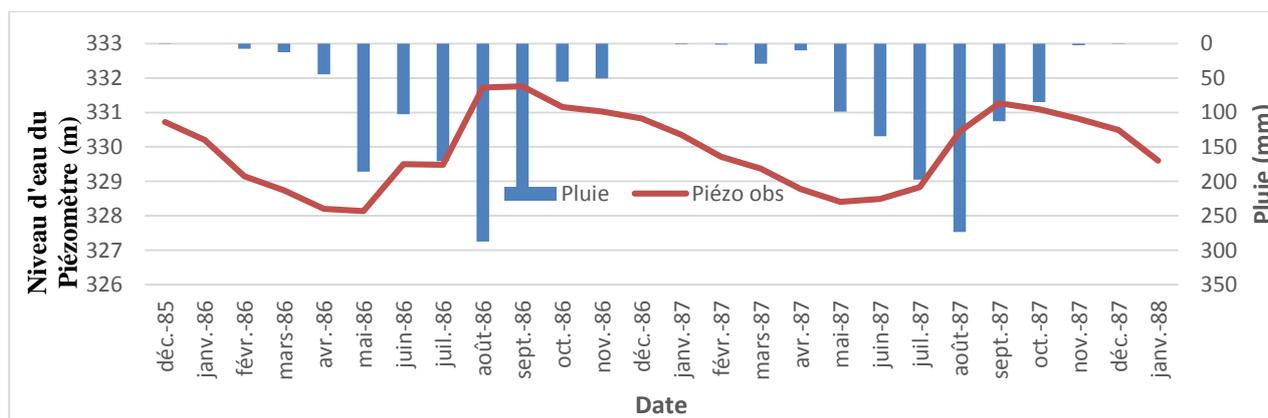


Figure 71 : Précipitations mensuelles sur le bassin de Folonzo, Période 1985 - 1988, fluctuation mensuelle du niveau de la nappe

Analyse de quelques modèles hydrologiques comportant explicitement une prise en compte d'échange entre eaux de surface et eaux souterraines – Zoom sur le Burkina Faso

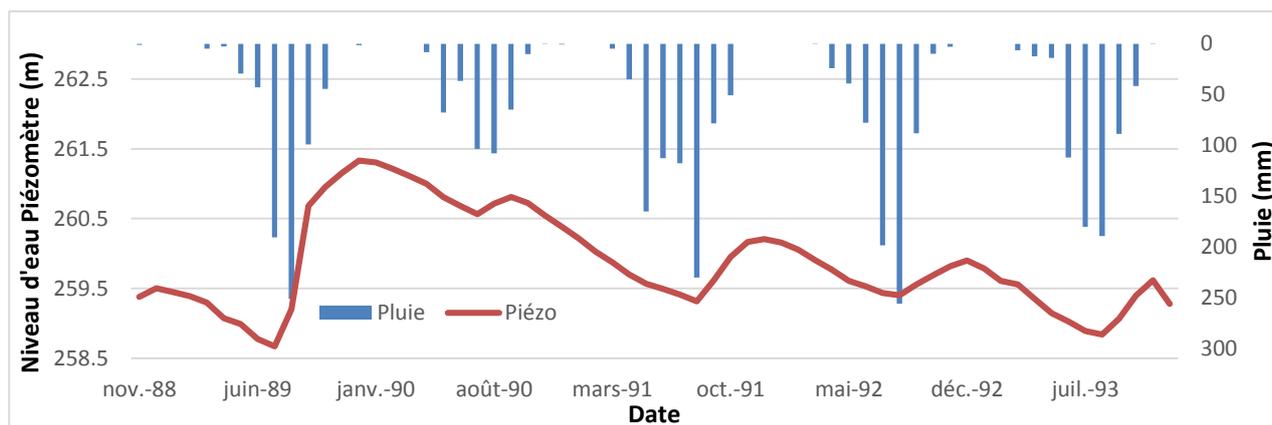


Figure 72 : Précipitations mensuelles sur le bassin de Niagho, Période 1988 - 1993, fluctuation mensuelle du niveau de la nappe

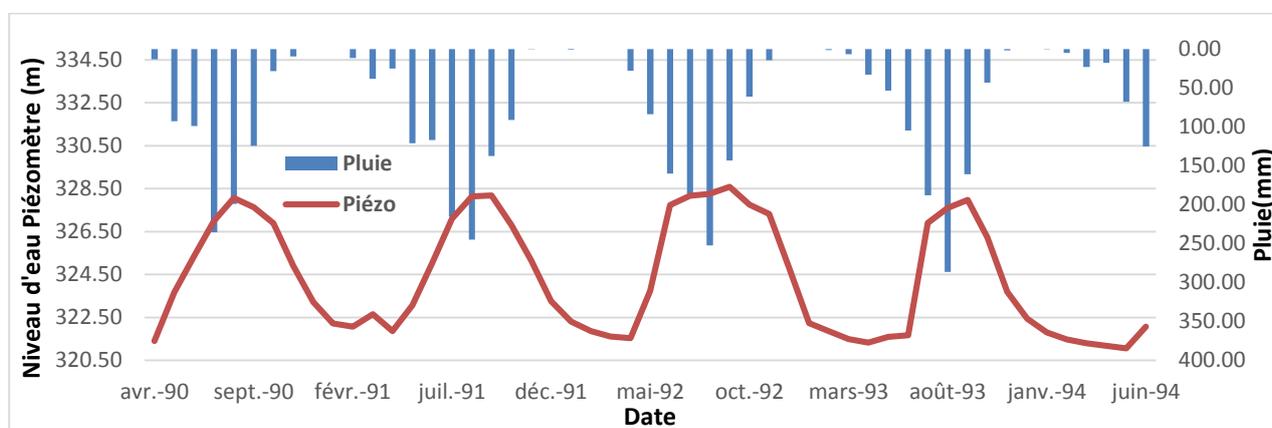


Figure 73 : Précipitations mensuelles sur le bassin de Nwoky, Période 1990 - 1994, fluctuation mensuelle du niveau de la nappe

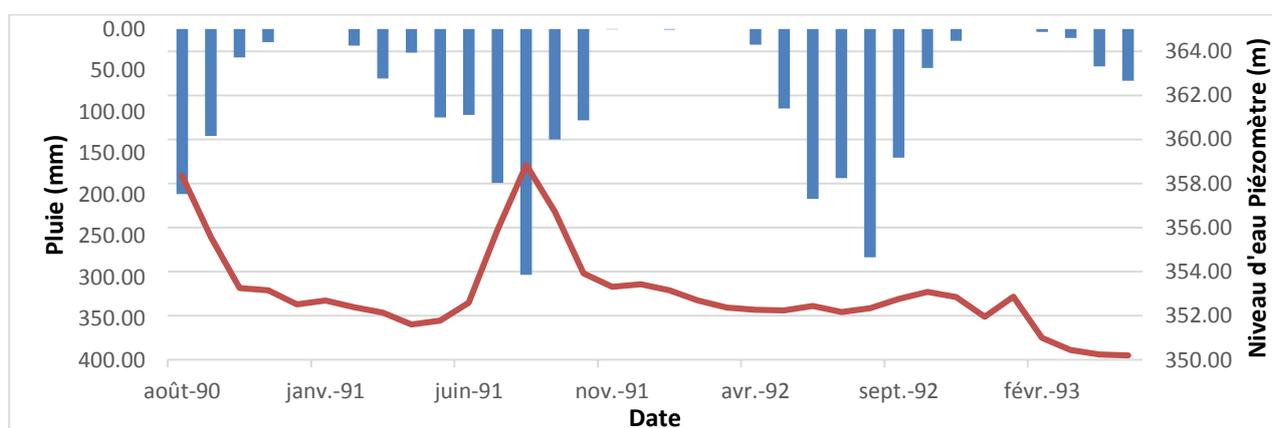


Figure 74 : Précipitations mensuelles sur le bassin de Samandeni, Période 1990 - 1993, fluctuation mensuelle du niveau de la nappe

Analyse de quelques modèles hydrologiques comportant explicitement une prise en compte d'échange entre eaux de surface et eaux souterraines – Zoom sur le Burkina Faso

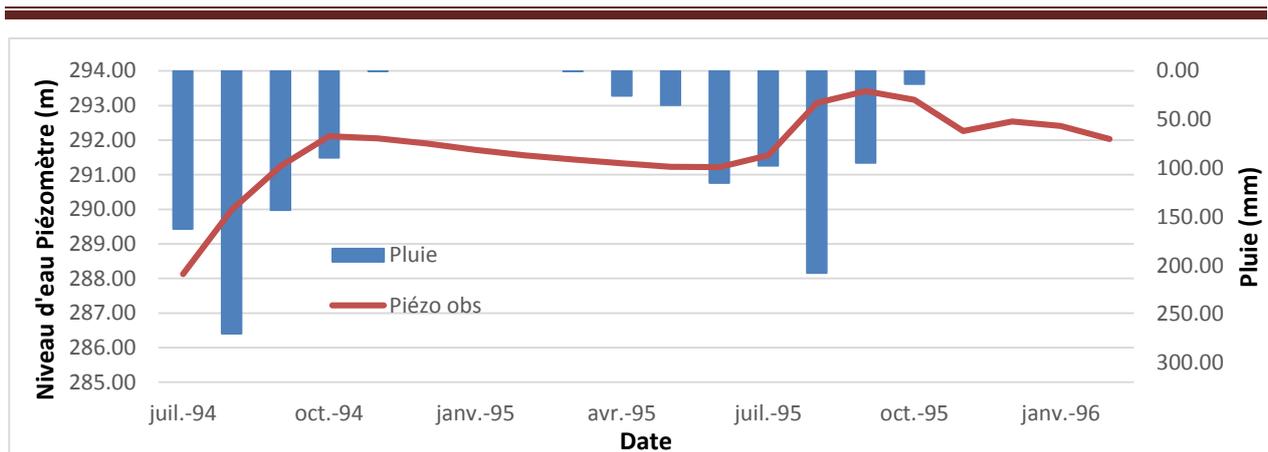


Figure 75 : Précipitations mensuelles sur le bassin de Wayen, Période 1994 - 1996, fluctuation mensuelle du niveau de la nappe

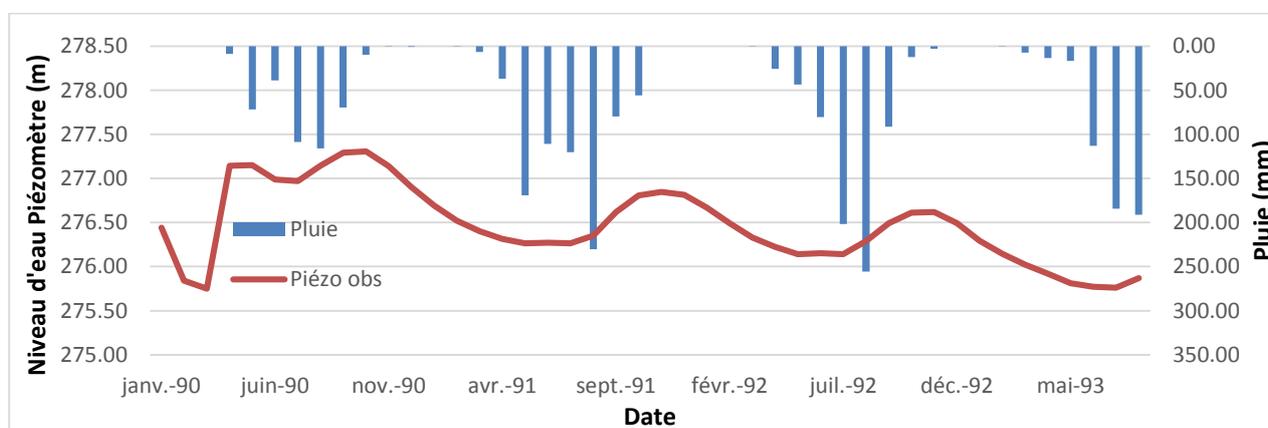


Figure 76 : Précipitations mensuelles sur le bassin de Yakala, Période 1990 - 1993, fluctuation mensuelle du niveau de la nappe

Annexe 6 : Comparaison modèles mensuels

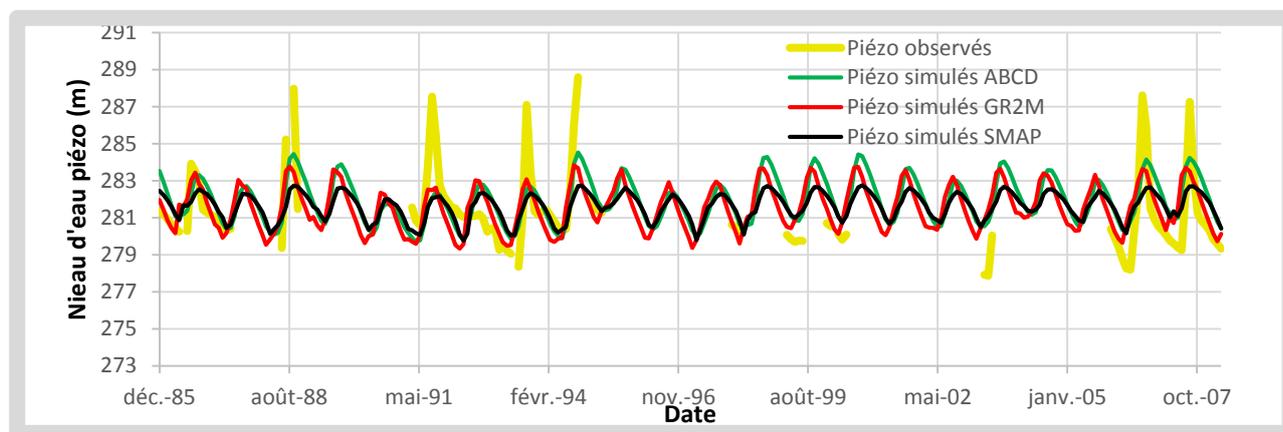


Figure 77 : Comparaison de l'évolution de la piézométrie entre les modèles mensuels, bassin de Diarabakoko

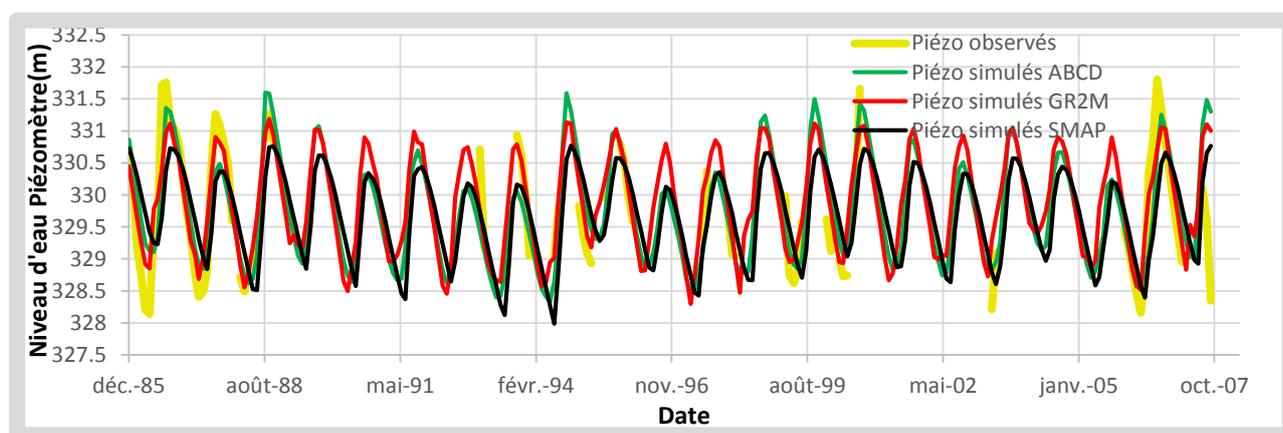


Figure 78 : Comparaison de l'évolution de la piézométrie entre les modèles mensuels, bassin de Folonzo

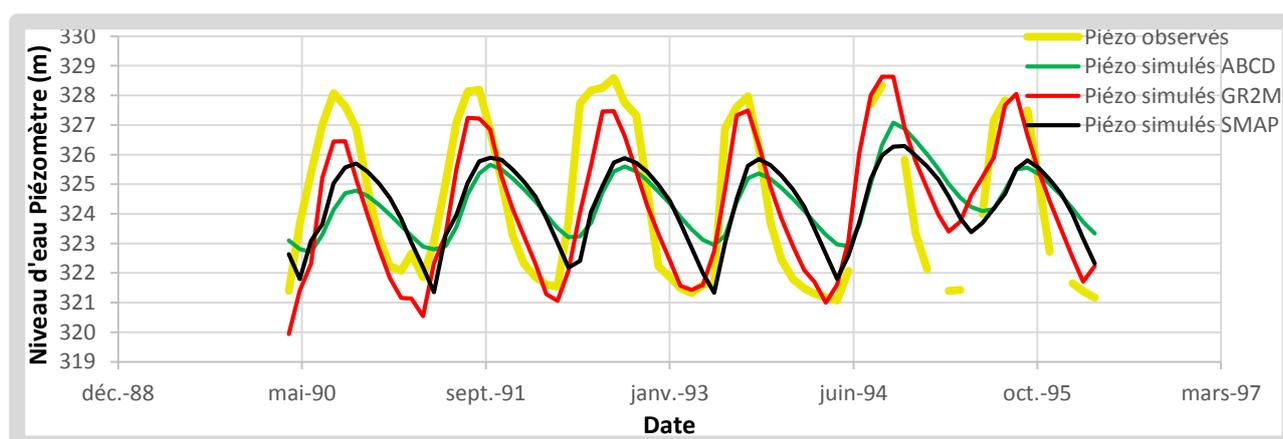


Figure 79 : Comparaison de l'évolution de la piézométrie entre les modèles mensuels, bassin de Nwokuy

Analyse de quelques modèles hydrologiques comportant explicitement une prise en compte d'échange entre eaux de surface et eaux souterraines – Zoom sur le Burkina Faso

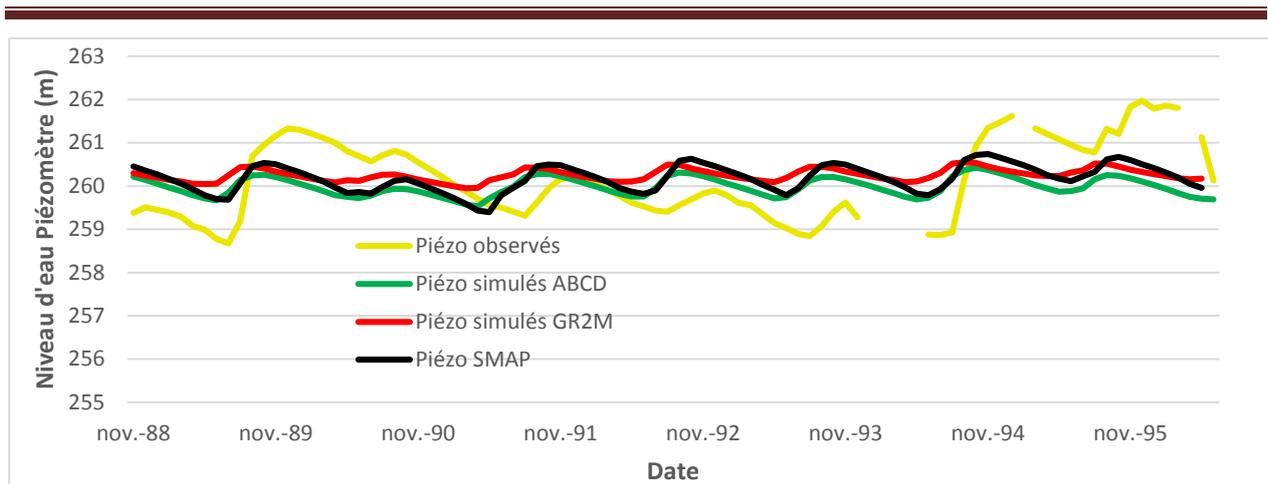


Figure 80 : Comparaison de l'évolution de la piézométrie entre les modèles mensuels, bassin de Niagho

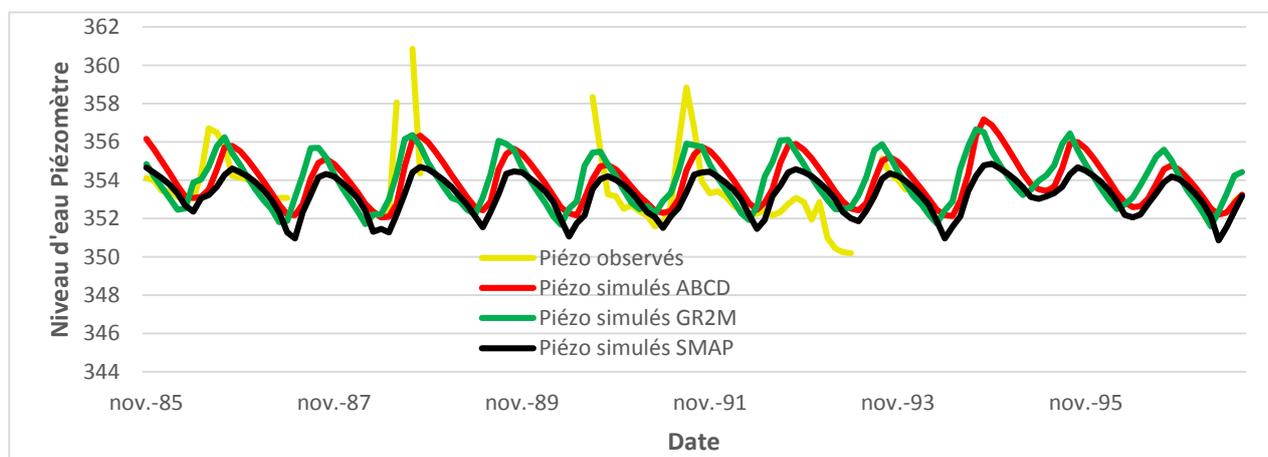


Figure 81 : Comparaison de l'évolution de la piézométrie entre les modèles mensuels, bassin de Samandeni

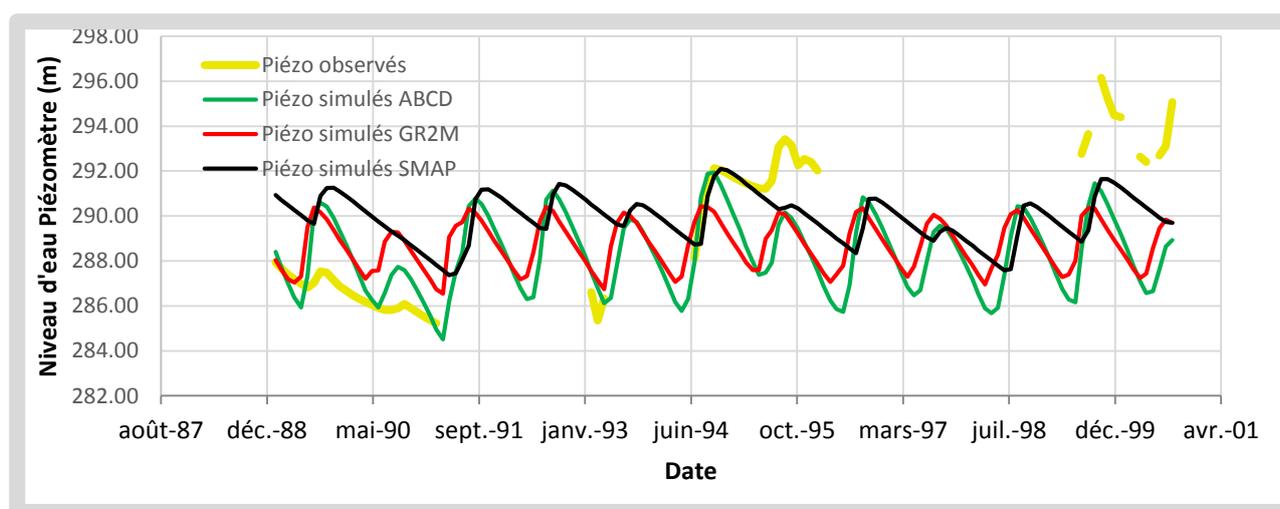


Figure 82 : Comparaison de l'évolution de la piézométrie entre les modèles mensuels, bassin de Wayen

Analyse de quelques modèles hydrologiques comportant explicitement une prise en compte d'échange entre eaux de surface et eaux souterraines – Zoom sur le Burkina Faso

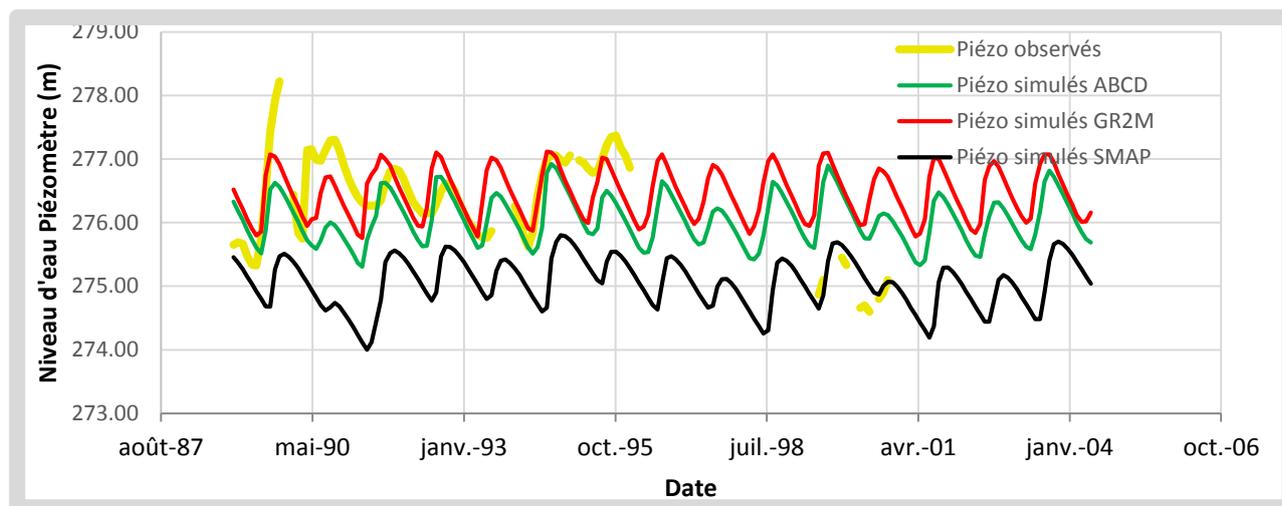


Figure 83 : Comparaison de l'évolution de la piézométrie entre les modèles mensuels, bassin de Yakala

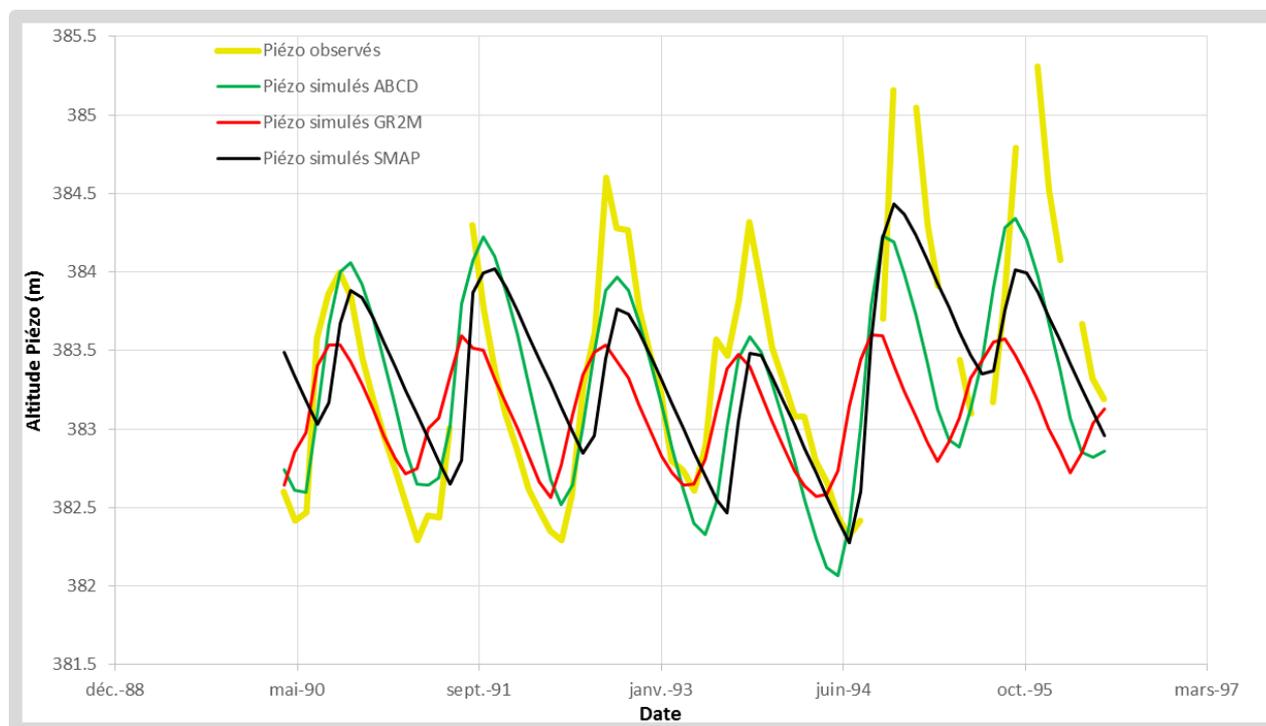


Figure 84 : Comparaison de l'évolution de la piézométrie entre les modèles mensuels, bassin de Diebouyou

Analyse de quelques modèles hydrologiques comportant explicitement une prise en compte d'échange entre eaux de surface et eaux souterraines – Zoom sur le Burkina Faso

Annexe 7 : Paramètres et critères de NSE obtenus sur le modèle ABCD des différents bassins

a- Valeur des paramètres du modèle ABCD sur le bassin de Boromo

Après 70	
A	0.99797213
B	1201.4
C	0.3
D	0.8
Calage (Nash Q)	58
Validation (NashQ)	69.8

Avant 70	
A	0.99771257
B	1560.19451
C	0.3
D	0.8
Calage (Nash Q)	77.8
Validation (NashQ)	51.5

Toute la période	
A	0.99790487
B	1308.07187
C	0.3
D	0.8
Calage (Nash Q)	65.3

b- Valeur des paramètres du modèle ABCD sur Diarabakoko

Après 70	
A	0.99089512
B	1185.02676
C	0.3
D	0.8
Calage (Nash Q)	62.7
Validation (NashQ)	64.2

Avant 70	
A	0.98646973
B	1192.58552
C	0.3
D	0.8
Calage (Nash Q)	66.4
Validation (NashQ)	57.5

Toute la période	
A	0.98945751
B	1199.78732
C	0.3
D	0.8
Calage (Nash Q)	65.3

c- Valeur des paramètres du modèle ABCD sur le bassin de Folonzo

Après 70	
A	0.99750132
B	1141.02655
C	0.3
D	0.8
Calage (Nash Q)	67.3
Validation (NashQ)	70.7

Avant 70	
A	0.99675202
B	1006.5765
C	0.3
D	0.8
Calage (Nash Q)	75.5
Validation (NashQ)	51.3

Toute la période	
A	0.99745014
B	1141.03006
C	0.3
D	0.8
Calage (Nash Q)	67.6