



APPLICATION DU MODÈLE SWAT POUR LA MODÉLISATION DE L'ÉCOULEMENT DANS UN BASSIN VERSANT PEU JAUGE EN ZONE SOUDANO- SAHÉLIENNE (BURKINA FASO)

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2iE AVEC GRADE
DE MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT**

**SPECIALITE : INFRASTRUCTURE ET RESEAUX HYDRAULIQUES / RESEAUX
HYDRAULIQUES**

Présenté et soutenu publiquement le 05 Juillet 2019 par

Emma Chapline Grâce KOUAME

(20150017)

Travaux effectués

Sous la direction de Dr Dial NIANG Maître Assistant

Et sous l'encadrement Dr Bouraïma KOUANDA

Laboratoire Eaux Hydro-Systèmes et Agriculture (LEHSA)

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr. Malicki ZOROM

Membres et correcteurs : Dr. Babacar LEYE

Dr Vivien DOTO

Promotion 2018-2019

DÉDICACES

À mon Père, Maître et Roi du ciel, celui par qui tout est.

À ma tendre, douce, et aimante maman d'amour, Mme KOUAME Angeline ;

À mon premier héros, mon tendre et aimant papa, M. KOUAME Maurice ;

À mes frères, mes premiers fans, avec qui nous formons le clan KOUAME ;

À ma merveilleuse famille spirituelle du Burkina Faso ;

Avec amour et profonde gratitude.

REMERCIEMENTS

Au terme de mon parcours au sein de ce prestigieux Institut, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui de prêt comme de loin ont permis le bon déroulement de ces années de formation par les conseils, les encouragements, et les enseignements.

Je voudrais exprimer toute ma reconnaissance à l'endroit du corps professoral et administratif de 2iE qui ne ménagent aucun effort au quotidien pour nous assurer un enseignement et un suivi académique de qualité.

Je remercie le Laboratoire Eaux Hydro-Systèmes et Agriculture (LEHSA) et le Directeur de l'école doctorale, Professeur Harouna KARAMBIRI qui m'ont accueilli dans leurs locaux. Aussi j'exprime ma profonde gratitude aux doctorants du laboratoire qui m'ont facilité l'insertion au sein du laboratoire, ainsi que pour leur encouragement et leur disponibilité. Je cite notamment Docteur ZOURE, M. COULIBALY.

Je tiens également à remercier profondément Docteur Dial NIANG, mon directeur de mémoire, pour avoir accepté suivre et diriger ces travaux, pour sa disponibilité, ses précieux conseils et remarques constructives, tout au long de ce stage. Un énorme merci également à Docteur Bouraïma KOUANDA, mon maître de stage, pour sa patience, ses conseils, ses remarques, et sa promptitude à m'aider et me guider durant ce stage malgré le fait qu'il était lui-même submergé par ses travaux de fin de thèse. Mention spéciale de remerciement à celui que j'appelle mon deuxième maître de stage et mentor SWAT, M. Roland YONABA. Merci infiniment à vous pour vos conseils, votre disponibilité, et votre aide inestimable à chaque étape de ce travail.

Merci à mes amies et sœurs Tatiana LAMODY, Anissa KABORE, Ruth BAMBARA ; Rosine KABORE, Louise KABORE, à tous mes camarades de classe. Merci à la famille ESSE, la famille TIADE, la famille NEHOUPHANG, à ma famille spirituelle à Ouagadougou, à Bobo-Dioulasso, et en Côte d'Ivoire.

Et enfin ; merci à mes parents biologiques, mes frères et sœurs ; Yves, Marlène, et Emmanuela KOUAME. Merci pour votre soutien inestimable, pour vos encouragements, vos prières, votre amour, et toutes choses que vous avez investis.

Merci à tous pour tout.

RÉSUMÉ

La présente étude vise à analyser la réponse hydrologique et à réaliser le bilan hydrologique du bassin versant rattaché à la station hydrométrique de Badara de superficie 935,53 Km², situé à l'ouest du Burkina dans la région des Haut-Bassins.

Pour une meilleure compréhension des écoulements du Mouhoun Supérieur-Sourou à Badara, une modélisation du ruissellement a été effectuée à partir du modèle hydrologique SWAT (Soil and Water Assessment Tool) sur la période de 1986 à 2000 au pas de temps mensuel. Il s'agit d'un cours d'eau difficile à caractériser hydrologiquement en ce sens qu'il existe une forte interaction entre les eaux de surface et les eaux souterraines. En effet, la zone dispose d'un grand nombre de sources apportant une grande contribution aux écoulements. En vue d'une meilleure prise en compte des différents processus intervenant dans le fonctionnement hydrologique de ce bassin versant, la démarche adoptée a été orientée vers une modélisation hydrologique. Cette transformation Pluie-Débit a été effectuée à travers 3 scénarii : Le scénario S0 tient compte uniquement des écoulements de surface ; quant au scénario S1 les écoulements de surface sont associés aux apports des sources, enfin le scénario S2 combine à la fois les écoulements de surface plus les sources et les prélèvements.

Pour le scénario S2, les simulations montrent une meilleure reproduction des hydrogrammes. En effet, il n'y existe pas de décalage entre les hydrogrammes simulés et observés. Le débit de pointe est légèrement sous-estimé avec des coefficients de Nash respectivement de 0,70 et 0,42 pour le calage et la validation. Nous remarquons également lors de l'étude du bilan hydrologique une évapotranspiration réelle journalière d'environ 2 mm témoignant de très pertes vu que la moyenne nationale tourne autour de 5 mm/j. L'étude révèle aussi une contribution de l'ordre de 4,9% par an de la pluie sous forme d'écoulement de surface et d'une recharge annuelle de 28,7%. Les 2 autres scénarios présentent aussi des simulations acceptables avec des coefficients de l'ordre 0,69 pour le calage.

Mots clés

- 1 –Bassin versant de Badara
- 2 –Bilan hydrologique
- 3 – Réponse hydrologique
- 4- Ruissèlement
- 5- SWAT

ABSTRACT

The purpose of this study is to analyse the hydrological response and carry out the hydrological balance of the catchment area at Badara hydrometric station with a surface area of 935.53 Km², located in the western part of Burkina Faso in the “Haut-Bassins” region.

For a better understanding of the runoff response of the “Mouhoun Superieur- Sourou” at Badara, a flow modelling was carried out using the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) hydrological model over the period of 1986 to 2000 with a monthly time step. It is a difficult watercourse to characterize hydrologically because there is a strong interaction between surface water and groundwater. Indeed, the area has a large number of sources that make a significant contribution to flows. In order to better take into account the different processes involved in the hydrological functioning of this watershed, the approach adopted was oriented towards hydrological modelling. This Rainfall- Runoff transformation was carried out through 3 scenarios: Scenario S0 considers only surface flows; Scenario S1, surface flows are associated with source inputs, and Scenario S2 combines both surface flows plus sources and withdrawal.

For scenario 2, the simulations show a better reproduction of hydrographs. Indeed, there is no discrepancy between the simulated and observed hydrographs. The peak flow is slightly underestimated with Nash coefficients of 0.70 and 0.42 respectively for calibration and validation. The study also reveals a contribution of about 4.9% per year from rainfall in the form of surface runoff and an annual recharge of 28.7%. The other 2 scenarios also present acceptable simulations with coefficients in the order of 0.69 for calibration.

Keywords:

1 - Badara watershed

2 - Runoff

3 - SWAT

4 - Water balance

5- Water response

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ASTER GDEM: Advanced Spacedborne Thermal Emission and Reflexion Global Elevation

DANIDA: DANish International Development Agency

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation

GFG : Grès Fin Glauconieux

GFR : Grès Fin Rose

GGQ : Grès à Granule de Quartz

GIRE : Gestion Intégrée des Ressources en Eau

GKS : Grès de Kawara- Sindou

HRU : Unité de Réponse Hydrologique

IGB : Institut Géographique de Burkina Faso

MNT : Modèle Numérique de Terrain

ONEA : Office National de l'Eau et de l'Assainissement

PAGIRE : Plan d'Action de Gestion Intégrée des Ressources en Eau »

SAC : Siltstone, Argilite, et Carbonates

SCS : Soil Conservation Service

SDAGE : Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion de l'Eau

SNIEau : Système National d'Information sur l'Eau

SWAT: Soil and Water Assessment Tool

SWAT-CUP: Soil and Water Assessment Tool- Calibration Uncertainties Program

USDA. United States Department of Agriculture

SOMMAIRE

DÉDICACES.....	I
REMERCIEMENTS	II
RÉSUMÉ.....	III
ABSTRACT	IV
LISTE DES ABRÉVIATIONS	V
SOMMAIRE	VI
LISTE DES GRAPHES	IX
LISTE DES FIGURES	X
LISTE DES CARTES	XI
I. INTRODUCTION.....	1
II. Objectifs et hypothèses de travail.....	3
II-1. Objectifs du travail.....	3
II-2. Hypothèses de travail	3
III. Etat de l’art	4
III-1. Rôle de la modélisation hydrologique pour la compréhension des processus hydrologiques	4
III-2. Synthèse des études hydrologiques et hydrogéologiques menées dans la zone	7
IV. MATERIEL ET METHODES	13
IV-1. Présentation de la zone d’étude.....	13
1-1. Cadre physique.....	13

1-2. Cadre climatique	16
1-3. Cadre géologique et hydrogéologique	19
IV-2. Matériel	22
2-1. Données utilisées en entrée	22
2-2. Choix du modèle	22
IV-3. Méthodes	24
3-1 Collecte et traitements des données	25
3-2 Mise en route du modèle SWAT	30
3-3 Etablissements des termes du bilan hydrologique	37
V. RÉSULTATS ET DISCUSSION	37
V-1 Définition de la réponse hydrologique (URH)	37
V-2 Calage et validation des résultats.....	43
V-3 Établissement des termes du bilan hydrologique.....	51
V-4 Comblement des lacunes par le modèle SWAT.	55
VI. CONCLUSION	58
VII. Perspectives et recommandations.....	60
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	61
ANNEXES	ii

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Classification des différents modèles existants (Ilboudo, 2018) révisé	4
Tableau II : Propriétés hydrogéologiques des aquifères du bassin versant du Kou	7
Tableau III : Bilan des flux à l'échelle du bassin du Kou (Tirogo, 2016).....	10
Tableau IV : Tableau des études antérieures effectuées sur le bassin du Kou:.....	11
Tableau V: Test de rupture sur les précipitations annuelles de 1960 à 2013	17
Tableau VI : Données d'entrée	22
Tableau VII : Données météorologiques.....	28
Tableau VIII : Coordonnées de la station hydrométrique de Badara	29
Tableau IX : Paramètres de calage	34
Tableau X : Caractéristiques des sous-bassins.....	38
Tableau XI : Correspondance entre les sols de l'IGB et la classification de SWAT	39
Tableau XII : Récapitulatif des résultats de calage et de validation	48
Tableau XIII : Récapitulatif de l'étude de sensibilité.....	49
Tableau XIV: Bilan hydrologique annuel du bassin sur la période de calage pour le scénario S0	51
Tableau XV: Bilan hydrologique annuel du bassin sur la période de calage pour le scénario S1 ..	52
Tableau XVI: Bilan hydrologique annuel du bassin sur la période de calage pour le scénario S2	53

LISTE DES GRAPHES

Graphe 1 : Évolution de la pluviométrie de la station de Bobo-Dioulasso	17
Graphe 2 : Indice pluviométrique.....	18
Graphe 3 : Moyennes mensuelles de pluie, d'évapotranspiration potentielle (formule de Penman) et de température de l'air de 1961 à 2014 pour la station de Bobo-Dioulasso (Justine, 2016).....	19
Graphe 4: Calage pour le scénario 0	43
Graphe 5 : Validation pour le scénario 0.....	44
Graphe 6: Calage pour le scénario 1	44
Graphe 7 : Validation pour le scénario 1.....	45
Graphe 8 : Calage pour le scénario 2	45
Graphe 9: Validation pour le scénario 2.....	46

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Coupe hydrogéologique du Kou (Derouane 2008).....	8
Figure 2: Coupe géologique synthétique de la zone de Bobo-Dioulasso (source : (SOGREAH 1994)	21
Figure 3: Carte géologique de la zone d'étude d'après (Tirogo,2016).....	21
Figure 4: Schéma du cycle hydrologique	23
Figure 5: Transport des éléments (eau, sédiments, pesticides, nutriments, ...) au sein du réseau hydrographique (Lang, J., et B. 2011).....	24
Figure 6: Les sources et forages de Badara.....	30
Figure 7: Hydrogramme de l'année 1991 pour le scénario S0	55
Figure 8: Hydrogramme de l'année 1991 pour le scénario S0	55
Figure 9: Hydrogramme de débits observés et des débits simulés.....	56
Figure 10: Résultats graphiques des statistiques sur les débits observés et simulés pour le scénario 2 : (a) Box plot , (b) test de Kruskal Wallis	56

LISTE DES CARTES

Carte 1 : Carte de situation du bassin versant de Badara	14
Carte 2 : Carte de la situation hydrographique et localisation des sources et points de prélèvement	15
Carte 3 : Carte du modèle numérique de terrain	25
Carte 4: Localisation des stations hydrométriques.....	26
Carte 5: Type de sols du bassin versant de Badara	27
Carte 6: Occupation des terres du bassin versant de Badara	28
Carte 7: Réseau hydrographique et localisation des stations hydrométriques	31
Carte 8: Sous- bassins versants de Badara	38
Carte 9: Correspondance entre l'occupation des terres de l'IGB et de la classification SWAT	39
Carte 10: SWAT Land soils	41
Carte 11: Classes de pente.....	42

I. INTRODUCTION

L'eau est une denrée indispensable et non substituable pour tout organisme vivant. Elle demeure néanmoins une ressource rare et limitée. Selon un constat fait par le Ministre de l'agriculture de l'hydraulique et des Ressources Halieutiques en 2010, le contexte de la problématique de l'eau au Burkina est marqué par la baisse tendancielle de la pluviométrie, les pressions exercées sur les ressources disponibles par une population en perpétuelle croissance, les changements climatiques résultant d'activités anthropiques (PAGIRE, 2009). Cet accroissement démographique couplé à l'augmentation des activités anthropiques, l'industrialisation et le changement climatique et à la mauvaise gestion de cette ressource sont autant de facteurs qui rendent cette ressource en eau insuffisante, qu'elle soit souterraine ou surfacique. Qui parle de ressources en eau ne peut faire abstraction de la notion de pluie d'où provient l'eau disponible comme ressource. Pourtant depuis le début des années 1970, nous remarquons une baisse de la pluviométrie et une augmentation des températures dans les pays subsahariens en général et particulièrement au Burkina Faso entraînant ainsi la baisse remarquable des ressources en eau.

L'eau, cependant, constitue un facteur très limitant de développement pour nos pays de la zone subsaharienne, pour lesquels l'agriculture représente la base du développement économique. En effet, on estime que 90 % des eaux renouvelables servent à l'agriculture, 7 % aux usages domestiques et 3 % à l'industrie (Sauret, 2013). De ce fait, le besoin de mieux gérer la ressource est né. Cette préoccupation majeure a poussé le gouvernement burkinabé à se lancer dans un processus plus actif dans la dynamique de la gestion intégrée de l'eau, avec l'assistance technique et financière du Royaume de Danemark (DANIDA) depuis les années 1996. Pour dynamiser encore plus la gestion de la ressource en eau, les pays du monde se sont donnés rendez-vous en septembre 2002 au sommet mondial sur le développement durable de Johannesburg pour l'élaboration et la mise en œuvre du « plan d'action de gestion intégrée des ressources en eau » le PAGIRE, qui a été adoptée par Décret N° 2003 – 220 /PRES/PM/MAHRH portant approbation du plan d'action pour la gestion intégrée des ressources en eau (PAGIRE, 2003). Ce plan découle de la politique nationale qui s'est orientée vers la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) par l'adoption de la loi n° 002-2001/AN du 8 février 2001 portant loi d'orientation relative à la gestion de l'eau. Elle a pour but, en effet d'assurer un bon équilibre entre l'exploitation des ressources et la protection de l'environnement tout en s'assurant de la durabilité et de l'efficacité des différents programmes et projets. Pour ce faire le PAGIRE a été découpé en 2 phases. La première phase part

de 2003 à 2008 étendue à 2009, et avait pour objectif de mettre en place le Conseil National de l'Eau (CNEau) et le Comité de Pilotage du PAGIRE et son Secrétariat Permanent ; l'adoption de décrets pour la mise en place des espaces de compétences des gestion des bassins, des Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion de l'Eau (SDAGE) et des Schémas d'Aménagement et de Gestion de l'Eau (SAGE) ; le développement d'un Système National d'Information sur l'Eau (SNIEau) ; le recrutement et la formation de nouveaux agents du secteur de l'eau, la sensibilisation et l'éducation. La phase 2 qui elle part de 2010 jusqu'en 2015 avait pour objectif de gérer de manière concertée les ressources en eau des bassins hydrographiques de pays à travers les agences de l'eau, d'assurer la protection des ressources en eau au profit des usagers à travers l'application de la législation sur l'eau et d'assurer le suivi et de développer la connaissance des ressources en eau au bénéfice des usagers à travers le Système National d'Information sur l'Eau. Ce dernier objectif portant sur le développement de la connaissance des ressources fait l'objet de ce travail, en effet il s'agit de consolider la connaissance et la recherche appliquée dans le domaine de l'eau, en lien avec le changement climatique. Cette étude cadre bien avec cet objectif, car elle vise à acquérir une meilleure connaissance de la dynamique des écoulements de surfaces et souterrains d'un sous bassin versant du complexe Mouhoun supérieur-Sourou.

En effet, le complexe Mouhoun supérieur-Sourou est situé dans une zone soudano-sahélienne qui est réputée être sujette à une baisse de la pluviométrie remarquable depuis 1970 due au contexte climatique changeant (Sauret, 2013) et à la demande en eaux. On y enregistre presque chaque année des inondations en saison pluvieuse avec des conséquences dramatiques telles que des noyades et la perte des champs agricoles. Aussi enregistre-t-on paradoxalement des pénuries drastiques d'eau en saison sèche pour les périmètres irrigués. Cette spécificité fait de cette zone un lieu de prédilection pour les grands domaines agricoles, pour l'exploitation en vue de la satisfaction des besoins en eau potable des populations et des industries. On note la réalisation de cultures extensives, une anarchie dans l'exploitation des ressources pour les domaines irrigués et une surexploitation des ressources pour la satisfaction des besoins pastoraux, industriels et des besoins en eau de la population. De nombreux conflits récurrents, plus ou moins graves, entre les utilisateurs en aval et en amont du cours d'eau, sont enregistrés chaque année. A cela s'ajoute la méconnaissance du comportement hydrodynamique de la zone. Au vu de cela, depuis la première phase du PAGIRE mise en place par l'Etat Burkinabé, cette zone fait partie des zones prioritaires. Les actions menées ont pour but de savoir comment mieux gérer la ressource en eau à partir de la connaissance de la dynamique des eaux dans la zone. L'optique de mieux connaître les interactions

dans la zone, plusieurs thèses, mémoires de fin d'étude d'ingénieur, et de divers projets étatiques ont été menés. De toutes ces études, il ressort clairement que la genèse des écoulements dans cette zone formant son système hydrologique tient compte de plusieurs facteurs à prendre en compte constituent une limitation importante à souligner. Malheureusement le manque de données d'observation disponibles sur ces différents facteurs à prendre en compte.

De là naît la question charnière principale de notre étude qui s'articule comme suit : une approche basée sur la modélisation hydrologique permet-elle d'évaluer efficacement les composantes du bilan hydrologique ?

Pour trouver une réponse à cette question, les objectifs du mémoire sont décrits la section suivante.

II. OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES DE TRAVAIL

II-1. Objectifs du travail

L'objectif général de ce travail est de contribuer à la caractérisation hydrologique du complexe Mouhoun supérieur Sourou. Comme objectif spécifique, il s'agira de :

- De modéliser la réponse hydrologique du bassin versant
- Etablir les termes du bilan hydrologique

II-2. Hypothèses de travail

Pour mener cette étude à bien, l'hypothèse d'étude est la suivante : les sources d'eau et les prélèvements de l'ONEA ont un impact sur la réponse hydrologique et les termes du bilan hydrologique.

Ce manuscrit s'articule autour de deux grandes parties :

- La première est consacrée à la présentation du contexte physique de la zone d'étude, du matériel utilisé ainsi que la méthodologie adoptée pour atteindre les objectifs fixés ;
- Puis dans la deuxième partie, une analyse des résultats obtenus sera effectuée suivi d'une discussion des principaux résultats ;
- Naturellement, une conclusion suivie des perspectives et recommandations mettrons un terme à ce travail.

III. ETAT DE L'ART

La zone d'étude est une zone qui a suscité beaucoup d'intérêt vu les études qui y ont été menées pour une meilleure connaissance de cette zone. Une brève synthèse de ces études est présentée ci-dessous. Mais avant, une brève description de la modélisation hydrologique est présentée.

III-1. Rôle de la modélisation hydrologique pour la compréhension des processus hydrologiques

La modélisation hydrologique a pour vocation, une meilleure compréhension des processus de surface du cycle de l'eau, car permettant de simuler le comportement d'un hydrosystème et de tirer toute conséquence de l'exploitation de ses résultats (Bodian, 2011). Ainsi, de nombreux travaux ont porté sur l'étude des comportements hydrologiques par le biais d'outils de modélisation dans le monde qui tout en intégrant des facteurs complexes du cycle de l'eau, décrivent le fonctionnement du bassin versant par une représentation plus ou moins simplifiée de la réalité. Cette simplification de la réalité permet de comprendre les différentes interactions hydrodynamiques de la zone sujette à notre étude. : la circulation de l'eau, sa distribution, ses propriétés et les différents paramètres influençant l'écoulement des eaux dans un bassin versant. Il existe plusieurs outils de modélisations. Cette multiplicité de modèles pour la modélisation est due au fait qu'un modèle à lui tout seul ne peut pas modéliser tous les phénomènes hydrologiques en prenant en compte tous les paramètres qui pourraient intervenir. Ainsi le choix d'un modèle se fait en se basant sur le type de résultat recherché, la précision et la fiabilité des résultats attendus, la disponibilité des données. La classification des différents modèles existants pourrait se faire selon leurs approches, comme consignée dans le tableau 1 :

Tableau I : Classification des différents modèles existants (Ilboudo, 2018) révisé

Critères	Type de modèle	Description
Représentation spatiale	Global	Le bassin est considéré comme une seule entité. Les valeurs des paramètres sont considérées comme homogènes dans la zone. Il y a également non prise en compte de certains paramètres tels que le sol, la topographie, la végétation ou l'occupation des terres de manière explicite.
	Distribué	Le bassin est subdivisé à l'aide des critères hydrologiques en plusieurs entités spatiales. Les paramètres physiques changent de valeur d'une unité spatiale de réponses à l'autre.
	Semi-distribué	Il fait la jonction des deux précédents modèles en globalisant certaines composantes et spécialisant d'autre suivant les sous-entités
Lien entre les entrées et les sorties	Déterministe	Il suppose que soit les données d'entrées sont déterminées ou sont supposées déterminables
	Stochastique	Le comportement des variables est défini sur la base de critères de probabilistes ou sur la base de distributions de probabilités
Discrétisation temporelle	Événementiel	Il permet de reproduire un ou plusieurs évènements de façon singulière. Il nécessite une capacité à préciser l'état initial du bassin en fonction des conditions climatiques antécédentes.
	Continu	Il reproduit une succession d'évènements en les liant les uns aux autres. Dans ce cas, certains processus ne sont plus négligés, de ce fait il faut avoir une bonne base de données sur les variables de conditions aux limites afin de pouvoir expliquer les différents phénomènes hydrologiques dans le bassin versant.
Description des processus	Empirique	Il est construit autour des relations mathématiques directes établies entre les entrées et les sorties
	Physiques	Il décrit le mécanisme par rapport à la connaissance du milieu sur les bases d'équations mécanistes de la physique
	Conceptuel	Emploie des symboles/concepts pour une représentation qualitative de la réalité. Dans son processus de mise en place, il effectue certaines simplifications et traite le bassin versant comme un ensemble de réservoirs interconnectés.

De cette étude bibliographique, il ressort que dans la zone d'étude objet de ce mémoire, deux types de modèles hydrologiques ont été implémentés. Il s'agit du modèle conceptuel hybride (à cheval entre le physique et l'empirique) HYSIM (HYdrological SIMulation Model) utilisé par Niamian, (2008) et Wellens J. et al.,(2008) ; et du modèle conceptuel déterministe SMAP utilisé par Gnaman, (2003).

III-2. Synthèse des études hydrologiques et hydrogéologiques menées dans la zone

Généralement, l'établissement du bilan hydrologique d'un bassin versant découle d'études hydrogéologique et hydrologique détaillées. Ainsi, la zone du Kou qui contient notre bassin versant a été soumise à plusieurs études hydrogéologique et également hydrologique.

Les études hydrogéologiques ont fait ressortir que seulement quatre des formations géologiques de la zone constituent un aquifère (Sauret, 2013), ce sont : l'aquifère des Grès Fins Glauconieux (GFG), l'aquifère des Grès à Granules de Quartz (GGQ), l'aquifère des Siltites Argilites et Carbonates (SAC1) et l'aquifère des Grès Fins Roses (GFR). On constate dans la zone la présence de plusieurs sources, c'est-à-dire des endroits où le niveau piézométrique est égal au niveau topographique. Il s'agit en l'occurrence de la source de Nasso, les sources ONEA 1 et 2. Il existe plusieurs forages ayant de bons débits utilisés pour l'hydraulique villageoise, par les industries et aussi pour l'alimentation en eau par l'ONEA. Dans sa thèse Traoré, (2012) fait ressortir que les aquifères des SAC et des GGQ présentent de meilleures valeurs de transmissivité et sont les plus captés. Les valeurs de transmissivité de ces aquifères sont présentées dans le tableau 2 :

Tableau II : Propriétés hydrogéologiques des aquifères du bassin versant du Kou (Sauret, 2013)

Aquifère	Débit	Transmissivité	Coefficient d'emménagement	PH	Conductivité électrique
GKS	150	10^{-3}	10^{-4}		
GFG	50 à 80	7.10^{-4}	--	5.3	5 à 15
GGQ supérieur	320	6.10^{-2}	$5.5.10^{-4}$	-	75 à 190
GGQ inférieur	320	6.10^{-2}	$5.5.10^{-4}$	-	5 à 30
SAC	-	$5.6.10^{-4}$ à $1.1.10^{-2}$	35 à 135	-	-

GFG: Grès Fins Glauconieux , GGQ: Grès à Granules de Quartz, SAC1: Siltites Argilites et Carbonates; GFR: Grès Fins Roses

La zone d'étude est située sur la formation géologique des SAC (silstones, argilites, carbonates) qui renferment des aquifères ayant les coefficients d'emménagement les plus importants du bassin versant.

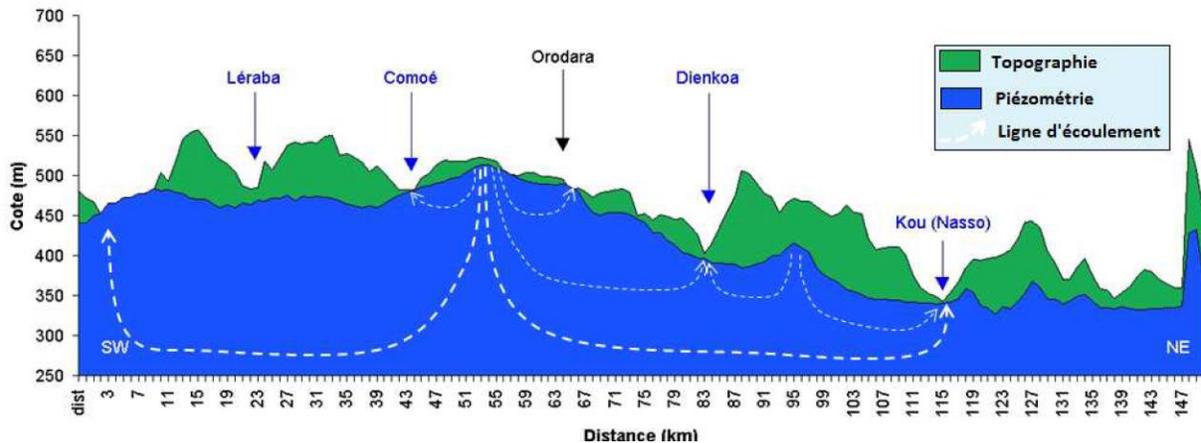


Figure 1 : Coupe hydrogéologique du Kou (Derouane 2008)

À l'échelle du bassin du Kou, le sens général de l'écoulement est orienté du sud-est vers le nord-ouest et le niveau piézométrique varie entre 499 m et 286 m avec un gradient d'environ 3 ‰ (Tirogo, 2016).

En dehors de la limite Est du bassin versant hydrologique du Kou qui semble être à proximité d'une ligne de partage des eaux, on note des flux entrants ou sortants le long des autres limites du bassin. À l'est du bassin, la ligne de partage des eaux semble être légèrement décalée vers l'intérieur du bassin et est située sur un dôme piézométrique dans la zone de Bobo-Dioulasso. Cette ligne pourrait expliquer la présence des sources qui se déversent le long de la falaise au contact avec le socle et permettre de délimiter un bassin hydrogéologique. Toutefois, les données disponibles ne permettent pas d'apprécier avec précision la position exacte de cette ligne qu'on peut supposer varier en fonction de la recharge.

À l'amont des sources de Nasso/Guinguette, le gradient hydraulique est beaucoup plus fort qu'à l'aval. Ce phénomène est probablement dû au haut relief des parties sud alors qu'à l'aval dans la vallée du Kou, les terrains sont relativement plats. Entre la limite Sud ou la limite Est vers Bobo-Dioulasso et la zone des sources, le gradient hydraulique est de l'ordre de 6 ‰ alors que dans la partie aval, il est de l'ordre de 1 ‰. (Tirogo, 2016)

Par leurs études Derouane (2008) et Sauret (2013) font ressortir le caractère drainant des cours d'eau du Kou. Ils démontrent à cet effet que les lignes d'écoulement convergent vers la zone des

sources de Nasso/ Guinguette. De par sa modélisation hydrogéologique, Elie Sauret a assimilé la plaine alluviale comme un grand réservoir capacitif avec la fonction stockage et drainage ; ainsi d'après lui, l'eau est stockée en amont pour être ensuite drainée à l'aval pour la réalimentation du cours d'eau du Kou soit directement soit indirectement à travers les sources. Cela serait dû à la géologie de la plaine alluviale qui est constituée de dépôts argilo-latéritiques et du bedrock qui est altéré et déconsolidé, ce contexte géologique est donc favorable à l'emmagasinement et à la mobilisation d'importants volumes d'eau souterraine (Sauret, 2013). Grâce à l'étude du fonctionnement hydrodynamique de la nappe à l'aide de sa modélisation hydrogéologique, Justine Tirogo nous permet d'avoir une idée sur les quantités des flux transitant dans la nappe au niveau de la plaine alluviale du Kou. En effet sa modélisation lui a permis de faire ressortir que la recharge représente près de la moitié (49 %) des apports en eau de l'aquifère. Le reste des apports provient des flux latéraux soit 20 % du sud, 22 % du sud-ouest (Mouhoun) et 9 % du nord. Les flux entrants par la rivière du Kou sont faibles (moins de 1 %). Les principaux points de décharge de l'eau souterraine sont les sources (13 % des flux sortants) et la rivière du Kou et ses principaux affluents (11 %). Les pompages ne représentent que 2 % du total des flux sortants. Le reste des flux sort à l'ouest (le Mouhoun) (51 %) et au nord (22 %) du bassin versant (Tirogo, 2016). Vu que ces résultats concernent un bassin hydrogéologique plus vaste que le bassin versant du Kou, Tirogo a dû restreindre les résultats à la vallée du Kou. Elle montre que les flux entrants dans la nappe restreinte au niveau de la vallée du Kou proviennent principalement de la recharge (38 %), de la limite sud (20 %) et de la limite ouest (23 %) et la frontière nord (15 %) et que les flux sortants sont : les sources qui en représentent 19 %, la rivière et les autres drains 10 % et les pompages 2 % ; le reste des flux passe par les frontières ouest (49 %) et nord (17 %), et les frontières sud et est qui sont très faibles soit respectivement 1 % et 2 % (Tirogo, 2016). Les quantités qu'elle a trouvées sont consignées dans le tableau 3 :

Tableau III : Bilan des flux à l'échelle du bassin du Kou (Tirogo, 2016)

	Flux entrant (m ³ /s)	Flux sortant (m ³ /s)	
Frontières	Frontière sud	2.69	0.26
	Frontière nord	1.98	2.6
	Frontière ouest	3.09	6.59
	Frontière est	0.58	0.14
Pompage	0	0.32	
Drains	0	0.66	
Sources	0	2.53	
Rivière	0.05	0.72	
Recharge	5.09	0	
Total	13.48	13.48	

De ce tableau il ressort que les flux sortants dus aux pompages et au drainage sont faibles par rapport à ceux dus aux sources. Ces sources sont cependant sujettes à une baisse de débits et aux fluctuations dues à la recharge. En effet les sources de la Guinguette et de l'ONEA ont connu respectivement une baisse d'environ 0.31 m³/s et 0.1m³/s en une vingtaine d'années sur laquelle s'ajoutent les fluctuations saisonnières respectivement estimées à 2 à 10 % pour la guinguette et 2 à 21 % pour l'ONEA sur la période de 1955 à 2014 (Tirogo 2016). Bien entendu, ces baisses influencent les débits mesurés au niveau de l'exutoire. Ces études hydrogéologiques ont fait ressortir les interactions qui existeraient entre les eaux de surface et les eaux souterraines.

Des études hydrologiques ont également été effectuées sur ce site en vue d'établir le bilan d'eau. La plupart des études réalisées pour le bassin versant du Kou aboutissent à un résultat négatif au niveau du bilan qui traduit un déficit au niveau du bilan faisant ressortir la présence d'un excès d'eau. Une étude effectuée par le modèle hydrologique HYSIM pour l'année 2000, a fait ressortir que 77 % des apports en eau dans le bassin versant sont perdus par évapotranspiration, 13 % participent au ruissellement et 10 % s'infiltrent (Wellens et al., 2008). Tandis que, pour une période plus grande (1961-2014) (Tirogo, 2016) trouve des pourcentages qui diffèrent légèrement à raison de 81 % pour l'évapotranspiration, 7 % pour le ruissellement et 12 % pour l'infiltration. Le pourcentage trouvé pour le ruissellement est expliqué par elle comme étant dû au fait qu'environ

80 % de la surface du bassin du Kou est recouvert de sol ayant une bonne capacité de rétention. Par leurs études (Wellens et al., 2008 ; Niamian, 2008) ont trouvé pour le bilan en eau de -56 mm qui présente la part de la contribution souterraine et une infiltration égale à 112.4 mm tandis que (Tirogo 2016) l'estime à environ 123 mm et que (Dakoure, 2003) estime la recharge variant entre 0 et 127 mm. L'étude de Justine permet de relever une croissance de l'évapotranspiration qui passe de 68 % en 1961 à 87 % en 2014 et une décroissance de l'infiltration profonde qui passe de 22 % en 1961 à 7 % 2014, cela est une conséquence de la variation climatique connue ces dernières décennies.

Bien que cette zone ait fait l'objet de plusieurs études, mémoires de master, thèses et projets étatiques en vue de mieux comprendre l'hydrodynamisme de la zone, elle n'a pas été sujette à un grand nombre d'études se penchant principalement sur la modélisation hydrologique. L'ensemble (non exhaustif) des études effectuées dans le bassin versant du Kou prenant en compte notre bassin versant sont consignées dans le tableau 4 :

Tableau IV : Tableau des études antérieures effectuées sur le bassin du Kou:

Type d'étude	Références	Zone d'étude	Superficie (Km ²)	Outils utilisés	Période de l'étude
Étude et modélisation hydrogéologique	Sogreah Ingénierie, 1994	Bassin du Kou Nappe Gfg-Ggq-SAC	861	MONA (Régime permanent) et	1990-1993
		Bassin du Kou Nappe GKS	810	ESTRA (régime transitoire)	/
	(Dakoure, 2003)	Bassin de Taoudéni (1/3 au Burkina Faso + 2/3 au Mali) Sous-modèle Burkina (Régime permanent)	180000 /	Processing-MODFLOW	1995-1999

		+ Sous-modèle dans la zone des sources de Nasso (régime transitoire)			
	(Sauret, 2008)	Bassin du Kou étendu jusqu'à la rivière du Mouhoun	3000	GSM (Modflow)	2006-2007
	(Derouane 2008)	Bassin sédimentaire du Taoudéni au sud-ouest du Burkina	4000	GSM (Modflow)	Après 1995
	(Tirogo, 2016)	Bassin du Kou étendu jusqu'à la confluence Niamé-Baoulé	1860	GSM (Modflow)	1961-2014
Étude et modélisation hydrologique	(Gnaman, 2003)	Bassin du Kou	1820	-Modèle SMAP - Modèle Mike Basin	1980-2001
	(Wellens J. et al., 2008)	Bassin du Kou	1823	Modèle hydrologique HYSIM	2000
	(Niamian, 2008)	Bassin du Kou	1823	Modèle hydrologique HYSIM	2000
	(Tirogo, 2016)	Bassin du Kou étendu jusqu'à la confluence Niamé-Baoulé	1860	GSM (Modflow)	1961-2014

Ces études nous ont permis de mieux connaître et comprendre le comportement hydrodynamique générale de la vallée du Kou. Cependant, les études hydrologiques effectuées n'ont pas réellement considéré les sources et les prélèvements comme des paramètres à part entière dans les modélisations. Pour cette étude, nous prévoyons donc de prendre en compte ces données afin de vérifier l'impact que pourraient avoir ces paramètres sur la modélisation hydrologique.

IV. MATERIEL ET METHODES

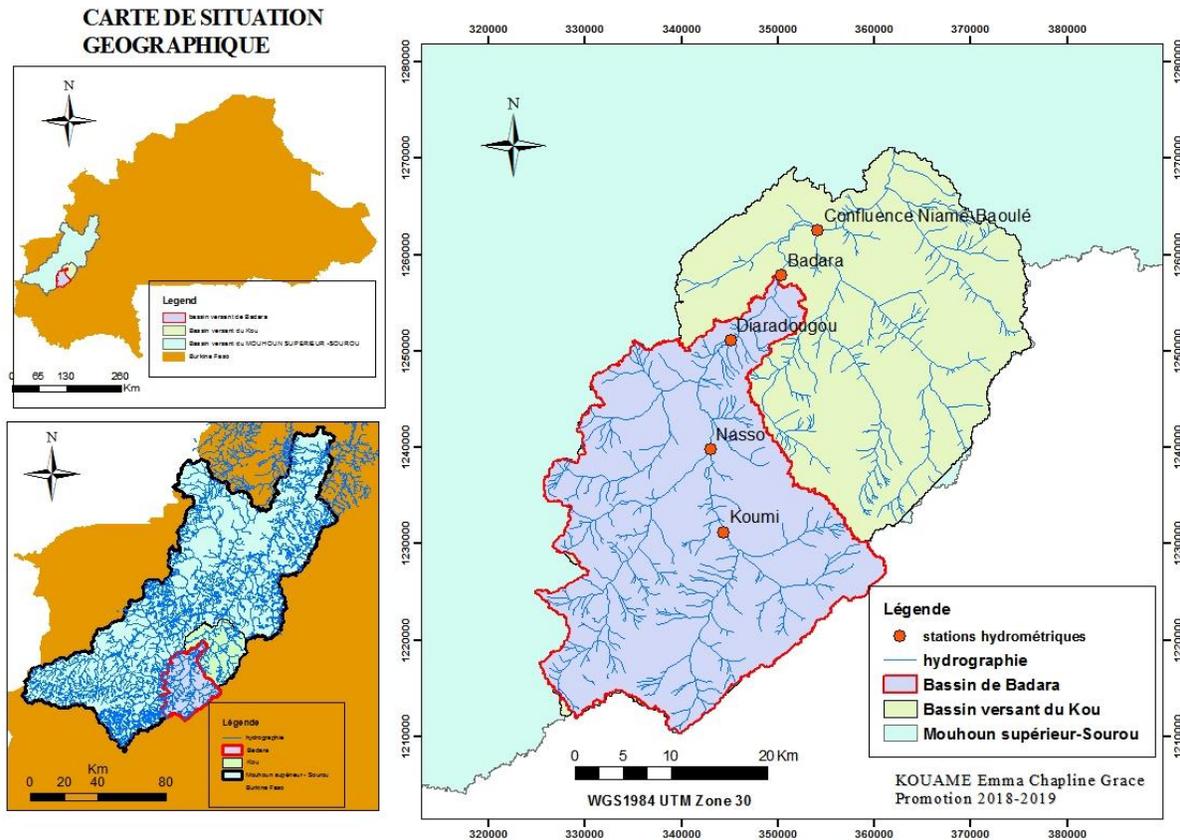
IV-1. Présentation de la zone d'étude

La zone soumise à notre étude est un sous bassin du bassin versant du KOU lui-même compris dans le grand bassin hydrologique du Mouhoun supérieur – Sourou et du bassin hydrogéologique sédimentaire de Taoudéni. Le sous-bassin rattaché à la station hydrométrique de Badara (bassin versant de Badara) fait une superficie de 935 Km². Le bassin versant du Kou présente des caractéristiques physiques et climatiques plus ou moins homogènes sur toute son étendue (Traoré, 2012). De ce fait, cette partie dédiée à la présentation de notre zone d'étude portera sur le cadre physique et climatique du bassin versant du Kou sous-entendu celui du sous-bassin versant de Badara.

1-1. Cadre physique

1-1-1. Caractéristiques géographiques et anthropiques

Le bassin versant de Badara est un sous bassin du bassin versant du Kou. Il est situé à l'ouest du Burkina Faso dans la région des hauts bassins précisément dans la province du Houet ayant pour chefs-lieux Bobo-Dioulasso (carte 1). Selon le recensement de 2006, la population totale de la province du Houet s'élève à 902 662 habitants avec 489 967 habitants à Bobo-Dioulasso (Institut National de la Statistique et de la Démographie (INSD) Burkina Faso, 2011). Elle est située entre les longitudes 4° 08' W et 4° 36' W et les latitudes 10° 55' N et 11° 32' N.



Carte 1 : Carte de situation du bassin versant de Badara

Dans le domaine des activités anthropiques, bon nombre de grandes industries spécialement dans le secteur chimique et agroalimentaire y sont installées. Un décompte fait en 1997 a permis de noter la présence dans la seule province du Houet 27 industries. De plus, les plus grands aménagements hydroagricoles du pays y sont concentrés. Il y a également des aménagements dans l'ordre du millier d'hectares tel que le périmètre irrigué rizicole de Bama qui a une superficie de 1260 ha ouvert depuis 1969 (Wellens et Nitcheu, 2009).

C'est également une zone où l'on note la présence de grands cheptels. Il s'agit de cheptel de millions de tête, on y élève du tout : des bovins, des caprins et de la volaille.

1-1-2. Relief, type de sol et réseau hydrographique

Le bassin du Kou est constitué d'un plateau gréseux bordé :

- à l'Est par une falaise (Falaise de Banfora) de hauteur variable ne dépassant pas 200 m ;
- au sud du bassin par un relief est plus accidenté caractérisé par des montagnes (vers le village de Tien) et des collines rocheuses dont l'altitude varie entre 400 et 670 m dont les versants

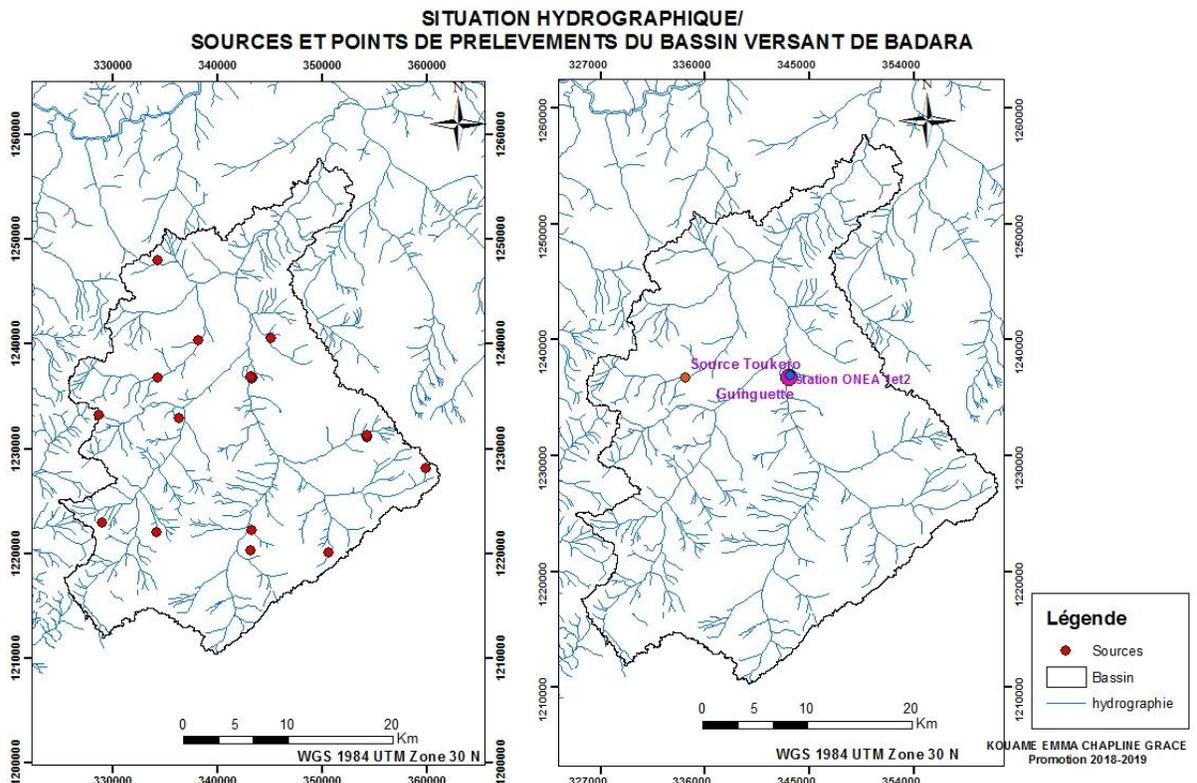
présentent généralement de fortes pentes (15 à 30 %) dont l'altitude diminue progressivement pour se situer autour de 280 m ;

- au Nord-Est marqué par de faibles pentes du terrain où s'étendent des plaines inondables (Tirogo, 2016)

À l'aval du bassin, les terrains sont fortement entaillés par le réseau hydrographique. En effet des zones de dépressions et des bas-fonds, les sources de la Guinguette et quelques émergences diffuses y sont concentrées (Sauret, 2013).

Les sols dans notre zone d'étude sont de cinq types : les sols peu évolués d'érosion sur matériaux gravillonnaires, les vertisols sur alluvions ou matériaux argileux, les sols ferrugineux tropicaux peu lessivés sur matériaux sablo-argileux, argilo-sableux, les sols ferralitiques et les sols hydromorphes (Sauret, 2013).

Cette zone est bien arrosée par la présence de cours d'eau permanente que sont la rivière Yengué, les marigots Niamé et Houet et les rivières Suo (Wellens et al. 2008). Cette zone est également connu pour la présence de différentes sources dont les plus importantes en termes de débits fournis sont les sources ONEA1 et 2 et les sources de la guinguette situées à Nasso (carte 2).



Carte 2 : Carte de la situation hydrographique et localisation des sources et points de prélèvement

1-1-3. Végétation et occupation des sols

La végétation de la zone est une alternance entre forêts claires et savanes. De manière plus détaillée, elle est composée de 6 classes de végétations que sont : la végétation aquatique dans les lits des rivières guinguette et Kou, la forêt-galerie formant une ceinture autour de la guinguette et du Kou aussi présente dans les autres bas-fonds, la forêt claire dominée par *Anogeissus leiocarpus*, *Celtis integrifolia* et *Khaya senegalensis*, la savane boisée caractérisée par 2 groupements, dont l'un à *Azelia africana* et *Acacia dudgeoni*, et l'autre à *Terminalia avicenniodes* et *Pericopsis laxiflora*, la savane arborée dominée par *Anogeissus leiocarpus* et *Azelia africana* et enfin la savane arbustive sur les glacis. (Niamian, 2008).

L'occupation des terres peut se résumer en 5 groupes que sont : la végétation naturelle décrite plus haut ; une zone urbaine représentant les zones habitées ; les zones agricoles comprenant les périmètres irrigués et les champs pour les cultures de saison ; les plans d'eau, et les sols nus érodés.

1-2. Cadre climatique

Notre zone d'étude contenue dans le bassin du KOU est située dans une zone climatique du type soudanien (figure2).

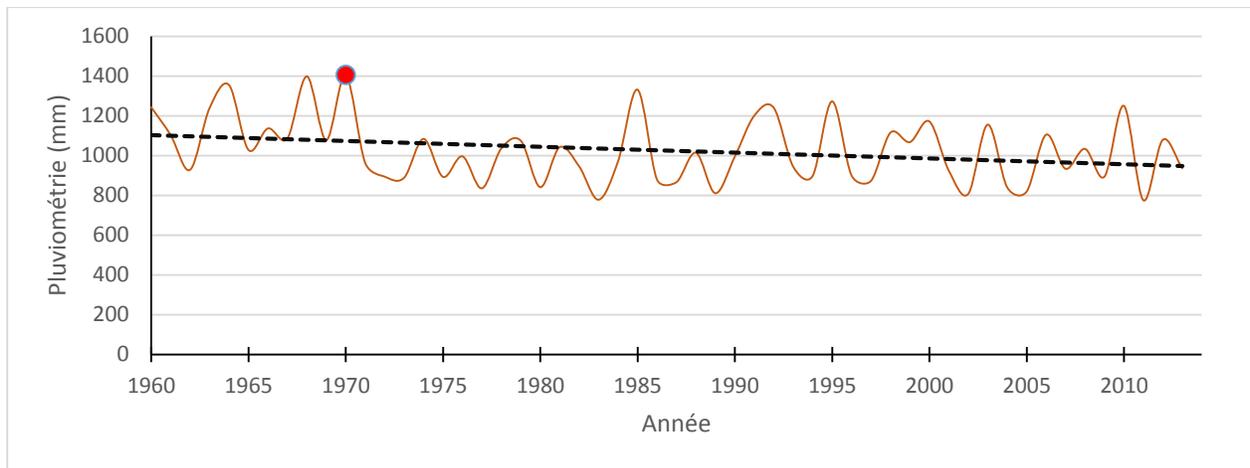
Cette zone est caractérisée par 2 types de saisons : - une saison pluvieuse qui part de Mai à Octobre avec les mois de Juillet – Aout – septembre comme étant les mois les plus pluvieux

- une saison sèche qui s'étale de Novembre à Avril avec les mois de décembre à février qui sont caractérisés par l'harmattan un vent froid et très sec.

Les facteurs influençant le climat sont généralement la pluviométrie, les températures, l'évapotranspiration, les rayonnements solaires et le vent.

En ce qui concerne la pluviométrie nous pouvons constater une baisse générale de la pluviométrie ce à partir des années 1960. Avant cette date notre zone passe de la zone était située entre les isohyètes 1100 et 1200 après cette date elle est passée entre les isohyètes 900 et 1100. Dans les années 1970, on remarque une légère remontée des isohyètes, mais elle reste toujours entre les isohyètes 900 et 1100 (Wellens et al., 2005)

Cela est visible par l'analyse de la pluviométrie de la station de Bobo-Dioulasso (graphe1) :



Graph 1 : Évolution de la pluviométrie de la station de Bobo-Dioulasso

En effet, sur le graphique 1 nous pouvons remarquer que la pluviométrie est plus ou moins élevée entre 1960 et 1970. À partir de 1970, on assiste à une chute brusque et significative de la pluviométrie qui passe d'environ 1400 mm à 778 mm en 1983, pour ensuite connaître une faible remontée à partir de 1984. Mais la remontée de 1984 ne permet pas cependant à la pluviométrie d'atteindre à nouveau les tendances qu'elle avait avant les années 1970.

La pluviométrie étant un facteur essentiel pour notre étude une compréhension plus ou moins détaillée des tendances s'impose à nous. Les tests statistiques de la méthode de Pettit et la méthode de segmentation de Hubert nous ont permis de mettre en lumière les ruptures dans la série de données pluviométriques. Les résultats sont consignés dans le tableau 5 :

Tableau V: Test de rupture sur les précipitations annuelles de 1960 à 2013

Méthode de Pettit		Méthode de Hubert	
Année de rupture	Seuil de confiance (%)	Année de rupture	Déficit ou excédent (%)
1970	90	1970	19.91

Ces tests font ressortir une rupture en 1970 avec une moyenne de 1181.8 mm avant 1970 et une moyenne de 985mm après la rupture. Cela montre une nette diminution de la pluviométrie.

En vue de mieux comprendre les tendances en détail, l'étude sur les fluctuations pluviométriques basées sur des indices pluviométriques comme celui de Nicholson ont été menée. Ils sont calculés à partir de l'expression suivante :

$$I_{ps} = \frac{P_i - P_m}{S}$$

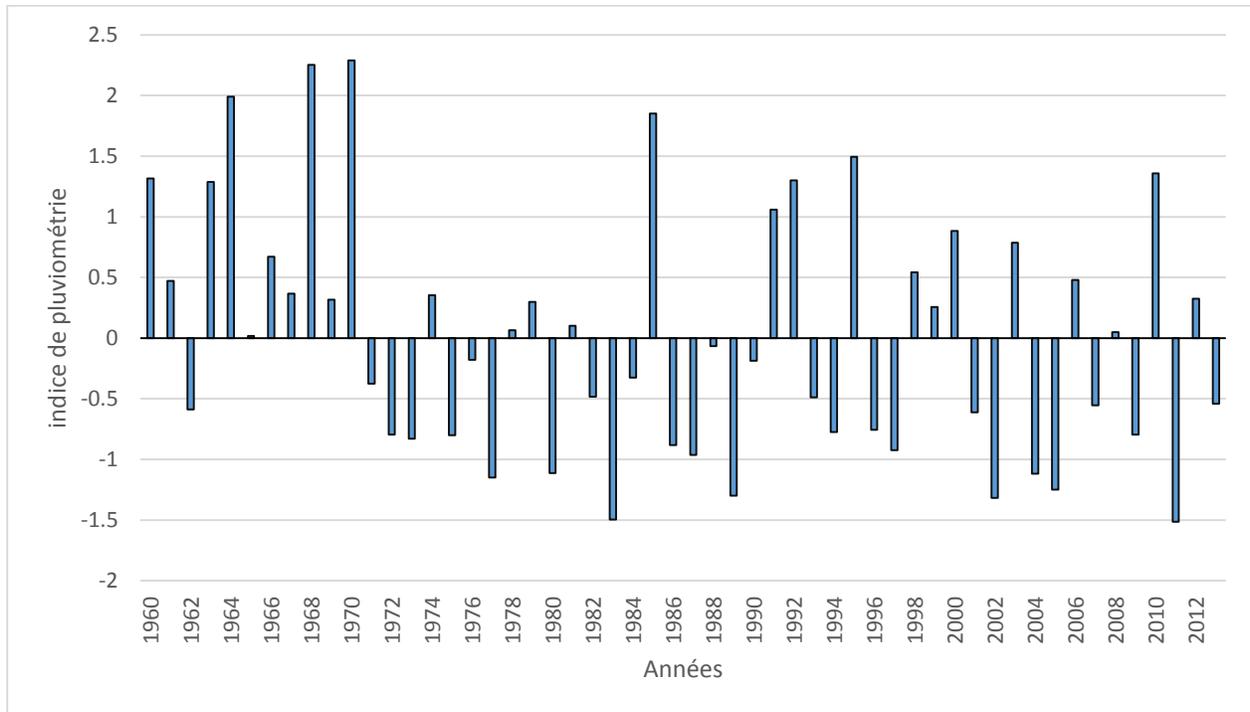
Avec :

I_{ps} : Indice de pluie standardisé

S : l'écart type de la série ;

P_i : pluviométrie de l'année i ;

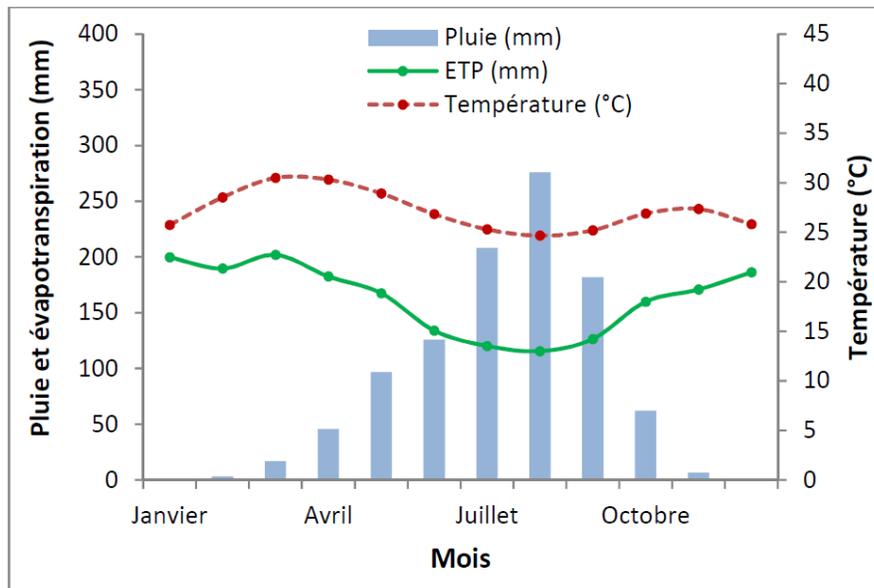
P_m : pluviométrie moyenne de la série.



Graph 2: Indice de pluie standardisé (IPS) à la station de Bobo-dioulasso

Cet indice permet de distinguer les années humides des années sèches en faisant ressortir la succession des années déficitaires et des années excédentaires pour l'année considérée par rapport à la période de référence choisie. A partir de l'année 1970, nous pouvons noter une rupture dans la tendance climatique.

Il donne l'écart par rapport à la moyenne d'une série pluviométrique (Wellens et al., 2005). De ce graphique il ressort qu'entre 1960 et 1970 nous avons une prédominance d'années humides. A partir de 1970 jusqu'à 1998, nous avons une prédominance des années sèches. Et à partir de 1999, nous constatons une alternance des années sèches et des années humides.



Graph 3 : Moyennes mensuelles de pluie, d'évapotranspiration potentielle (formule de Penman) et de température de l'air de 1961 à 2014 pour la station de Bobo-Dioulasso (Justine, 2016)

A partir de ce graphe (graphe3) synthétisant la fluctuation annuelle de la température et de l'évapotranspiration globale nous constatons que les températures varient généralement entre 25 °C et 30 °C. Les mois de plus chauds sont entre Mars et Mai et les mois qui ont les plus faibles températures sont décembre et Janvier.

L'évapotranspiration potentielle est maximale durant le mois de mars (202 mm) et minimale durant le mois d'août (116 mm).(Tirogo, 2016)

1-3. Cadre géologique et hydrogéologique

La géologie du Burkina est constituée par deux domaines de formations géologiques ayant des situations géographiques bien distinctes (Castaing et al., 2003):

- un domaine constitué de formations de socle d'âge Paléoprotérozoïque à Mésoprotérozoïque sur plus de 80 % du territoire ;
- un domaine de sédiments du Néoprotérozoïque et du Cénozoïque (Continental Terminal) du bassin de Taoudéni recouvrant de façon discordante aux frontières nord, ouest et sud-ouest du pays et sur la frontière sud-est, de ceux de la bordure septentrionale du bassin voltaïen.

Le bassin du Kou est composé de six (6) formations géologiques à dominance gréseuse (figure 3 et figure 4):

- Les Grès de Kawara-Sindou (GKS)

Elle comporte de nombreuses stratifications obliques tabulaires et ripple-marks (Figure 7) et comprend deux faciès : à la base, le faciès grossier de Kawara et au sommet, le faciès de Sindou (Gombert, 1998) ; (Ouédraogo, 2006). La formation des GKS est très fracturée suivant deux directions prédominantes : SSE-NNO et SO-NE. Ils ont une épaisseur allant de 60 m à 350 m ;

- Les Grès fins glauconieux (Gfg)

La partie inférieure des Gfg est composée d'une alternance de grès grossiers conglomératiques glauconieux et de minces niveaux de grès très fins, silteux à débit schisteux. Elle se termine par des grès fins ou moyens à passées grossières. Au sommet, leur contact avec les Ggq est souvent masqué à l'affleurement par des latérites (Gombert, 1998). La formation est peu ou pas fracturée avec la présence d'une faille d'effondrement SO-NE de faible extension. Ils ont une épaisseur allant de 150 m à 500 m ;

- Les Grès à granules de quartz (Ggq)

La formation des Ggq est composée de grès quartzite fin à moyen avec des passées de grès grossiers à gros galets et est marquée par la présence de granules de quartz. Les Ggq sont dépourvus de glauconie et sont très hétérogènes indiquant un retour à une sédimentation de type fluviolittoral, témoin de conditions marines peu profondes dans un environnement climatique en détérioration (Gombert, 1998). Cette formation est bien fracturée. Ils ont une épaisseur allant de 0 m à 500 m ;

- Les Siltstones, Argilites et Carbonates (SAC1)

La caractéristique principale de cette formation est son hétérogénéité. Elle est formée de grès, de siltstone avec des niveaux d'argilite parfois épais et de quelques bancs carbonatés (SOGREAH, 1994). Cette formation caractérise un milieu de sédimentation marin peu profond et peu agité, localement et temporairement émergé et soumis à un paléoclimat plutôt chaud et aride. Leur épaisseur totale est estimée à 300 m ;

- Les Grès fins roses (Gfr)

Cette formation géologique est formée de grès-quartzites fins à très fins, micacés et glauconieux, finement lités, à nombreuses ripple-marks symétriques à crêtes ondulées ou linguloïdes (Ouédraogo, 2006). Elle s'intercale entre les deux formations des Siltstones, Argilites et Carbonates (SAC1 et SAC2) de la série sédimentaire. Épaisse d'une centaine de mètres, la formation des Gfr occupe environ 25 km² dans le bassin du Kou et affleure dans de nombreux endroits ;

- Les Dolérites

Elles affleurent abondamment aux extrémités ouest et nord du bassin du Kou et se présentent sous forme de silts grossièrement concordants, de dykes (filons) et de necks ((SOGREAH, 1994) ;

(Gombert, 1998)). Ces dykes et sills n'affleurent que très rarement et se retrouvent à différents niveaux de profondeur sous les sédiments.

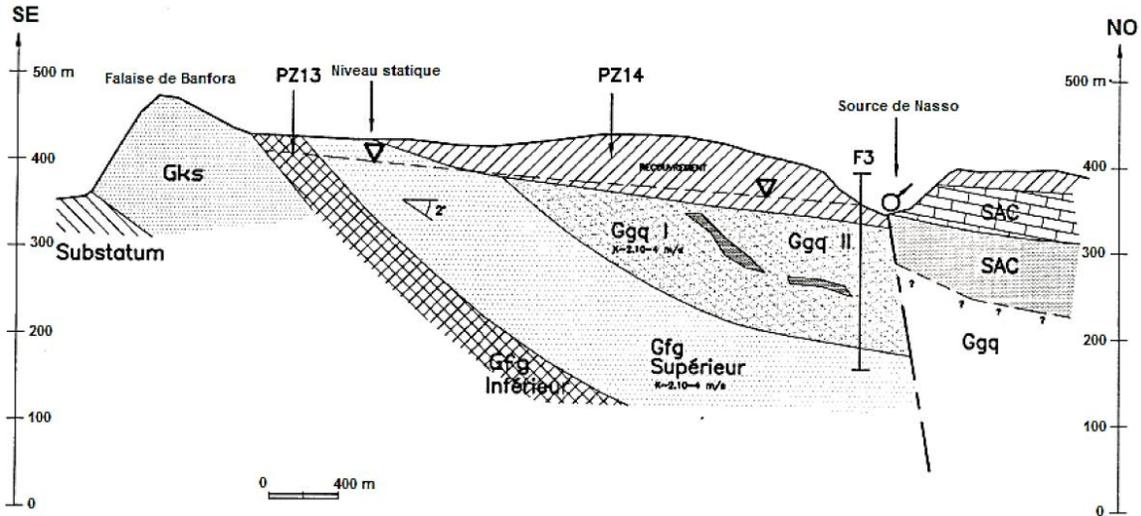


Figure 2: Coupe géologique synthétique de la zone de Bobo-Dioulasso source : (SOGREAH 1994)

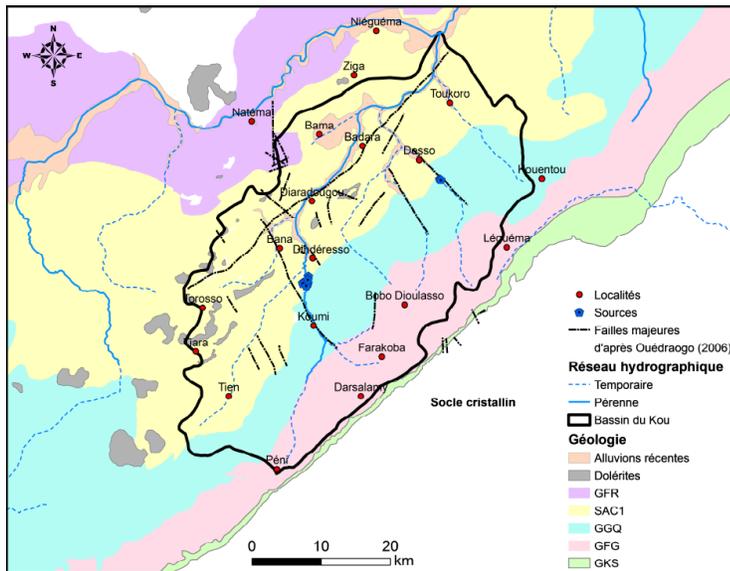


Figure 3: Carte géologique de la zone d'étude d'après (Tirogo, 2016)

Les formations géologiques précitées représentent les différents aquifères de notre zone d'étude.

IV-2. Matériel

2-1. Données utilisées en entrée

Pour mener à bien cette étude, nous avons collecté des données numériques consignées dans le tableau 5 :

Tableau VI : Données d'entrée

Paramètres	Sources
Débits mesurés à l'exutoire	Données de la station hydrométrique de Badara (1986 à 2000)
Climat et Pluie	Données de la station synoptique de Bobo-Dioulasso (1960-2014)
Relief, pentes	Modèle Numérique de Terrain USGS, ASTER GDEM, 30 m
Occupation des sols	Base de Données d'Occupation des Terres (BDOT, IGB 2002)
Sols	Base de données des sols FAO au 1:5000000 ^{ème}

2-2. Choix du modèle

La grande diversité des modèles hydrologiques donne l'embaras du choix aux ingénieurs pour une application donnée. Afin d'éviter les erreurs et les inconvénients dus au mauvais choix, il est nécessaire d'effectuer le choix en fonction des objectifs de l'étude.

Le choix du modèle s'est basé sur les critères de choix suivant :

- La disponibilité des données d'entrée
- La capacité du modèle à simuler les données manquantes
- La capacité du modèle à simuler la réponse hydrologique tout en tenant compte de la composante souterraine
- La capacité du modèle à analyser l'impact conjugué du climat et des activités anthropiques sur la réponse hydrologique globale des bassins versants
- La facilité d'utilisation grâce à une interface conviviale facilitant le traitement de données et la représentation des données et des fichiers de sortie.

Cependant, il n'est pas toujours évident de trouver un modèle satisfaisant à la fois toutes ces exigences. Suivant ces critères, notre choix s'est porté sur le modèle agro hydrologique SWAT (Soil and Water Assessment Tool).

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) est un modèle hydrologique conçu et développé par des chercheurs de l'USDA (United States Department of Agriculture) -Agricultural Research Service (Arnold et al. 1998). Selon le critère de la représentation spatiale SWAT est un modèle physique semi-distribué permettant de manipuler et d'analyser de nombreuses données hydrologiques et agronomiques en vue de modéliser les flux d'eaux et autres solutés à l'échelle d'un bassin versant. La modélisation est faite à un pas de temps continu ou événementiel. Il permet de modéliser plusieurs évènements tels que la réponse hydrologique, l'étude des effets du climat et du changement climatique, l'effet du changement de l'occupation des sols, l'étude de l'effet et du transfert des charges polluantes, l'étude des problématiques de la gestion de l'eau d'irrigation et de la gestion de la ressource, l'étude des effets des crues sur des structures hydrauliques projetées (Gassman et al., 2014). SWAT est majoritairement utilisé pour les études portant sur les questions hydrologiques, et dans des situations moins nombreuses sur les questions de transports de sédiments et de transferts de polluants (Gassman et al., 2007). Les études précédemment effectuées démontrent qu'il est possible d'obtenir avec de bons résultats avec le modèle SWAT dans le domaine de la simulation et la prédiction du ruissellement et des charges sédimentaires (Gassman et al., 2007).

Dans le but de faciliter et automatiser la préparation des données d'entrées, de rendre plus conviviale la phase d'intégration, de manipulation et le paramétrage des données liées à la simulation le modèle SWAT a été couplé avec le logiciel de SIG ARCGIS.

L'établissement du bilan hydrologique avec SWAT se fait en deux phases (M. Lang et al., 2011) :

- ❖ Une phase dite terrestre dans laquelle les différents termes nécessaires à l'établissement du bilan hydrologique à proprement parler seront calculés (figure 4).

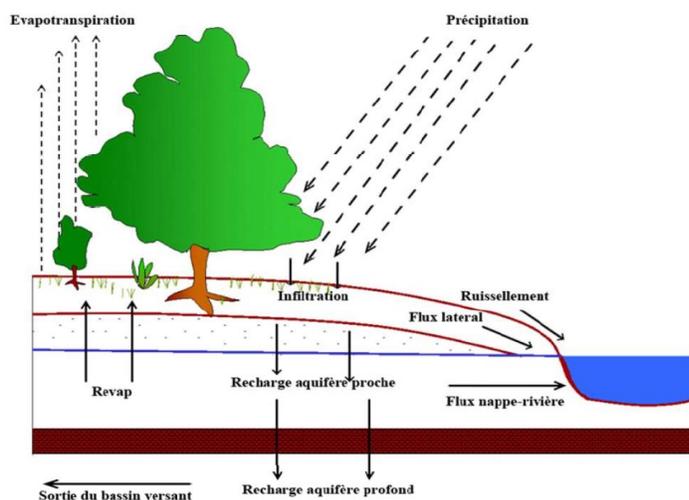


Figure 4: Schéma du cycle hydrologique

- ❖ Une phase dite “de routage” dans laquelle le mouvement de l’eau et des différents éléments (sédiments, carbones, azote, phosphore sera modélisé à travers le réseau hydrographique jusqu’à l’exutoire) (figure 5).

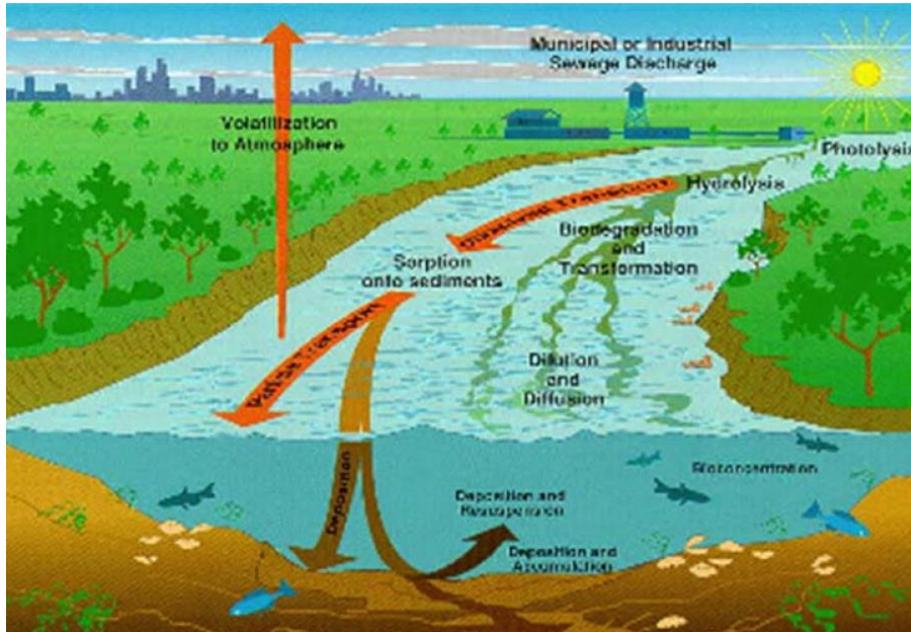


Figure 5: Transport des éléments (eau, sédiments, pesticides, nutriments, ...) au sein du réseau hydrographique (Lang, J., et B. 2011)

Ce modèle est un modèle complexe demandant un grand nombre de données d’entrée. Cependant, nous pouvons compter quelques travaux effectués avec SWAT dans la sous-région de l’Afrique de l’Ouest, zone caractérisée par le manque de données d’observation disponibles, qui cependant ont donné de bons résultats de modélisation (Schuol et al., 2007 ; Bossa et al., 2012 ; Awotwi et al., 2014 Begou et al., 2016 ; Poméon et al., 2018).

IV-3.Méthodes

L’un des objectifs de cette étude étant la modélisation du cycle hydrologique de l’eau et l’étude de la réponse hydrologique afin de faire ressortir les composantes du bilan hydrologique en vue de mieux estimer la ressource en eau, le principe de modélisation est celui de la modélisation pluie – débit. Ce principe consiste à représenter la transformation de la pluie en écoulement de surface se basant sur l’intervention de plusieurs facteurs physiques. Pour ce faire, comme dit plus haut le modèle SWAT est un outil que se prête bien à cet exercice.

De manière générale, la méthodologie qui a consisté pour nous à mener l’étude selon trois scénarios :

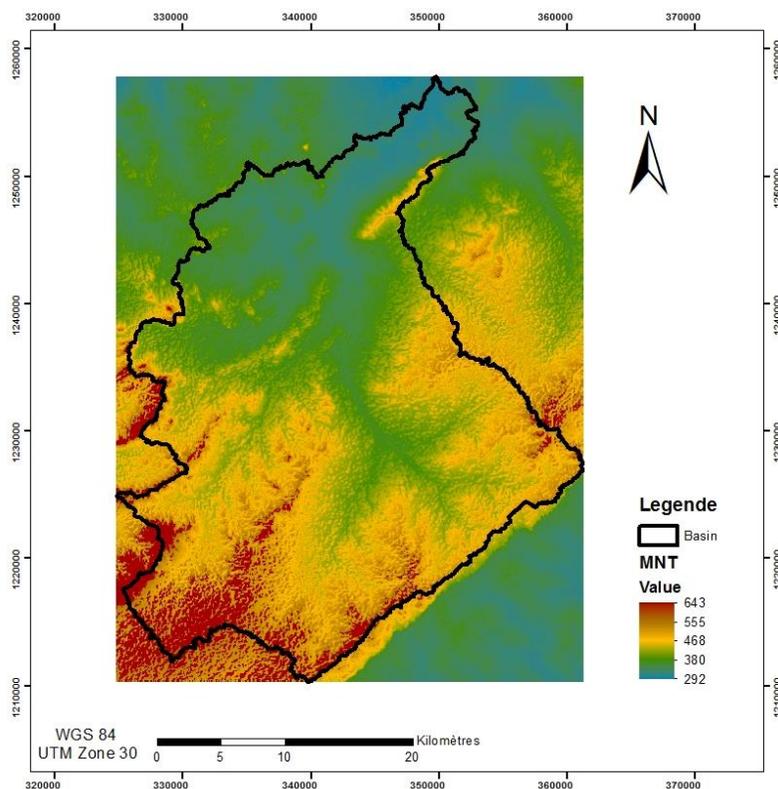
- Comme mentionné plus haut dans l'état de l'art, la plupart des études au préalable faites ne prenaient pas vraiment en compte les sources ni les prélèvements, ainsi dans ce premier scénario que nous avons nommé **scénario S0**, nous menons notre **étude sans intégrer les données des sources et des prélèvements**. Ce cas est considéré comme l'état initial.
- Dans ce second scénario que nous nommons **scénario S1**, notre **étude est menée en prenant en compte les données des sources** pour faire ressortir les impacts de ces sources sur la réponse hydrologique ;
- Dans ce dernier scénario que nous nommons **scénario S2**, notre **étude est menée en prenant en compte en plus des données des sources les données des prélèvements au niveau des forages** pour faire ressortir les impacts de ces prélèvements sur la réponse hydrologique.

Ce qui suit est la description de toutes les étapes communes à tous les cas de figure que nous avons suivis allant de la collecte des données jusqu'à l'établissement des composantes du bilan hydrique.

3-1 Collecte et traitements des données

- ✓ Les données topographiques

Le modèle numérique de terrains (MNT) est du type ASTER GDEM de résolution 30 m. Il a été obtenu sur le site de l'USGS (United States Geological Survey) <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

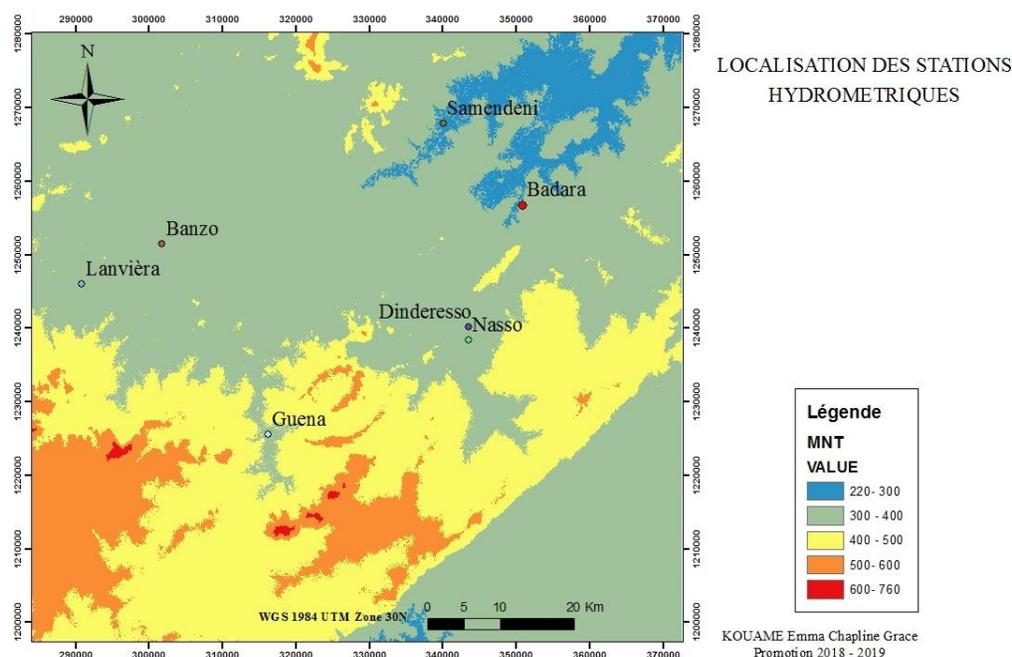


Carte 3 : Carte du modèle numérique de terrain

La zone d'étude est caractérisée majoritairement par un plateau avec des altitudes entre 290 et 500m. Et un peu plus au sud on remarque une augmentation des altitudes qui varient entre 500 m d'altitude et 654 m.

✓ Données hydrométriques

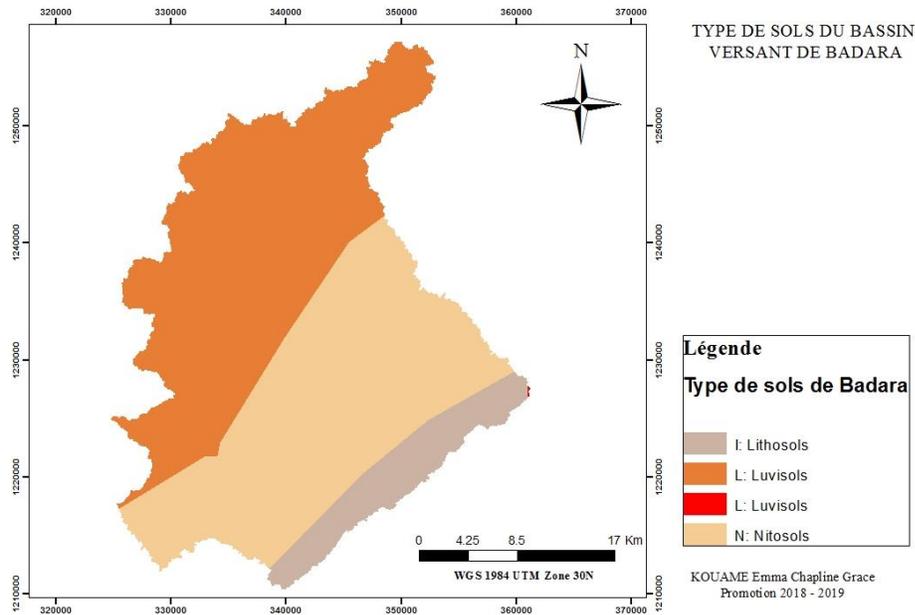
Les débits observés utilisés comme données d'entrée ont été collectés au niveau de la station hydrométrique de Badara. Cette station hydrométrique représente l'exutoire du bassin soumis à notre étude (carte 4).



Carte 4: Localisation des stations hydrométriques

✓ Pédologie et type de sol

Les données concernant le type de sols proviennent de la base de données des sols FAO avec une échelle de 1:5000000^{ème}. Elles tiennent compte des caractéristiques hydriques des sols téléchargeables sur le site de la FAO gratuitement (carte 5).



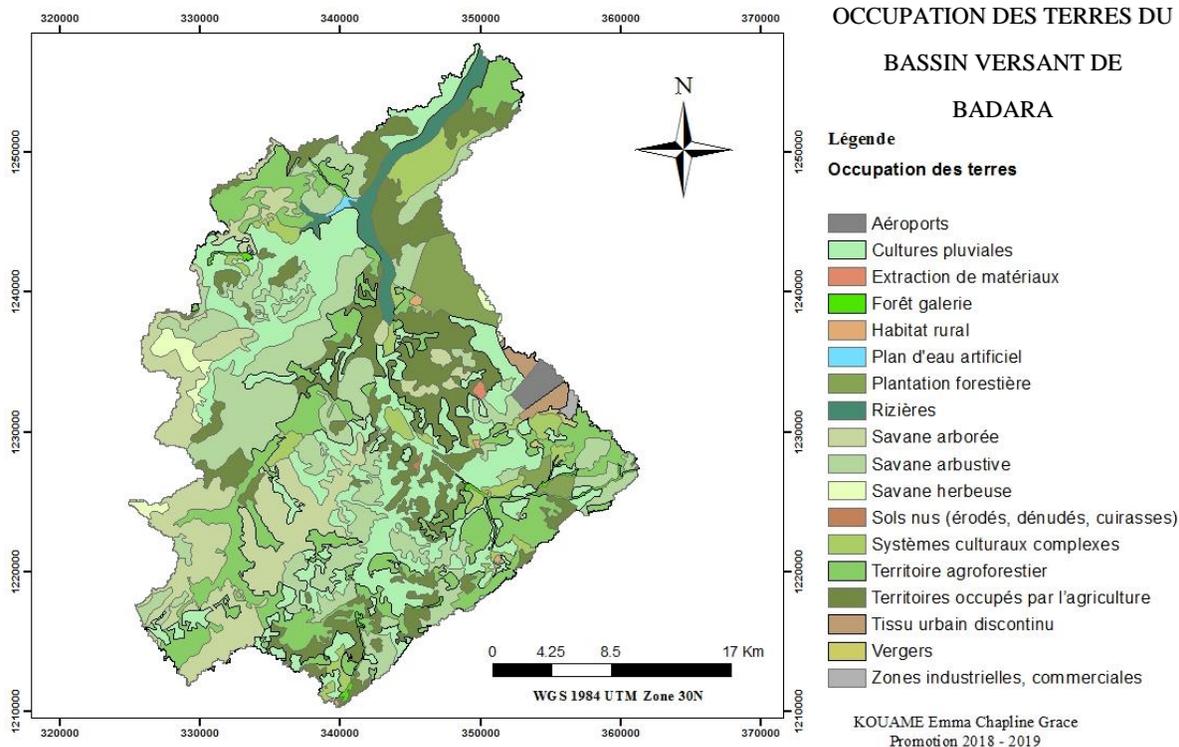
Carte 5: Type de sols du bassin versant de Badara

Le sol du bassin versant de Badara est composé de quatre variantes de sols que sont :

- Les Nitosols : Sols argileux profonds à structuration polyédrique riche en kaolinite ;
- Les Luvisols : horizon de surface grossier surmontant un horizon fin, riches en oxydes de fer et d'aluminium ;
- Les Lithosols : Sols squelettiques grossiers situés généralement sur les versants ou les sommets de cuirasse ferrugineuse.

- Occupation des terres

Les données concernant l'occupation des terres proviennent de la base de données d'occupations des terres de 2002 de l'institut géographique du Burkina (IGB) (carte 6).



Carte 6: Occupation des terres du bassin versant de Badara

✓ Données météorologiques et hydrométriques

Les données météorologiques sont issues de l'agence nationale de la météorologie pour la station de Bobo-Dioulasso.

Tableau VII : Données météorologiques

Station	Données	Périodes	Moyenne annuelle	Maximum	Minimum	Écart types
Bobo-Dioulasso	Pluie journalière (mm)	1960-2013	1025.6	1404.3	778.4	135.8
	Températures maximales moyennes annuelles (C°)	1960-2013	32.6	34.33	21.2	0.46
	Températures minimales moyennes annuelles (C°)	1960-2013	21.6	29.7	11	0.39
	Évapotranspiration potentielle (mm)	1961-2014	1959.6	2200.4	1741.9	91.59

Quant aux autres données climatiques telles que l'humidité relative, l'ensoleillement et la vitesse du vent ont été simulés par SWAT à partir de la base de données intégrée, « Global weather data ».

Les données des débits sont issues du système de la station hydrométrique de Badara, dont les caractéristiques sont consignées dans le tableau 7 :

Tableau VIII : Coordonnées de la station hydrométrique de Badara

Station de jaugeage	Coordonnées	Altitude approximative	Période	Nombre de valeurs	Lacunes (%)
Badara	Latitude :11°22'00'' N Longitude :4°22'02'' W	447.00 m	1986-2000	3773	27,9

Il a été question pour nous de traiter les données météorologiques et hydrométriques en format Excel, de préparer les cartes et les fichiers « shapefile », et la création de fichiers textes à partir des données météorologiques la simulation sur SWAT traitée.

La préparation des cartes et le traitement des fichiers « shapefile » a consisté en premier lieu à procéder à des projections afin de mettre toutes nos couches dans le même système de coordonnées et de projection qui pour nôtre est la référence spatiale est WGS 1984 / UTM Zone 30N. En second lieux nous avons procédé à la transformation de certains fichiers « shapefile » tels que celui de l'occupation des sols et du type de sol en fichier raster.

Par la suite, nous avons procédé à mise en forme des données météorologiques. Il a s'agit dans notre cas des donnés de précipitations journalières de 1960 à 2014, les températures maximales et minimales. Toutes les autres données seraient donc simulées par le modèle directement. N'ayant pas de station météorologique à Badara nous avons utilisé les données de celle de Bobo-Dioulasso (Voir annexe I).

✓ Données sur les sources et les prélèvements au niveau des forages

Le bassin versant de Badara une zone riche en sources. Il a s'agit pour nous de faire ressortir les positions et différents débits observés au niveau de ces sources, les positions et différents débits des forages de la zone.

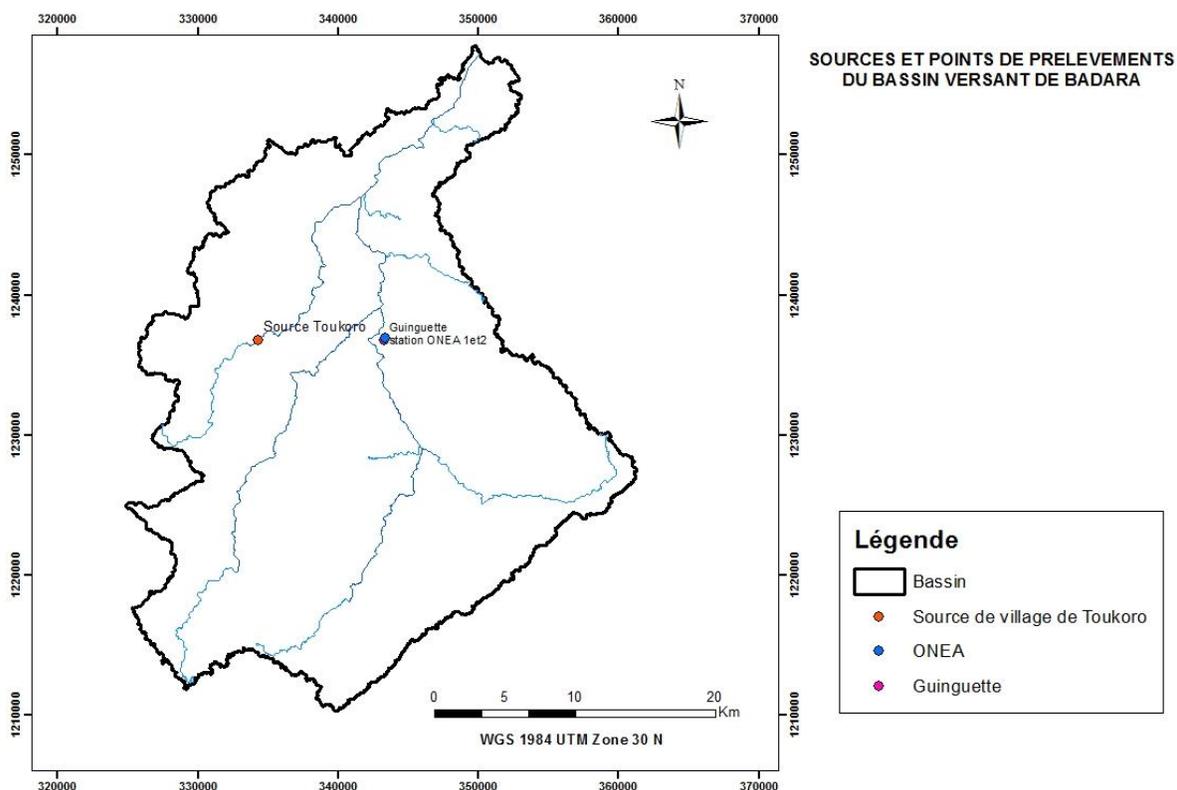


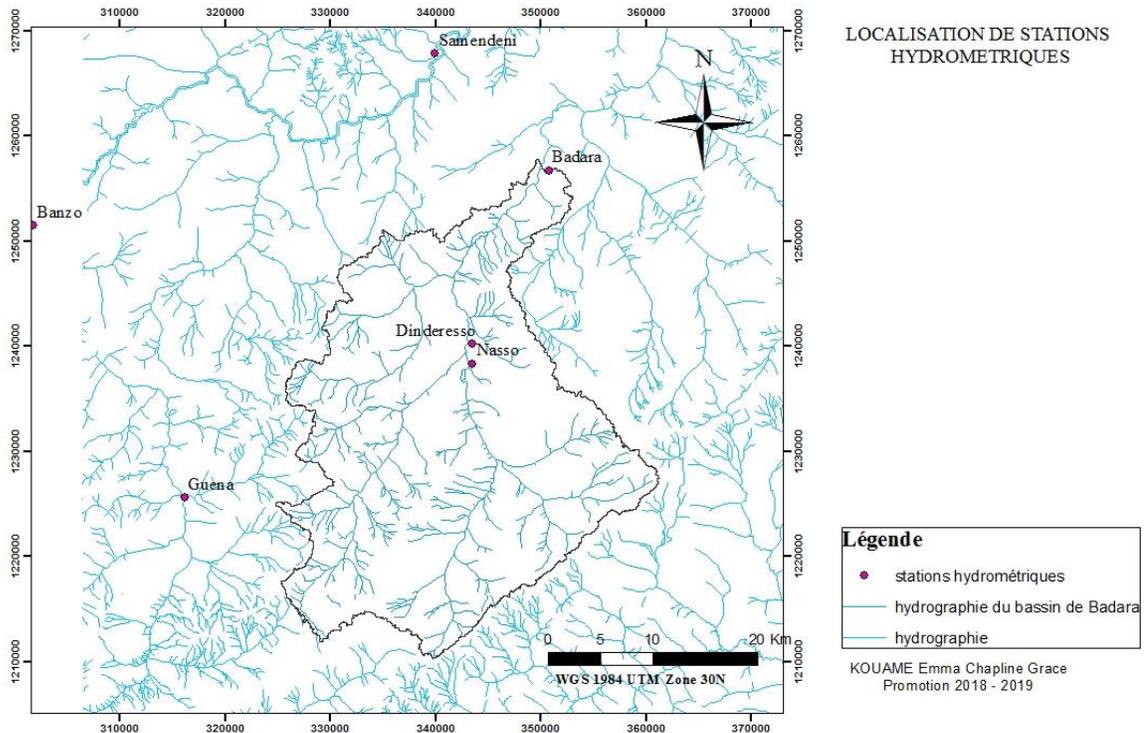
Figure 6: Les sources et forages de Badara

3.2- Mise en route du modèle SWAT

La première partie de la modélisation consiste à la simulation avec Arcswat et la deuxième partie concerne le calage et la validation du modèle qui se fait grâce au logiciel Swa_cup.

3-2-1. Délimitation des sous-bassins versants

Pour cette première étape, consiste à délimiter les sous-bassins versants en se basant sur le modèle numérique de terrains représentant la donnée topographique (carte 7).



Carte 7: Réseau hydrographique et localisation des stations hydrométriques

3-2-2. Définition des Unités de réponses hydrologiques (URH)

Après avoir délimité les sous-bassins, nous procédons à la définition des Unités de réponses hydrologiques (URH). Les URH représentent l'unité de calcul dans le processus de discrétisation spatiale effectué par SWAT permettant de quantifier les différents processus (le ruissellement, l'infiltration, l'évapotranspiration...) de chaque unité spatiale. Les URH sont obtenus à partir de la combinaison du découpage des sous-bassins, de l'occupation des terres, du type de sol et des pentes. Il y a deux possibilités pour la définition des URH : la première possibilité consiste à homogénéiser les HRU pour chaque sous-bassin et la deuxième consiste à assigner autant de URH que possible au bassin versant. La seconde possibilité a été choisie, car étant plus représentative. Il s'agit alors de déterminer un pourcentage seuil pour la superficie du sous-bassin, le type de sols, les classes de pente et l'occupation des terres. Cela définit les spécificités qui ne seront pas prises en compte lors de la simulation.

La valeur de seuil communément utilisée pour les trois classes (land use, slope et soil) est de 20 % (« Soil and Water Assessment Tool: User's manual version 2000 », 2002).

Cependant dans notre cas nous avons plutôt opté pour des seuils différents en examinant la distribution des différents éléments de chaque classe. Les seuils établis dans notre cas étaient de

15 % pour le type d'occupation des terres, de 40 % pour le type de sol et de 20 % pour la classe de pente.

3-2-3. Intégration des stations météorologiques et création des tables par le modèle

Après la définition des unités de réponses hydrologiques, nous passons à l'intégration des données météorologiques. Il s'agit de données qui concernent la pluviométrie, les températures minimales et maximales à pas de temps journaliers. En ce qui concerne les autres données telles que les données sur la vitesse du vent, l'humidité relative et le rayonnement solaire, elles ont été directement simulées à partir d'un générateur de climat associé à arcswat.

Après ces données intégrées arcswat procède à la construction des différentes tables des informations nécessaires à la création des données d'entrées utilisées par le modèle.

À la suite de l'étape de la création des tables par swat, nous insérons les données concernant les sources et autres points de prélèvement.

3-2-4. Simulations

Après que toutes les données aient été correctement intégrées, on passe à la simulation. À cette étape, nous déterminons le pas de temps des données de sortie. Nous avons opté dans le cas de cette étude pour un pas de temps mensuel pour nos données de sortie sur la période de simulation allant de 1986 à 2000.

✓ L'établissement du bilan hydrologique avec SWAT

Les termes du bilan sont exprimés par l'équation suivante :

$$SW_t = SW_{0_i} + \sum_{i=1}^t (R_{Day_i} - Q_{surf_i} - E_{a_i} - W_{seep_i} - Q_{gw_i}) dt$$

Avec

SW_t : le contenu final en eau du sol (à la fin du jour i) (mm)

SW_{0_i} : le contenu initial en eau du sol (au début du jour i) (mm)

R_{day_i} : les précipitations au jour i (mm)

Q_{surf_i} : le ruissellement de surface au jour i (mm)

E_{a_i} : l'évapotranspiration au jour i (mm)

W_{seep_i} : un flux latéral représentant la quantité d'eau entrant dans la zone de vadose (mm) ("lateral flow" sur)

Q_{gw_i} : le flux de retour issu de la zone saturée en eau au jour i (mm) ("return flow")

- ✓ Le ruissellement de surface est estimé grâce à la méthode SCS (Soil Conservation Service) suivant l'équation :

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \text{ avec } S = 25.4 * \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

Avec

Ia : Les pertes initiales dues à l'interception par la canopée et le stockage de surface

S : le paramètre de rétention

CN : l'aptitude au ruissellement du sol (Curve number)

3-2-5. Calage et validation

Le calage a pour but d'établir une concordance entre les variables simulées et observées en modifiant les paramètres hydrologiques et hydrauliques en vue de les estimer avec plus de certitudes.

Pour le calage, nous utilisons l'outil swat cup et la procédure de « Sequential Uncertainty Fitting program (SUFI-2) » est celle qui est choisie. Cet algorithme a été mis au point pour l'optimisation des paramètres de sorte que toutes les incertitudes (paramètre, modèle conceptuel, entrée, etc.) sont mappées sur les gammes de paramètres, qui sont calibrés pour fixer la plupart des données mesurées dans l'incertitude de prédiction à 95 % (Abbaspour et al., 2007). Par cette procédure on obtient une assez bonne calibration.

La calibration commence par la sélection de paramètres de calage et de leurs intervalles initiaux. Pour cette étape, nous nous sommes basés sur la littérature concernant les bassins ouest-africains présentant des caractéristiques sensiblement pareilles à notre bassin versant et les éléments que nous voulions faire ressortir. Ainsi nous avons sélectionné les paramètres les plus souvent utilisés. Nous avons identifié un ensemble de paramètres qui répondait au résultat que nous voulions faire ressortir, de ce fait la liste qui suit n'est pas une liste exhaustive des paramètres calables. Nous pouvons catégoriser les différents paramètres comme suit (tableau 9) :

Tableau IX : Paramètres de calage

	Paramètres	Définition	
Paramètres liés à l'évapotranspiration réelle et potentielle	ESCO	Soil evaporation compensation factor	Facteur sol d'évaporation du sol en fonction de la profondeur
	EPCO	plant uptake compensation factor	Facteur végétal d'évaporation du sol en fonction de la profondeur
Paramètres liés au ruissellement de surface	SURLAG	Surface runoff lag coefficient	Coefficient de délai du ruissellement
	CN2	Initial SCS runoff curve number for moisture condition II	
	OV_N	Manning's "n" value for overland flow	Coefficient de Manning d'ensemble du réseau hydrographique
Paramètres liés à l'eau dans le sol	Sol BD	Moist bulk density	Densité apparente humide
	Sol_AWC	Available water capacity of the soil layer	Capacité en eau disponible dans la couche de sol
	Sol K	Saturated hydraulic conductivity	Conductivité hydraulique à la saturation
Paramètres liés aux eaux souterraines	GW_Delay	Ground water delay	Délai de recharge de l'aquifère
	ALPHA_BF	Base flow alpha factor	Coefficient de tarissement de la nappe souterraine
	GWQMN	seuil de profondeur de l'eau dans l'aquifère peu profond nécessaire au retour du flux	Seuil de contribution de la nappe souterraine à l'écoulement en chenal, écoulement de base

	GW_REVAP	Ground water "revap" coefficient	Coefficient d'évaporation à partir de la nappe souterraine
	REVAPMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer for "revap" or percolation to the deep aquifer to occur	Seuil d'évaporation à partir de la nappe souterraine
	RCHRG	Deep aquifer percolation fraction	Coefficient de percolation vers la nappe profonde
Paramètres liés à l'acheminement de l'eau par canal	CH_N1	manning's "n" value for the tributary channels	Coefficient de Maning des chenaux secondaires
	CH_N2	manning's "n" value for the main channels	Coefficient de Maning des canaux principaux
	CH_K1	Effective hydraulic conductivity in tributary channel alluvium	Perméabilité des berges des canaux secondaires
	CH_K2	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium	Perméabilité des berges des canaux principaux
	HRU_SLP	Mean slope of HRU	Pente principale du HRU
	SLSUBBSN	Average slope length	Longueur moyenne de la pente

Le calage et la validation se font sur deux périodes différentes. Nous avons choisi 2 ans (1986-1987) comme période de mise en route du modèle. Cette valeur est incluse dans l'intervalle de 2 ans à 5 ans recommandés (J.G ARNOLD et al., 2012). La période de 1987-1993 correspond à la période de calage et la période de 1998 à 2000 correspond à la période de validation. Pour le processus, nous avons réalisé 10 itérations de 500 simulations chacune.

Pour l'évaluation de la performance du calage, nous effectuons une observation visuelle des hydrogrammes simulés et observés afin de voir la qualité des ajustements ; puis nous procédons à une observation quantitative en vérifiant les indices de performance. Les indices de performance que nous vérifions sont :

- Le critère de Nash-Sutcliffe (Nash and Sutcliffe ,1970), noté en générale NS ou NSE. Le coefficient de Nash-Sutcliffe mesure le degré d'ajustement entre les valeurs observées et simulées. Il est compris entre $-\infty$ et 1 calculé selon la formule suivante

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Qobs_i - Qsim_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Qobs_i - \overline{Qobs})^2}$$

Avec

\bar{o} : Débit moyen observé (m^3/s)

$Qobs_i$: Débit observé au pas de temps i (m^3/s)

$Qsim_i$: Débit simulé au pas de temps i (m^3/s)

N : Le nombre de valeurs de la série

- Le coefficient R^2 qui décrit la dispersion combinée des séries observées et simulée en comparaison des dispersions de chacune des séries. Il est compris entre 0 et 1. Lorsque sa valeur tend vers 1 cela indique une diminution de l'erreur de la variance. Il est calculé par la formule suivante :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Qobs_i - \overline{Qobs_i})(Qsim_i - \overline{Qsim_i})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^N (Qobs_i - \overline{Qobs_i})^2) \sqrt{(\sum_{i=1}^N (Qsim_i - \overline{Qsim_i})^2)}}$$

- Le pourcentage de biais (PBIAS), (Gupta H. V et al. 1999 ; Dawson C. W et al. 2007) qui exprime en pourcentage le biais moyen existant entre la série de données observées et la série de données simulées. Il est compris en -100 % et +100 %. Une valeur négative indique une sous-estimation du débit et une valeur positive indique une surestimation et une valeur nulle indique une parfaite description de l'observation, ce critère doit donc être minimisé (Grusson ,2016). Il est calculé comme suit :

$$PBIAS = \left| \frac{\sum_{i=1}^N (Qobs_i - Qsim_i)^2 * 100}{\sum_{i=1}^N Qobs_i} \right|$$

Selon les conditions de Moriasi (Moriasi et al.,2007), le calage est supposé satisfaisant dans le cas des simulations des débits liquides si nous avons :

NS ≥ 0.5

R² ≥ 0.5

PBIAS compris entre ± 25%

3.3-Etablissements des termes du bilan hydrologique

Le bilan hydrologique consiste à comparer le flux total entrant dans le bassin versant et la quantité du flux qui en sort à son exutoire.

En raison des données que nous avons, les termes du bilan hydrologique que nous faisons ressortir sont : la pluviométrie, le ruissellement, l'infiltration, et l'évapotranspiration réelle suivant la formule suivante :

$$\mathbf{P = R + I + ET_R + \Delta S}$$

P : précipitation (mm)

ETR : évapotranspiration réelle (mm)

R : écoulement de surface (mm)

I : infiltration profonde ou recharge (mm)

ΔS : variation du stock d'eau dans le sol (mm)

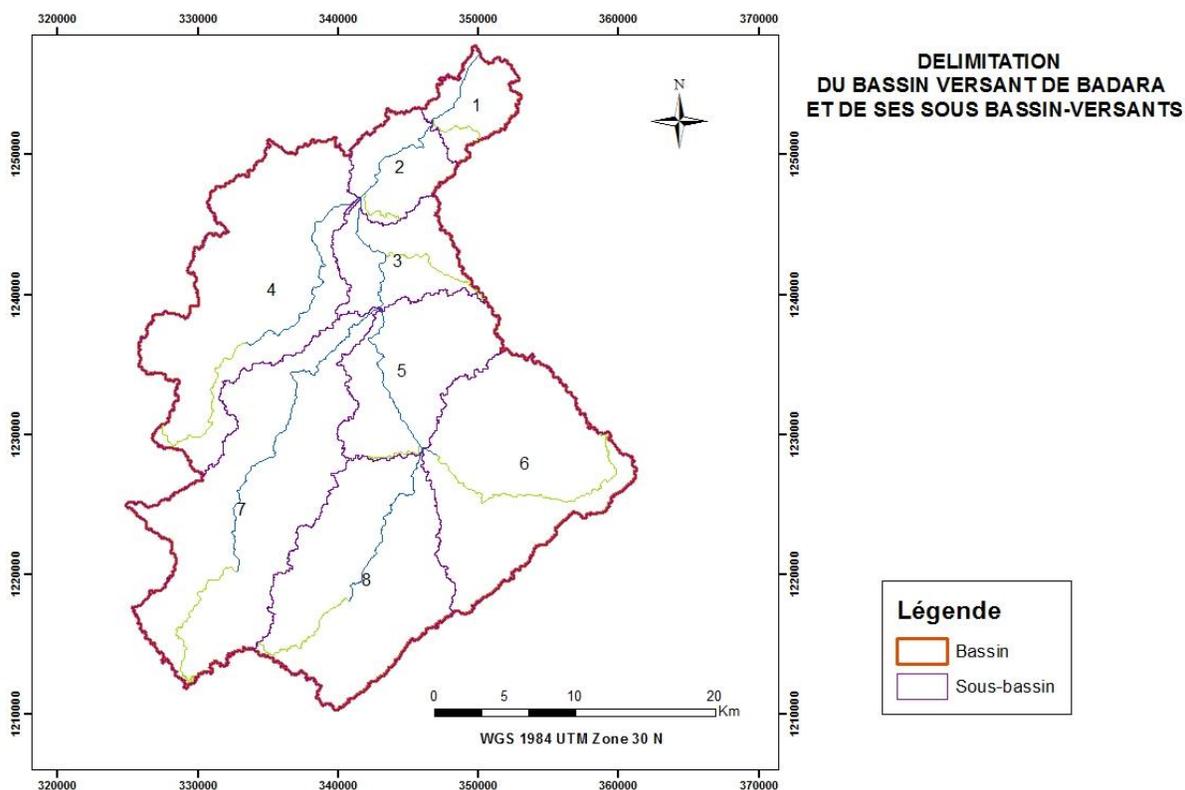
V. RÉSULTATS ET DISCUSSION

V-1 Définition de la réponse hydrologique (URH)

La détermination des unités de réponses hydrologiques se fait à partir du découpage du bassin versant en sous-bassin versant, du type d'occupation des terres, du type de sol et des classes de pente.

Le bassin versant a été découpé en 8 sous-bassins. Dans le souci de permettre aux différents sous bassins de drainer une portion significative du réseau, leurs exutoires ont été choisis sur la base des axes principaux d'écoulements.

Le découpage s'est comme sur la carte 8 :



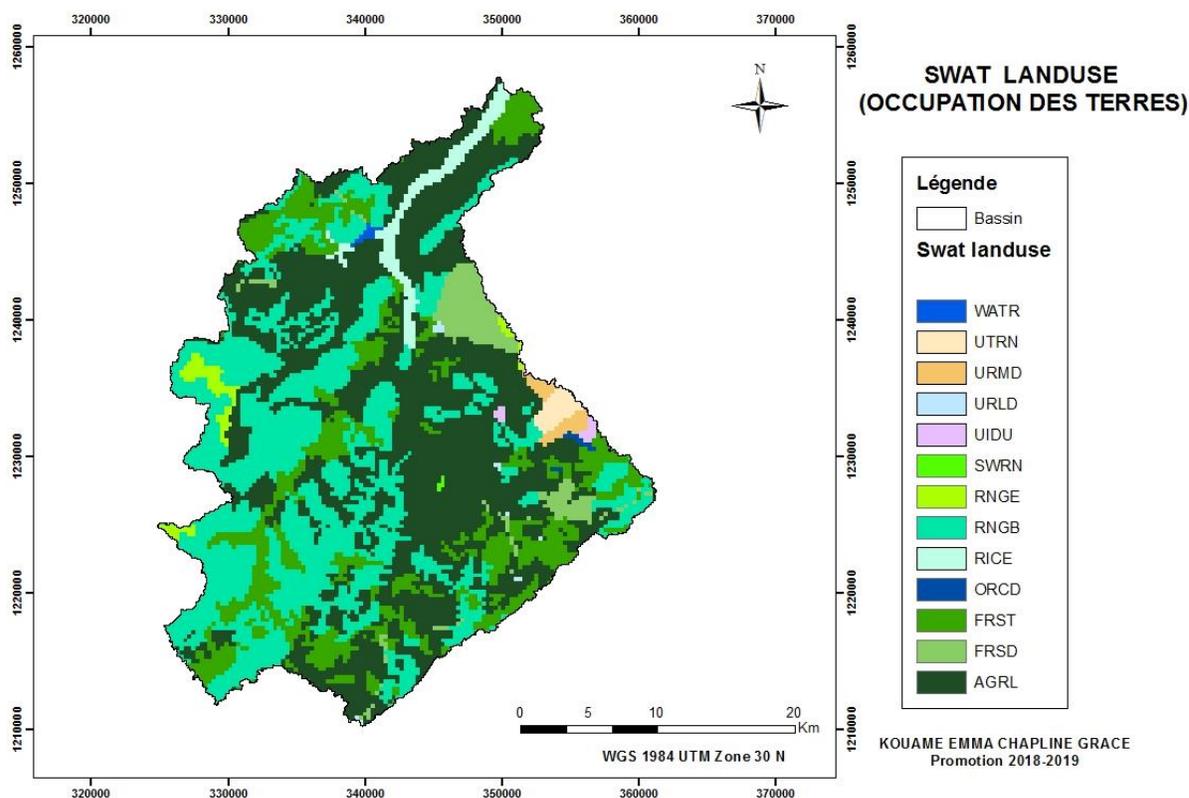
Carte 8: Sous- bassins versants de Badara

Dans le tableau 10 sont consignés les caractéristiques de formes des différents sous bassins

Tableau X : Caractéristiques des sous-bassins

N° du sous-bassin	Superficie (Km ²)	Pourcentage de la surface (%)
1	31.83	3.4
2	42.35	4.5
3	185.71	19.9
4	54.07	5.8
5	90.77	9.7
6	206.95	22.1
7	163.36	17.5
8	160.04	17.1
Total	935.08	100

La deuxième entité prise en compte est l'occupation des terres. La carte 9 nous présente la répartition des différentes classes d'occupation des terres dans le bassin versant :



Carte 9: Correspondance entre l'occupation des terres de l'IGB et de la classification SWAT

Pour ce faire, il nous a fallu faire une correspondance entre les types d'occupation des terres issues de notre base de données fournie par l'IGB et la classification SWAT des occupations des terres, comme consignée dans le tableau 10 :

Tableau XI : Correspondance entre les sols de l'IGB et la classification de SWAT

Classification de l'IGB	Correspondance pour SWAT
Cours et voies d'eau temporaires	WATR (water)
Réseaux routiers et ferroviaires ; aéroport	UTRN (Transportation)
Tissu urbain discontinu	URMD (Residential- Medium Density)
Habitat rural	URLD (Residential – Low Density)
Extraction de matériaux ou chantiers et espaces en construction	UIDU (Industrial)
Sols nus	SWRN (South Western Range + Bare rocks)

Savane herbeuse	RNGE (Range-Grasses)
Savane arbustive	RNGB (Range- Brush)
Rizière	RICE
Vergers	ORCD (Orchard)
Territoire agroforestier	FRST (Forest – Mixed)
Plantation forestière ou forêt-galerie	FRSD (Forest – Deciduous)
Zone agricole	AGRL (Agriculture Land- Generic)

Après la reclassification qui a pour but de négliger les types d'occupation des terres s'étendant sur une très petite superficie, les classes d'occupation des terres prises en compte pour la définition des URH sont :

AGRL qui occupe **49.50 %** de la surface totale du bassin versant ;

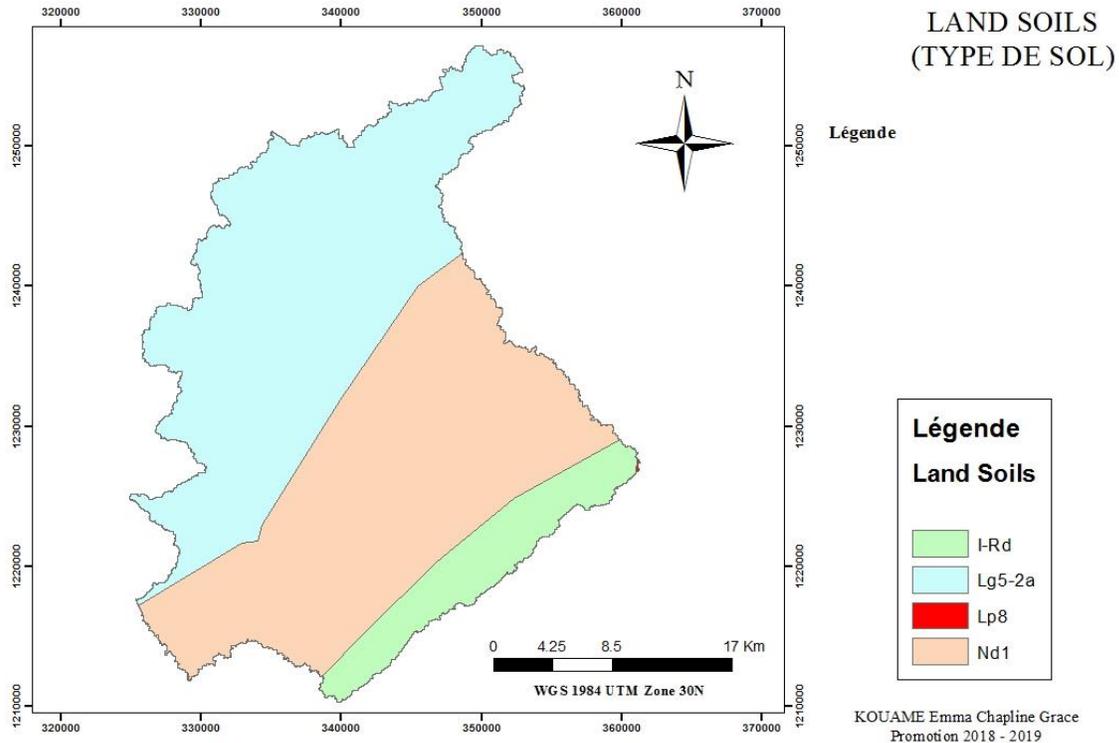
RNGB qui occupe **32.31 %** de la surface totale du bassin versant ;

FRST qui occupe **14.93 %** de la surface totale du bassin versant ;

FRSD qui occupe **1.74 %** de la surface totale du bassin versant ;

RICE qui occupe **1.52 %** de la surface totale du bassin versant.

La troisième entité prise en compte est le type de sol. La carte 10 nous présente la répartition des différents types de sols dans le bassin versant :



Carte 10: SWAT type de sol

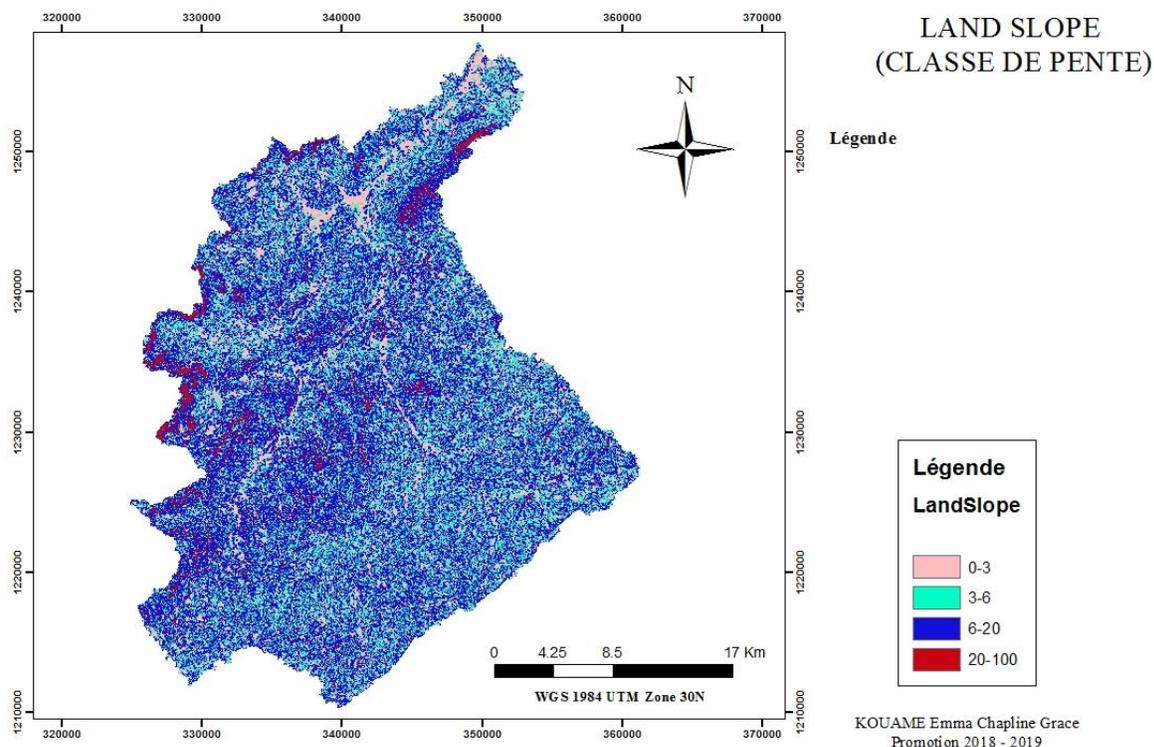
Après la reclassification qui a pour but de négliger les types de sols s'étendant sur une très petite superficie, les classes types de sol prises en compte pour la définition des URH sont :

Nd1 occupant **49.01 %** de la surface du bassin versant ;

Lg5-2a occupant **47.65 %** de la surface du bassin versant ;

I-Rd occupant **3.33 %** de la surface du bassin versant.

La dernière entité prise en compte est le relief représenté par les classes de pente. La carte 11 nous présente la répartition des différentes classes de pente du le bassin versant :



Carte 11: Classes de pente

Après la reclassification qui a pour but de négliger les classes de pente s'étendant sur une très petite superficie, les classes de pentes de sol prises en compte pour la définition des HRU sont :

Les pentes **comprises entre 6 et 20 %** occupent **58.90 %** de la surface du bassin versant ;

Les pentes **comprises entre 3 et 6 %** occupent **24.66 %** de la surface du bassin versant ;

Les pentes **comprises entre 0 et 3 %** occupent **16.44 %** de la surface du bassin versant.

En combinant ces trois entités, SWAT nous a permis d'avoir 61 HRU en utilisant la fonction qui permet d'assigner plusieurs HRU à un sous-bassin versant.

De ce qui précède, on peut donc conclure que nous sommes dans une zone plus ou moins plate de type plateau. C'est une zone prédominée par les zones agricoles et les savanes arbustives.

L'écoulement dans cette zone est de type érosif, car les pentes supérieures à 3 % représentent 83.56 % de la surface totale du bassin versant.

V-2 Calage et validation des résultats

L'outil Swat-cup nous a permis de faire le calage de notre modèle. L'étude de sensibilité nous a permis de sélectionner les paramètres suivants :

- ✓ En mode « relative » : CN2, OV_N, Sol_AWC, GW_Delay, SURLAG, HRU_SLP ;
- ✓ En mode « replace » : Sol_K, GWQMN, GW_Revap, RCHDP, CH_N2, CH_K2, ESCO, EPCO, Alpha_BF.

Nous avons effectué 10 itérations de 500 simulations. Ce nombre bien qu'élevé était indispensable pour avoir des valeurs optimales de paramètres, pour avoir de meilleures performances du modèle et pour constater que les variations des indices de performance étaient plus ou moins faibles.

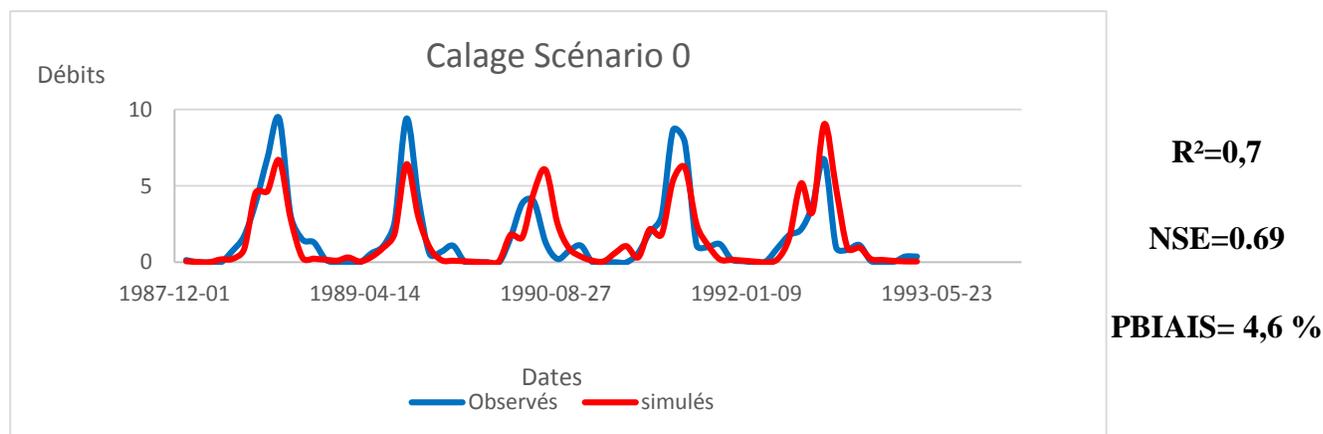
Le calage a été effectué sur la période de 1988 à 1993 qui est une période à tendance sèche et la validation sur la période de 1998 à 2000 qui est à tendance humide. Ces périodes choisies sont représentatives des caractéristiques climatiques exigées à savoir la présence d'années sèches, d'années humides et d'années moyennes dans la série de données utilisée. De plus, la courte longueur de la série des données pour la validation est due aux lacunes dans la série initiale. En effet, nous avons une lacune de 1993 à 1997.

Les années 1986 et 1987 ont été utilisées pour la mise en route du modèle (Warm up period).

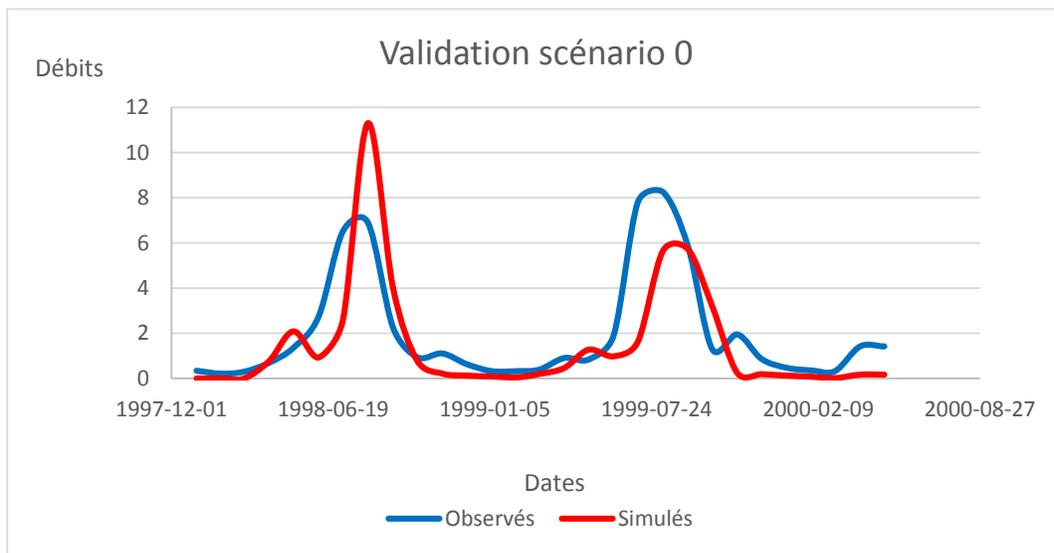
Le même nombre de simulations en prenant en compte les mêmes paramètres et les mêmes intervalles de départ ont été effectuées en vue de créer une base de comparaison.

Ainsi le calage dans le cas des 3 scénarii nous a permis d'obtenir les graphes 4 ,5, 6, 7, 8,et 9 :

- **Scénario S0 : Sans sources ni prélèvements**



Graphe 4: Calage pour le scénario 0



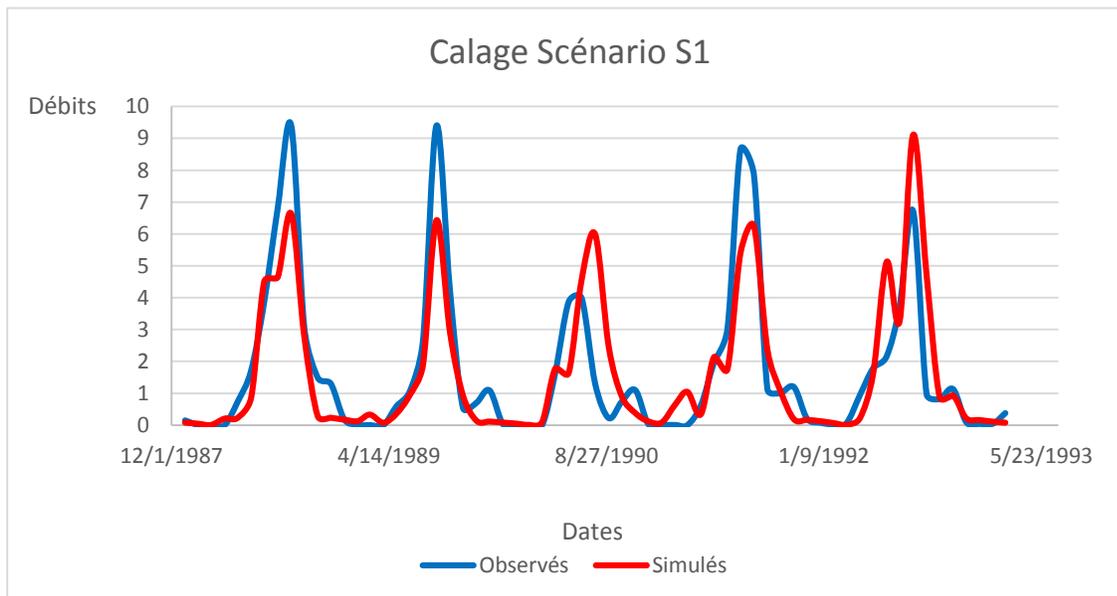
$R^2=0,54$

NSE=0.42

PBIAIS= 25 %

Graph 5 : Validation pour le scénario 0

- **Scénario S1 : Avec sources uniquement**

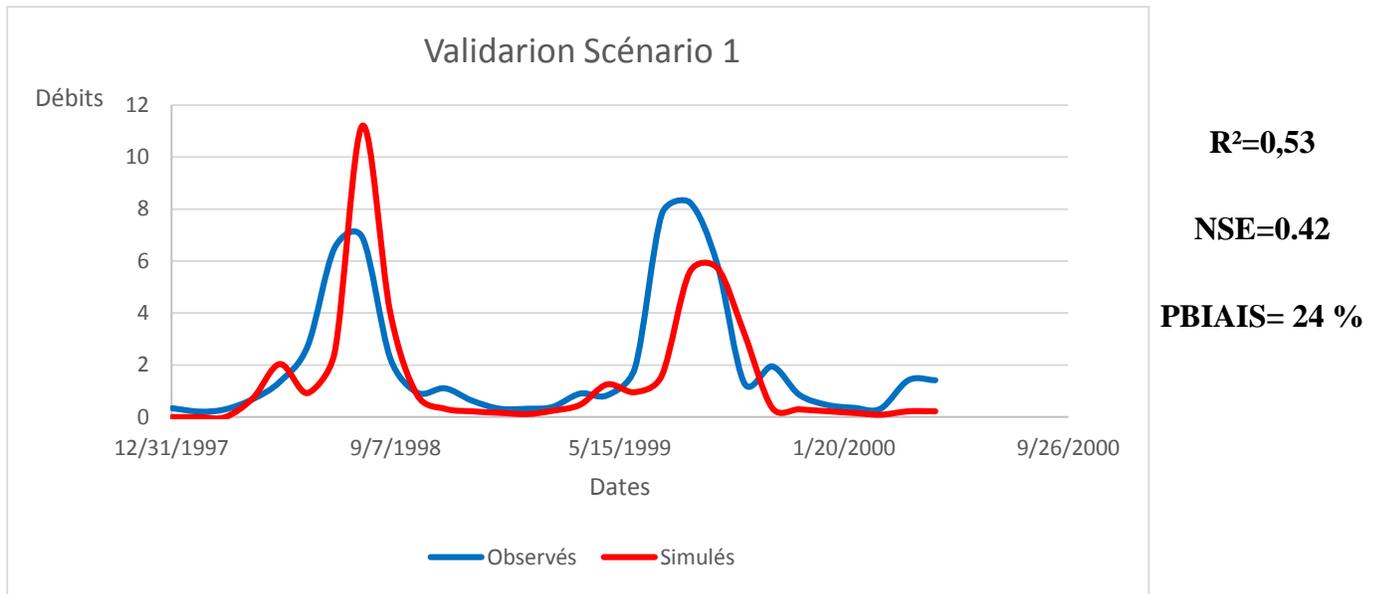


$R^2=0,7$

NSE=0.7

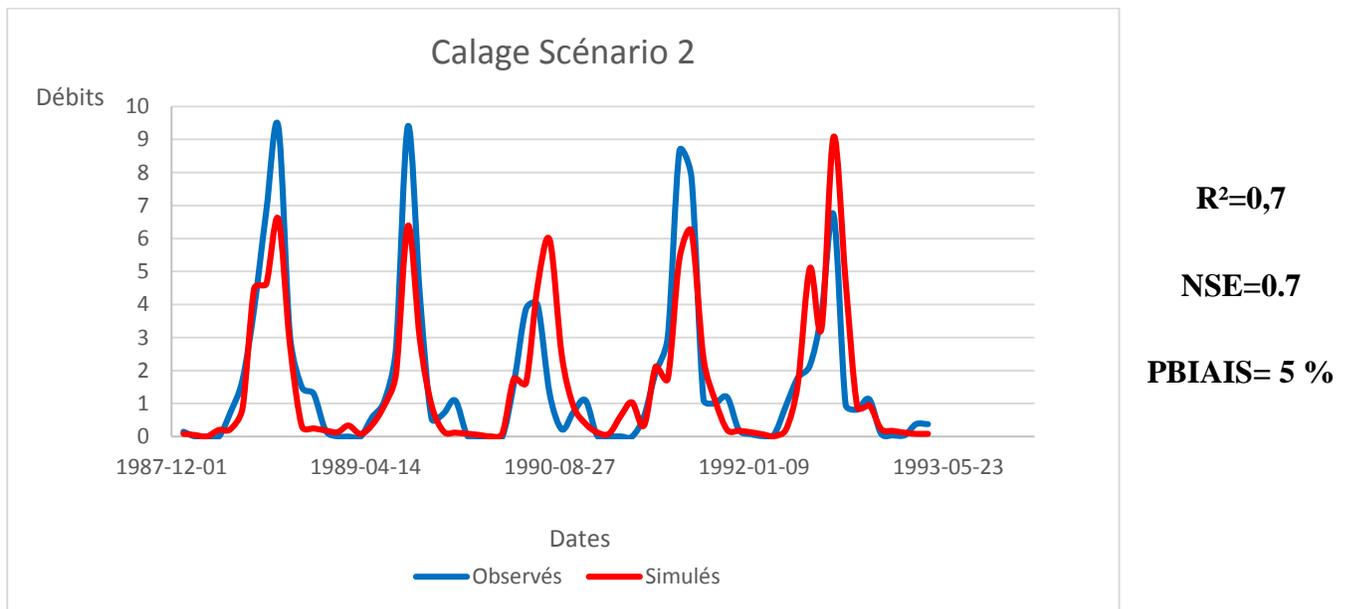
PBIAIS= 5,53 %

Graph 6: Calage pour le scénario 1

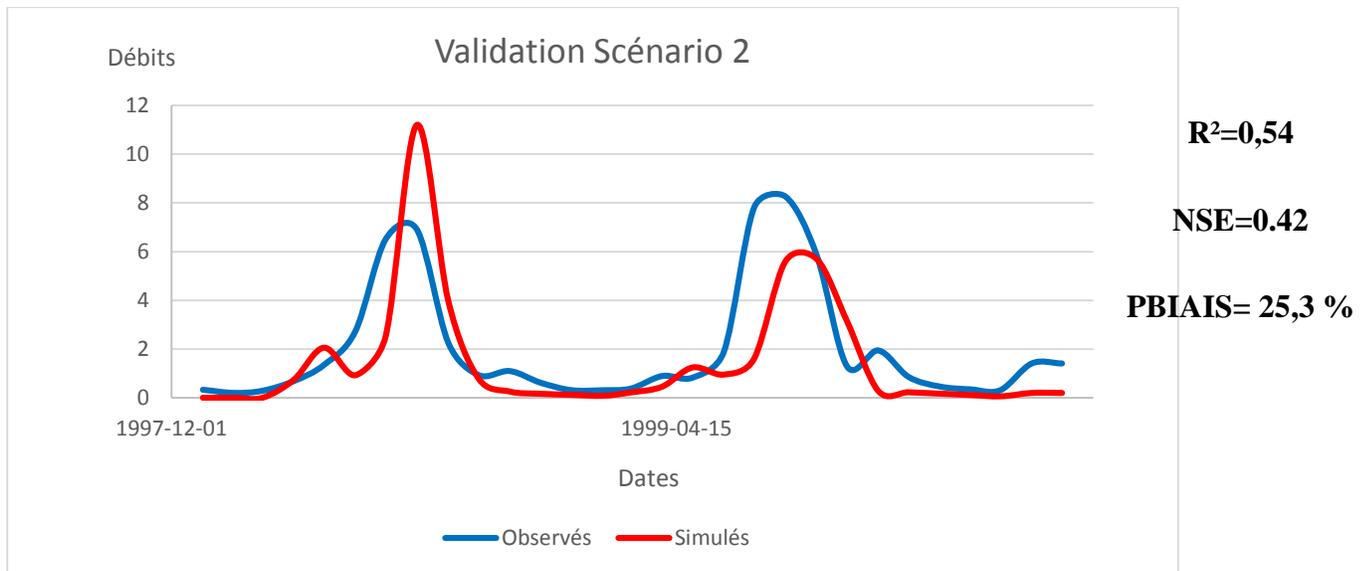


Graph 7 : Validation pour le scénario 1

- **Scénario 2 : Avec sources et prélèvements**



Graph 8 : Calage pour le scénario 2



Graphe 9: Validation pour le scénario 2

Les graphes nous montrent que, les débits de crue sont sous-estimés tandis que les débits d'étéage sont plus ou moins mieux représentés. Lors du calage, il y avait la possibilité d'améliorer la représentation des débits de crue en affinant les valeurs de certains paramètres tels que CN2, le HRU_SLP, le SOL_K et le AWC. L'augmentation des paramètres CN2 et AWC entraînent l'augmentation des débits de pointes. Tandis que c'est la diminution des paramètres SOL_K et HRU_SLP qui entraîne une augmentation des débits et réduit légèrement le déphasage horizontal. Il s'est avéré qu'essayer d'améliorer la représentation des débits de crue entraînait une dégradation des performances de calage et également une surestimation des débits des basses eaux. Malgré cette tendance à la sous-estimation relevée, les performances du modèle obtenues en calage respectent les conditions de Moriasi ($NS \geq 0.5$, $R^2 \geq 0,5$, PBIAIS compris entre $\pm 0,25$).

Cette sous-estimation des débits de crue montre une insuffisance du modèle à représenter correctement les débits de crue. Ce résultat est dû aux types de données d'entrée que nous avons utilisées pour la modélisation. En effet, plusieurs données interviennent dans l'estimation du débit. Ce sont, entre autres, les données d'occupation des terres, les données de sol, et certaines données climatiques. Dans notre étude, une partie des données climatiques a été estimée à partir de la base de données intégrée de SWAT. En plus, les données d'occupation des terres que nous avons utilisées sont statiques et datent de 2002 une période au-delà de notre période de calage. Ces données ne représentent donc pas exactement l'occupation des terres pendant la période d'étude.

Les données du sol quant à elles proviennent de la base de données régionale de la FAO, donc ne représentent pas fidèlement les caractéristiques des sols au niveau local. En somme, les insuffisances au niveau de ces données d'entrée sont à la base de cette mauvaise représentation. Par ailleurs, la taille de la série des données hydrométriques représente une contrainte supplémentaire. De ce fait, nous nous sommes contentés d'améliorer la simulation des débits d'étiage, en nous assurant que les hydrogrammes aient une bonne forme en ce qui concerne la phase de tarissement et les performances du modèle.

En ce qui concerne la validation, les performances du modèle ne respectent pas toutes les conditions de Moriasi, mais sont acceptables. Nous constatons que les débits de pointe ont une tendance à la surestimation à la première année et à la sous-estimation à partir la deuxième année. Cependant les débits des basses eaux sont mieux représentés. Les contraintes relevées au niveau de la phase de calage ont également eu des répercussions sur la phase de validation.

Que ce soit pour le calage ou pour la validation nous constatons qu'il existe des déphasages qui demeurent non corrigés causés par une mauvaise représentation des débits de crue. C'est une situation qui se produit souvent dans l'utilisation des modèles de transformation pluie/débit, car il leur est difficile de simuler exactement les valeurs extrêmes des événements pluvieux (Bachman 2015). En effet il a été démontré l'importance des caractéristiques du sol dans le processus de modélisation de l'écoulement par SWAT. Ainsi, l'absence des données de sol spécifiques à notre bassin versant, et le fait que nous ayons pris des données de la base de données de la FAO ; pourraient justifier ces déphasages.

Tableau XII : Récapitulatif des résultats de calage et de validation

Paramètres de calage	Intervalles initiaux	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
		Valeurs calibrées pour scénario 1	Valeurs calibrées pour scénario 2	Valeurs calibrées pour scénario 3
R_CN2	[-0,75 - 0,75]	-0.627	-0.693	-0.638
R_GW_DELAY	[-0,15 - 0,15]	-0.033	0.107	0.0793
R_OV_N	[-0.5 - 0.5]	-0.1161	-0,214	-0.1301
R_SURLAG	[-0.25 - 0.25]	0.1321	0.166	0.1959
R_SLSUBBSN	[-0.5 – 0.5]	-0.0063	0.101	0.1877
R_HRU_SLP	[-0.5 – 0.5]	-0.4858	-0.488	-0.4985
R_SOL_AWC	[-0.5 – 0.5]	-0.4830	-0.4750	-0.4830
v_SOL_K	0 - 500	250.3551	436.65	474.8782
v_CH_K2	20 - 200	200.359	202.932	20.027
v_GWQMN	0 - 5000	2 393.236	2845.12	26 820.161
v_GW_REVAP	0.02 - 0.2	0.1983	0.01451	0.13665
v_RCHRG_DP	0 - 1	0.0173	0.01546	0.01673
v_CH_N2	0.02 - 0.06	0.0585	0.4100	0.04539
v_ESCO	0 - 0.7	0.0019	0.02089	0.0744
v_EPCO	0 - 1	0.8511	0.6115	0.4353
v_ALPHA_BF	0.95 - 1	0.9742	0.9854	0.9676

Ces différents paramètres (tableau 12) peuvent être classés comme suit :

- Ceux qui traduisent le ruissellement et la réserve en eau du sol (CN_2, SOL_AWC, SOL_K, HRU_SLP, SURLAG, OV_N, CH_K2, SLSUBBSN) ;
- Ceux qui traduisent la dynamique de la nappe souterraine (GW_DELAY, RCHRG_DP, GW_REVAP, GWQMN, ALPHA_BF) ;
- Ceux qui traduisent comptent de l'évaporation à la fois des eaux de surface, des eaux souterraines et de l'intensité du couvert végétal (ESCO, EPCO).

L'étude de sensibilité (tableau 13) pour chaque scénario nous a permis de relever les paramètres les plus sensibles, c'est-à-dire les paramètres dont la p- value < 5 %

Tableau XIII : Récapitulatif de l'étude de sensibilité

Paramètres	Intervalle de calibration	Scénario S0	Scénario S1	Scénario S2
		p-valeur	p-valeur	p-valeur
R_CN2	±75 %	0.4919	0.4344	0.66807
R_GW_DELAY	±15 %	0.6534	0.7201	0.69747
R_OV_N	±50 %	0.9529	0.8851	0.820599
R_SURLAG	±25 %	0.3554	0.2866	0.09876
R_SLSUBBSN	±50 %	<0,0001	<0,0001	<0,005
R_HRU_SLP	±50 %	<0,005	<0,005	0.08124
R_SOL_AWC	±50 %	<0,0001	<0,0001	<0,0001
v_SOL_K	0-500	<0,0001	<0,0001	<0,005
v_CH_K2	20-200	<0,0001	0.0508	0.730409
v_GWQMN	0-5000	0.6740	0.2803	0.11648
v_GW_REVAP	0.02-0.2	0.04100	0.0279	<0,005
v_RCHRG_DP	0-1	0.1138	0.5313	<0,0001
v_CH_N2	0.02-0.06	0.1924	0.0485	0.01810
v_ESCO	0-0.7	0.9620	0.9733	0.90896
v_EPCO	0-1	0.1458	0.5725	0.87514
v_ALPHA_BF	0.95-1	0.2196	0.4462	0.23625

- Pour le scénario 0 (sans source ni prélèvement), nous remarquons que les paramètres les plus sensibles sont principalement ceux liés au ruissellement et à la réserve en eau du sol. Cela sous-entend que ce sont ces paramètres qui sont à l'origine de l'écoulement dans le cas où les sources et prélèvements ne sont pas pris en compte. Ainsi, en vue de mieux représenter le débit à l'exutoire, nous devons affiner les paramètres liés au sol à savoir les pentes du terrain, la conductivité hydraulique saturée et l'humidité dans le sol. En effet, lorsqu'on les fait tendre les paramètres tels que le SOL_AWC, le SLSUBBSN et le sol K vers des valeurs faibles on obtient une augmentation des débits. En plus de ces paramètres, l'ajustement la sensibilité du paramètre CH_K2 montre l'existence d'échanges entre la nappe phréatique et l'écoulement de surface sans que toutefois nous ayons intégré dans la modèle les données liées au souterrain. De ce fait pour le scénario suivant nous ajoutons les données en rapport avec les débits des sources.

- Pour le scénario 1 (avec source uniquement), nous remarquons que les paramètres les plus sensibles sont également ceux liés au ruissellement et à la réserve en eau du sol comme dans le scénario 1. Cependant, le paramètre hydraulique (CH_K2) sensible pour le scénario S0 n'est plus dans la marge de sensibilité à l'issue de la prise en compte des données des sources. Ce résultat confirme l'existence d'une forte interaction entre le souterrain et la surface et également le fait que le souterrain a une part dans l'écoulement de surface. Nous remarquons également que les « p-value » d'autres paramètres (SOL_AWC, le SLSUBBSN, HRU_SLP, SOL_K) ont légèrement augmentés prouvant la diminution de leur sensibilité. Tout cela s'explique par le fait que la prise en compte des sources permet de mieux de décrire l'interaction entre l'écoulement souterrain et l'écoulement de surface. Nous pouvons déduire que l'ajout des données de débit permettent de mettre en évidence certains phénomènes observés dans la zone sans que les paramètres sensibles ne diffèrent drastiquement de ceux du scénario précédent. Dans le scénario suivant, on ajoute aux données des sources les données des prélèvements au niveau des forages et directement aux sources.
- Pour le scénario 2 (avec sources et prélèvements), nous pouvons constater que les paramètres sensibles sont principalement ceux liés à l'écoulement souterrain et l'eau contenue dans le sol (GW_REVAP, RCHRG_DP, SOL_AWC, et SOL_K). Lorsqu'on ajoute aux débits de sources les prélèvements faits au niveau des sources et des forages le paramètre RCHRG_DP lié à la percolation profonde devient très sensible. Cela sous-entend que la prise en compte des prélèvements permet une meilleure reproduction des processus réels de la zone. Ce résultat vient confirmer le constat des études antérieures qui révèlent que la recharge de la nappe est accompagnée de décharge au travers de sources et également au travers des prélèvements directs au niveau des sources et des forages. Cela ressort également dans la valeur du paramètre ALPHA_BF qui est très élevé (proche de 1) traduit une forte vidange au niveau de la nappe profonde.
De plus le du paramètre GW_REVAP lié au coefficient d'évaporation à partir de la nappe souterraine devient sensible. Cela montre que dans le sol en place et les caractéristiques hydrogéologiques des aquifères en place permettent à l'eau qui peut passer de la nappe phréatique vers le sol pour compenser ce qui a été perdu par évapotranspiration. La sensibilité de ce paramètre vient corroborer ce qui est généralement observé in situ par rapport aux écoulements. En effet, dans la zone soudanienne dans laquelle est situé le bassin

versant de Badara, le processus dominant de ruissellement est le ruissellement par excès de saturation. C'est-à-dire que pendant la période hivernale, les premières pluies servent à saturer le sol, et une fois la capacité de rétention du sol à son maximum, l'on assiste à un ruissellement. Vers la fin de la période hivernale (à partir de Septembre), les pluies ne suffisent plus à satisfaire l'évaporation et le sol se vide très vite de sa réserve pour combler ce déficit (Tirogo, 2016).

L'étude de sensibilité et les valeurs des paramètres que nous avons trouvés viennent confirmer ce qui a été observé plutôt par rapport à l'influence des caractéristiques du sol sur le ruissellement. A la suite de cette étude de sensibilité, nous pouvons conclure que la prise en compte des données de prélèvements couplées aux données des débits des sources (le scénario S2) permet une meilleure représentation des processus observés sur le terrain.

V-3 Établissement des termes du bilan hydrologique

Le logiciel swat- output viewer a permis de faire ressortir les termes du bilan hydrologique. Une comparaison des termes du bilan hydrologique de chaque scénario permettra de faire ressortir l'influence des paramètres pris en compte par chaque scénario. Les termes du bilan hydrologiques sont présentés dans les tableaux 14,15 et 16 :

- Scénario S0

Tableau XIV: Bilan hydrologique annuel du bassin sur la période de calage pour le scénario S0

Année	Précipitation (mm)	ETR (mm)	Recharge (mm)	Ruissellement (mm)	Variation de stock (mm)
1988	1014,5	603,4	356,1	53,3	1,7
1989	810	574,5	200,1	36,3	-0,9
1990	994,7	698,7	249,3	46,6	0,07
1991	1200,6	850,6	257,1	55,1	37,8
1992	1240,7	788,1	385,6	67	0
moyenne interannuelle annuelle	1052,1	703,06	289,64	51,7	7,7
Proportion par rapport à la précipitation	100	66,8	27,5	4,9	0,7

Le bilan hydrologique interannuel obtenu à partir de la modélisation se résume de la façon suivante dans le cas du scénario 0 : $P (1052,1 \text{ mm}) = \text{Évapotranspiration réelle} (703,1 \text{ mm}) + \text{Recharge} (289,6 \text{ mm}) + \text{Ruissellement} (51,7 \text{ mm}) + \text{variation de stock} (7,7 \text{ mm})$.

Du point de vue des pourcentages nous avons eu : $P (100 \%) = \text{Évapotranspiration réelle} (66,8 \%) + \text{Recharge} (27,5 \%) + \text{Ruissellement} (4,9 \%) + \text{variation de stock} (0,7 \%)$.

- Scénario S1

Tableau XV: Bilan hydrologique annuel du bassin sur la période de calage pour le scénario S1

Année	Précipitation (mm)	ETR (mm)	Recharge (mm)	Ruissellement (mm)	Variation de stock (mm)
1988	1014,5	611	350,3	53,9	-0,7
1989	810	576,7	197,5	36,6	-0,8
1990	994,7	702,1	245,7	46,9	-0,03
1991	1200,6	855,4	289,8	55,5	-0,1
1992	1240,7	791,5	381	67,6	0,6
moyenne interannuelle annuelle	1052,1	707,3	292,9	52,1	-0,2
Proportion par rapport à la précipitation	100	67,8	27,8	5	0

Le bilan hydrologique interannuel obtenu à partir de la modélisation se résume de la façon suivante dans le cas du scénario 1 : $P (1052,1 \text{ mm}) = \text{Évapotranspiration réelle} (707,3 \text{ mm}) + \text{Recharge} (292,9 \text{ mm}) + \text{Ruissellement} (52,1 \text{ mm}) + \text{variation de stock} (-0,2 \text{ mm})$.

Du point de vue des pourcentages nous avons eu : $P (100 \%) = \text{Évapotranspiration réelle} (67,8 \%) + \text{Recharge} (27,8 \%) + \text{Ruissellement} (5 \%) + \text{variation de stock} (0 \%)$.

- Scénario S2

Tableau XVI : Bilan hydrologique annuel du bassin sur la période de calage pour le scénario S2

Année	Précipitation (mm)	ETR (mm)	Recharge (mm)	Ruissellement (mm)	Variation de stock (mm)
1988	1014,5	603,7	358,4	52,4	0,04
1989	810	571,8	202,8	36,2	-0,8
1990	994,7	695,1	254	46,5	0,07
1991	1200,6	845,7	300	55,1	-0,2
1992	1240,7	780	393,5	67,1	0,06
moyenne interannuelle annuelle	1052,1	699,1	301,7	51,5	-0,17
Proportion par rapport à la précipitation	100	66,4	28,7	4,9	0

Le bilan hydrologique interannuel obtenu à partir de la modélisation se résume de la façon suivante dans le cas du scénario 2 :

$P(1052.1\text{mm}) = \text{Evapotranspiration réelle } (699.4 \text{ mm}) + \text{Recharge } (301.7\text{mm}) + \text{Ruissellement } (51.5\text{mm}) + \text{variation de stock } (- 0.17\text{mm}).$

Du point de vue des pourcentages nous avons eu : $P (100 \%) = \text{Évapotranspiration réelle } (66,4 \%) + \text{Recharge } (28,7 \%) + \text{Ruissellement } (4,9 \%) + \text{variation de stock } (0 \%).$

Dans le scénario S0, la variation de stock est positive. Cela exprime un bilan excédentaire avec un déficit d'eau. Tandis que pour les scénarii S1 et S2 nous avons un bilan négatif exprimant un bilan déficitaire avec excès d'eau. Les résultats de ces scénarii viennent confirmer que ce sont effectivement les sources qui comblent le déficit en eau enregistré au niveau du scénario 0. Il ressort de ce fait une concordance avec les résultats des anciennes études menées dans la zone qui ont permis de savoir qu'il existerait une forte interaction entre le souterrain et la surface.

Les bilans hydrologiques globaux nous montrent que dans les 3 scénarii, l'évapotranspiration est le terme le plus grand. La prédominance de ce terme s'explique par le fait que la zone soit fortement couverte par les forêts, et les grandes exploitations agricoles. L'eau de surface est en grande quantité stockée pour les besoins d'irrigation, ce qui augmente considérablement l'évaporation (Wellens et al. 2008). Cette valeur varie entre 699.mm et 707mm. Ces valeurs concordent avec la

tendance des valeurs des études antérieures menées dans la zone telle que celle de (Tirogo 2016) qui trouve une ETR = 812 mm pour une pluie de 1010 mm dans la vallée du Kou et de Kouanda (2019) trouve une ETR = 735 mm pour une pluie de 813 mm à Samendéni.

Quant à la recharge globale, dans tous les scénarii, elle représente le deuxième terme le plus important des bilans. Nous remarquons en premier lieu que dans les valeurs de la recharge dans les scénarii S0 et S1 sont approximativement égaux avec une variation de 0.3% d'un scénario à l'autre. Tandis que la valeur de la recharge dans le scénario S2 nous avons une valeur beaucoup plus élevée. Cela vient confirmer la remarque faite lors de l'étude de sensibilité qui nous a permis de faire ressortir le fait que le paramètre influençant la percolation profonde devient très sensible seulement dans ce scénario alors qu'elle ne l'est pas dans les scénarii S0 et S1.

Nous remarquons également que la recharge est élevée par rapport aux intervalles de valeurs déterminées par les autres études. Pour le scénario 2 qui est le plus pertinents, on a une valeur de recharge de 301 mm soit 28.7 %. Dans sa thèse, Kouanda (2019) fait une synthèse de ces études :

- (Tirogo, 2016) pour le bassin du Kou, la valeur d'infiltration profonde est estimée entre 70mm (décennie 2001-2010) et 245 mm (décennie 1961-1970) sur la base d'une RFU variant entre 100 mm et 200 mm.
- (Derouane, 2008) estime la recharge entre 20 et 160mm (valeur décroissant du Sud vers le Nord) pour une RFU de 170 mm
- (Dakoure, 2003) pour la zone de Bobo-Dioulasso, une valeur moyenne d'infiltration sur la période 1981-1990 comprise entre 74 mm (pour une RFU de 200 mm) et 120 mm (pour une RFU de 140 mm).
- (IWACO, 1989, cité par (Derouane, 2008)) sur la zone de Bobo-Dioulasso,
- (CIEH 1987, cité par (Dakoure, 2003) sur la plaine du Gondo, une valeur de recharge de 20 à 38 mm (étude régionale)

Ces études antérieures utilisaient généralement la méthode de Thornthwaite, principalement pour la détermination de la recharge. Cette méthode présente des limites. Elle considère essentiellement comme donnée de base la réserve utile qui pour notre zone n'est pas bien maîtrisée et est souvent estimée. Ces études font ressortir le fait que la variation de cette réserve entraîne une variation de la recharge. La valeur de la recharge trouvée a donc été peu précise. (Tirogo, 2016) affirme dans sa thèse qu'une erreur sur la RFU peut entraîner une estimation erronée de la recharge en montrant que la valeur de cette recharge double quand on passe d'une RFU de 100mm à une RFU de 200mm. Par contre dans le cas de SWAT, l'estimation des termes du bilan est plus affinée, car elle prend en

compte toutes les variations spatiales hydrologiques et hydrogéologiques à l'échelle du bassin versant grâce à la discrétisation en unité de réponse hydrologique.

V-4 Comblement des lacunes par le modèle SWAT.

Dans notre bassin versant, bien que les indices de performance démontrent une bonne performance du point de vue annuel global, le modèle a eu du mal à représenter correctement la courbe des simulés par rapport à la courbe des observés pendant la période pluvieuse. Les performances du modèle pendant les périodes pluvieuses sont assez faibles. Par exemple pour l'année 1991 et 1992 où les performances sont les moins bonnes pour le scénario S2, nous avons :

- Pour la période pluvieuse de l'année 1991 nous avons eu comme indices de performance :
NSE= -0,29 et $R^2 = 0,34$

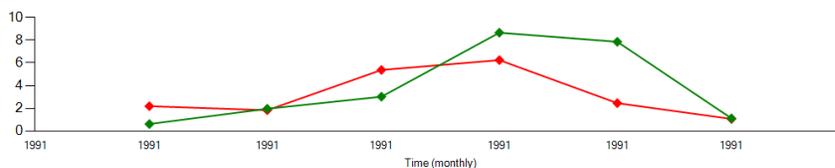


Figure 7: Hydrogramme de l'année 1991 pour le scénario S0

- Pour la période pluvieuse de l'année 1992 nous avons eu comme indices de performance :
NSE= -0,88 et $R^2 = 0,28$

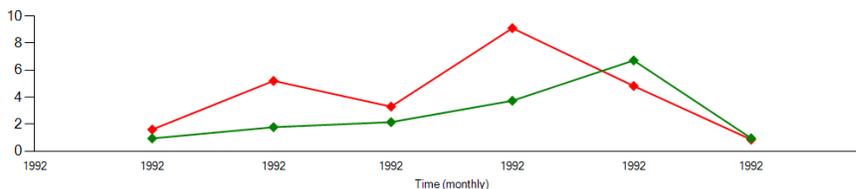


Figure 8: Hydrogramme de l'année 1991 pour le scénario S0

Bien que cela ne fit pas partie de nos objectifs spécifiques de départ, nous avons jugé quand même pertinent de vérifier la robustesse de notre modèle quant au comblement des données. En effet au sortir de la simulation nous avons obtenu un comblement des années où nous n'avons pas de données tel que présenté par la figure 9. Pour ce faire nous avons effectué les tests statiques de Kruskal –Wallis appliqué aux données d'observations et aux débits simulés dont les résultats sont décrits par la figure 10

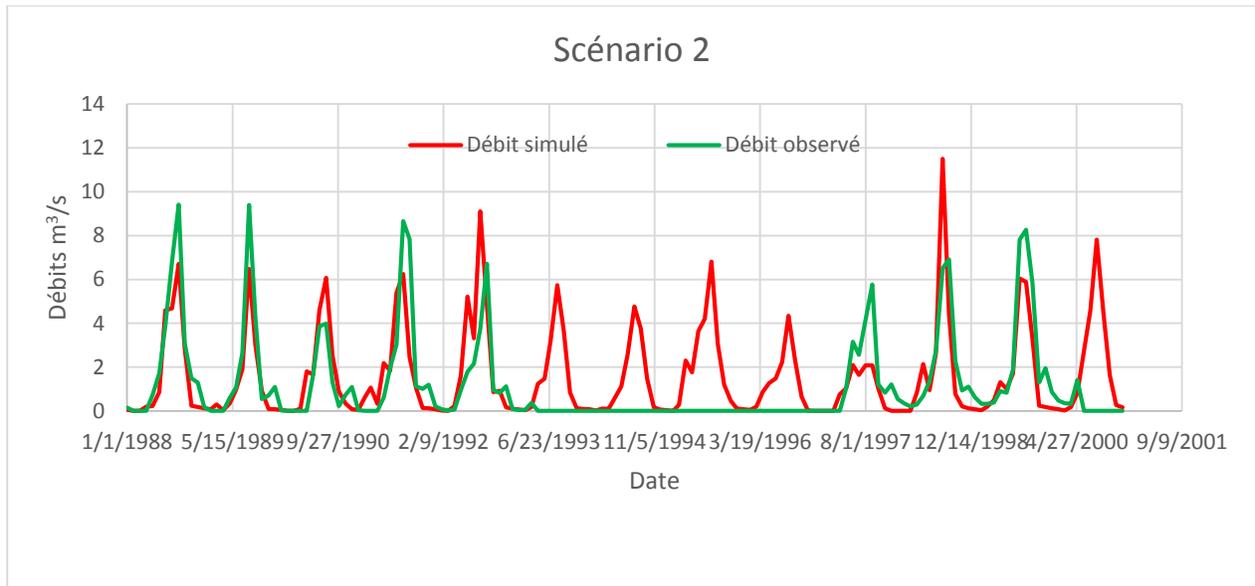


Figure 9: Hydrogramme de débits observés et des débits simulés

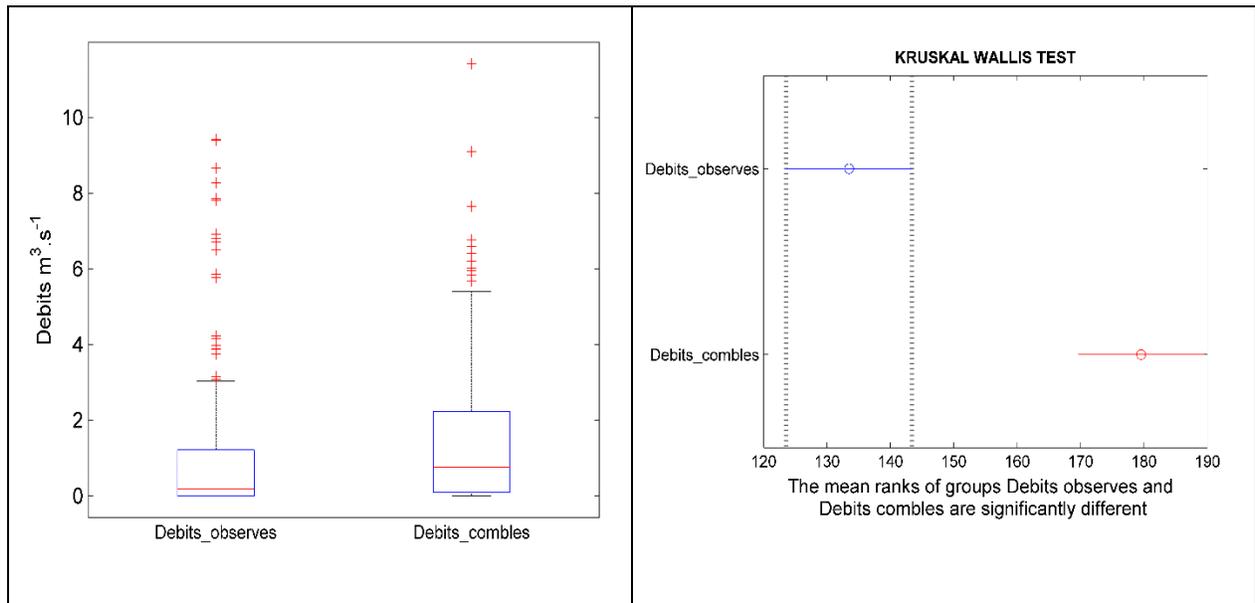


Figure 10: Résultats graphiques des statistiques sur les débits observés et simulés pour le scénario 2 : (a) Box plot , (b) test de Kruskal Wallis

Ce test nous montre qu'il y a une différence significative entre les données observées et les données simulées ($p\text{-value}=5.84.10^{-6}$). En d'autres termes, les deux séries de données n'appartiennent pas à la même famille de distribution. Le rang de la moyenne pour les données observées est de 135 et celui des données simulées est de 180 soit une différence de rang de 45. De ce test il ressort

également, à partir des résultats présentés sur le box plot que plus la valeur du débit augmente plus le modèle a du mal à correctement les représenter. Ainsi, nous pouvons dire que le modèle ne permet pas de combler les lacunes en simulant les écoulements en dehors de la période de validation et de la période de calage. La faible robustesse du modèle quant au comblement des données peut s'expliquer en premier lieu par la taille de la série des données hydrométriques et en second lieu par les erreurs potentielles issues des insuffisances susmentionnées sur les données d'entrée du modèle.

VI. CONCLUSION

Cette étude que nous avons menée se situe dans le cadre de la caractérisation du complexe Mouhoun Supérieur- Sourou. Il s'agit de faire ressortir les termes du bilan hydrologique du bassin versant rattaché à la station hydrométrique de Badara. Pour y arriver nous avons opté pour une modélisation pluie -débit. En vue de mieux cerner les interactions dans le bassin versant, nous avons mené notre étude suivant 3 scénarii :

- Le scénario S0 qui ne tenait compte d'aucune variable liée au souterrain
- Le scénario S1 qui prenait en compte les données des sources
- Le scénario S2 qui en plus des données des sources prenait en compte les données des prélèvements aux sources et au niveau des forages

Cette étude a la particularité d'être faite dans un contexte d'absence de certaines de données d'entrée et de lacunes dans les séries de données hydrométriques. Ces lacunes ont représenté une contrainte majeure pour nous, nous obligeant à prendre une série de données courte allant de 1986 à 2000 avec 4 années hydrologiques manquantes.

Lors du calage et de la validation, nous avons remarqué que le modèle représente bien les périodes d'étiage et sous-estime les crues. Cependant, les performances du modèle SWAT restent satisfaisantes dans l'ensemble. Le scénario 0 nous a donné les performances suivantes : $NS = 0,0.69$; $R^2 = 0,7$; $PBIAS = 4.6 \%$ et en validation : $NS = 0,42$; $R^2 = 0,54$; $PBIAS = -25 \%$. : Pour le scénario 1 la modélisation nous a donné les performances suivantes : $NS = 0,7$; $R^2 = 0,7$; $PBIAS = 45.5 \%$ et en validation : $NS = 0,42$; $R^2 = 0,53$; $PBIAS = 25 \%$. : Pour le scénario 2 nous avons eu les performances suivantes : $NS = 0,7$; $R^2 = 0,7$; $PBIAS = 5 \%$ et en validation : $NS = 0,42$; $R^2 = 0,54$; $PBIAS = 25,3 \%$. Au vu des résultats obtenus, nous pouvons conclure que ce modèle représente assez bien le comportement hydrologique dans le bassin versant de Badara. La modélisation nous a permis de comprendre que le ruissellement est lié principalement aux paramètres de sol et du souterrain. Cette observation vient confirmer les résultats des anciennes études effectuées dans la zone, mettant ainsi en exergue la forte interaction entre l'hydraulique souterraine et l'hydraulique de surface.

Nous pouvons donc terminer en disant que le modèle SWAT est adapté pour l'étude de la réponse hydrologique dans un bassin versant sur lequel on possède peu de données d'observation fiables. Ceci est possible grâce à sa base de données intégrée qui rend possible le comblement des données

manquantes. De plus, ce modèle est capable de reproduire assez bien la réponse hydrologique dans un bassin versant ayant un hydrodynamisme assez complexe dû à l'interaction entre le souterrain et la surface et de faire ressortir les termes du bilan hydrologique. Il a donc répondu aux objectifs que nous nous étions imposés.

VII. PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

Cette étude nous a permis de faire ressortir l'impact du souterrain sur l'écoulement de surface. Ceci en prenant en compte les données de prélèvement au niveau des sources et forages et aussi les débits des sources. Nous avons certes trouvé des résultats globaux assez intéressants. Mais cela est quand même insuffisant, car bien que le modèle SWAT nous permette de prendre en compte des paramètres liés au souterrain cela reste limité vu la complexité des interactions existantes dans notre zone d'étude.

Nous avons remarqué une sous-estimation globale et une détérioration des performances à mesure qu'on avançait dans le temps. Ayant trouvé que les paramètres liés aux caractéristiques hydrauliques du sol et aux caractéristiques liées à la nappe avaient une grande influence sur la réponse hydrologique, une amélioration des données en rapport avec ces paramètres permettrait d'améliorer les performances du modèle et avoir une meilleure réponse hydrologique. Ainsi, pour davantage affiner les résultats obtenus, il serait envisageable de reprendre cet exercice de modélisation en :

- Prenant en compte la dynamique de la variabilité de l'occupation des sols ;
- Créant une base de données sur les sols propres à la zone en faisant des essais in situ, ainsi les caractéristiques réelles du sol seront prises en compte ;
- Utilisant les données climatiques d'une station synoptique plus proche de la zone au lieu de celles proposées par SWAT
- Intégrant les valeurs existantes des prélèvements de surface pour l'irrigation

Nous recommandons qu'une étude effectuée in situ soit menée en vue de mieux connaître les caractéristiques réelles du sol de la zone pour l'amélioration des résultats pour d'autres éventuelles études. Aussi, nous pensons être plus qu'utiles, pour mieux comprendre l'hydrodynamisme du bassin versant, de faire une modélisation couplant un modèle hydrologique et un modèle hydrogéologique en vue de mieux prendre en compte le contexte souterrain qui n'est pas négligeable, comme nous avons pu le montrer dans cette étude.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Arnold, J.G., Srinivasan, R., King, K.W., Williams, J.R., Griggs, R.J., King, K.W., et al. 1998. « Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. » *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 34: 73-89.

Awotwi, Alfred, Francis Yeboah, et Michael Kumi. 2014. « Assessing the impact of land cover changes on water balance components of White Volta Basin in West Africa ». *Water and Environment Journal*, Promoting sustainable solutions, . <https://doi.org/10.1111/wej.12100>.

Bachman, Jérémy. 2015. « Analyse de la sensibilité du modèle SWAT à la précision des données pédologiques sur deux bassins de Bourgogne (France) : modélisation à partir de la base Donesol. » Mémoire de fin d'études, UMR 5561 Biogéosciences: Université de Bourgogne.

Begou, Jamilatou Chaibou, Seifeddine Jomaa, Sihem Benabdallah, Pibgnina Bazie, Abel Afouda, et Michael Rode. 2016. « Multi-Site Validation of the SWAT Model on the Bani Catchment: Model Performance and Predictive Uncertainty ». *Water* 178 (8): 1-23. <https://doi.org/10.3390/w8050178>.

BODIAN, Ansoumana. 2011. « Approche par modélisation pluie-débit de la connaissance régionale de la ressource en eau: Application au haut bassin du fleuve Sénégal ». THESE DE DOCTORAT EN HYDROLOGIE CONTINENTALE, Ecole Doctorale « Eau, Qualités et Usages de l'Eau »: UNIVERSITÉ CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR.

Bossa, A.Y., B. Diekkrüger, A.M. Igué, et T. Gaiser. 2012. « Analyzing the effects of different soil databases on modeling of hydrological processes and sediment yield in Benin (West Africa) ». *Geoderma* 173-174 (février): 61-74. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.01.012>.

Dakoure, Denis. 2003. « ETUDE HYDROGEOLOGIQUE ET GEOCHIMIQUE DE LA BORDURE SUD-EST DU BASSIN SEDIMENTAIRE DE TAOUDENI (BURKINA FASO - MALI) - ESSAI DE MODELISATION ». THESE DE DOCTORAT, Université Paris VI: Université Paris VI - Pierre et Marie Curie.

Derouane, Johan. 2008. « Étude hydrogéologique et modélisation mathématique du système aquifère du bassin sédimentaire de Taoudenni au Burkina Faso ». Programme de Valorisation des Ressources en Eau de l'Ouest (VREO).

Félicité, CHABI-GONNI Baké Gnaman. 2003. « Synthèse hydrologique sur la vallée du Kou. Mise en palce d'un système de suivi et d'évaluation de la ressource. »

Gassman, Philip, Sadeghi M. Ali, et Srinivasan Raghavan. s. d. « Applications of the SWAT Model Special Section: Overview and Insights ». *Journal of Environmental Quality* 42: 1-8. <https://doi.org/10.2134/jeq2013.11.0466>.

Gombert, P. 1998. « Synthèse sur la géologie et l'hydrogéologie de la série sédimentaire du sud-ouest du Burkina Faso (Rapport technique) ». 76. Bobo Dioulasso, Burkina Faso: Programme RESO: WACO-BURGEAP.

Institut National de la Statistique et de la Démographie Burkina Faso. 2011. « La région des Hauts-Bassins en chiffres ». Résultats de statistique Edition 2011. Direction régionale de l'INSD des Hauts-Bassins Bobo-Dioulasso: Institut national de la statistique et de la démographie Service de la Coordination de l'Action Régionale.

J.G ARNOLD, J.R KINIRY, R. SRINIVASAN, E.B. HANEY, et S.L. NEITSCH. 2012. « Soil and Water Assessment Tool: Input / Output documentation version 2012 ». Texas Water Resources Institute.

Kouanda, Bouraïma. 2019. « Modélisation Intégrée du Complexe Mouhoun supérieur-Sourou dans le contexte des changements climatiques ». Docteur en science et technologie de l'eau, de l'énergie et de L'environnement, Laboratoire Eaux Hydro-systèmes et Agriculture (LEHSA): Institut International d'Igénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE).

Lang, M., Wellens J., et Tychon B. 2011. « ARCSSWAT manuel d'utilisateur : cas du bassin versant du Kou (Burkina Faso) ». 2011.

Niamian, Marie-Jeanne. 2008. « ANALYSE CRITIQUE DES PRINCIPAUX COMPOSANTS DU BILAN D'EAU DU BASSIN VERSANT DU KOU ». INSTITUT INTERNATIONAL DE L'INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT DE OUAGADOUGOU (2ie).

Ouédraogo, C. 2006. « Synthèse géologique de la région ouest du Burkina Faso (Rapport technique) ». 46. SOFRECOSAWES.: Bobo Dioulasso, Burkina Faso: Programme VREO.

PAGIRE phase 1 (2003-2008). 2003. « Plan d'Action pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau du Burkina Faso (PAGIRE) ». MINISTERE DE L'AGRICULTURE , DE L'HYDRAULIQUE ET DES RESSOURCES HALIEUTIQUES DU BURKINA FASO.

PAGIRE phase 2 (2010-2015). 2009. « Plan d'Action pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (PAGIRE) Deuxième phase (2010-2015) - AOUT 2009 ». MINISTERE DE L'AGRICULTURE, DE L'HYDRAULIQUE ET DES RESSOURCES HALIEUTIQUES DU BURKINA FASO.

Poméon, Thomas, Bernd Diekkrüger, Anne Springer, Jürgen Kusche, et Annette Eicker. 2018. « Multi-Objective Validation of SWAT for Sparsely-Gauged West African River Basins—A Remote Sensing Approach ». *Water* 451 (10): 1-22. <https://doi.org/10.3390/w10040451>.

Sauret, Elie. 2008. « Contribution à la compréhension du fonctionnement hydrogéologique du système aquifère dans le bassin du Kou (Burkina Faso) ».

———. 2013. « Etude des potentialités hydrogéologiques d'une plaine alluviale en relation avec les eaux souterraines et de surface dans un contexte d'agriculture irriguée (Burkina Faso) ». Doctorat en Sciences de l'Ingénieur, Faculté des Sciences Appliquées - Département ArGEnCo Architecture, Géologie, Environnement et constructions Secteur GEO³ Géotechnologies, Hydrogéologie, Prospection Géophysique: Université de Liège (ULG).

Schuol, Jurgen, Karim C. Abbaspour, Raghavan Srinivasan, et Hong Yang. 2007. « Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model ». *Journal of Hydrology* 352 (décembre): 30-49. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.12.025>.

SOGREAH. 1994. « Etude des ressources en eaux souterraines de la zone sédimentaire de la région de Bobo-Dioulasso. Ministère de l'Agriculture de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques ». Direction des Etudes et de la Planification - Direction Régionale de l'Eau des Hauts-Bassins: Bobo-Dioulasso, Burkina Faso.

« Soil ans Water Assesment Tool: User's manuel version 2000 ». 2002. Texas Water Resources Institute, College Station,.

Tirogo, Justine YOFE -. 2016. « Etude du fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère sédimentaire du bassin du Kou au sud-ouest du Burkina Faso ». THESE EN COTUTELLE, Laboratoire Hydrologie et Ressources en Eau (LEAH, 2iE) / Laboratoire Milieux environnementaux, Transferts et Interactions dans les Hydrosystèmes et les Sols (METIS, UPMC): INSTITUT INTERNATIONAL D'INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT (2iE) / UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE (UPMC). Réf : 2iE/2016-08.

Traoré, Farid. 2012. « Optimisation de l'utilisation des ressources en eau du bassin du Kou pour des usages agricoles ». Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur en Sciences, Université de Liège Faculté des Sciences.

Wellens, TRAORE Farid, KARAMBIRI Harouna, DIALLO M., NIAMIAN Marie Jeanne, COMPAORE N.F., DAKOURE D., DEROUANE J., et TYCHON B. 2008. « Elaboration du bilan d'eau du bassin versant du Kou et analyse critique des principaux composants. », 9. J. Wellens@apefe.org; +226-20.97.09.53 (bur.).

Wellens, Johan, et Nitcheu. 2009. « Le périmètre irrigué de la Vallée du Kou: Diagnostic des efficiences hydro-agricole et élaboration des calendriers à l'aide de SIMIS. GEeau: Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. » GEeau: Bobo-Dioulasso, Burkina Faso.

ANNEXES

Annexe I: Données d'entrée	iii
Annexe II: Paramètres calés	vi
Annexe III: Hydrogramme pour le scénario 2	ix
Annexe IV: Rapport de la foramation des URH	i

Annexe I: Données d'entrée

Nom	X	Y	Année de mise en service
Source ONEA 1	342,706	1,237,546	1946
Source ONEA 2	342,782	1,237,502	1990
F1	343,392	1,237,446	1998
F2	343,152	1,237,144	1998
F3	343,394	1,237,976	2012
F4	343,430	1,238,429	2012

Tableau annexe 1: Données des sites de prélèvements

Tableau annexe 2:Débits d'observation

Dates	Qobs	1989-08-01	9.3998	1993-04-01	0.0376
1986-01-01	0.5226	1989-09-01	4.2797	1997-05-01	1.0406
1986-02-01	2.0151	1989-10-01	0.5391	1997-06-01	3.3310
1986-03-01	4.3903	1989-11-01	0.7039	1997-07-01	2.5676
1986-04-01	6.3488	1989-12-01	1.0900	1997-08-01	4.1557
1986-05-01	9.5191	1990-01-01	0.0265	1997-09-01	5.774
1986-06-01	2.2716	1990-02-01	0.0046	1997-10-01	1.2099
1986-07-01	0.3544	1990-03-01	9.6774	1997-11-01	0.826
1986-08-01	2.5426	1990-04-01	0	1997-12-01	1.2124
1986-09-01	0.1170	1990-05-01	0.8365	1998-01-01	0.5385
1986-10-01	0.01	1990-06-01	1.6315	1998-02-01	0.3371
1986-11-01	0.0097	1990-07-01	3.8681	1998-03-01	0.2076
1986-12-01	0.0093	1990-08-01	3.9807	1998-04-01	0.2957
1987-01-01	0.0502	1990-09-01	1.3107	1998-05-01	0.7683
1987-02-01	0.01	1990-10-01	0.2204	1998-06-01	1.3582
1987-03-01	0.0097	1990-11-01	0.7352	1998-07-01	2.7360
1987-04-01	0.0093	1990-12-01	1.0993	1998-08-01	6.5093
1987-05-01	0.4986	1991-01-01	0.0334	1998-09-01	6.909
1987-06-01	2.4338	1991-02-01	0.008	1998-10-01	2.2675
1987-07-01	1.5449	1991-03-01	0.0049	1998-11-01	0.9392
1987-08-01	5.7482	1991-04-01	0	1998-12-01	1.104
1987-09-01	3.3945	1991-05-01	0.7154	1999-01-01	0.6329
1987-10-01	0.6214	1991-06-01	2.0439	1999-02-01	0.32
1987-11-01	1.0281	1991-07-01	3.0255	1999-03-01	0.3187
1987-12-01	1.1449	1991-08-01	8.6509	1999-04-01	0.3994
1988-01-01	0.1481	1991-09-01	7.8487	1999-05-01	0.9015
1988-02-01	0	1991-10-01	1.1166	1999-06-01	0.8336
1988-03-01	0	1991-11-01	1.0091	1999-07-01	1.8918
1988-04-01	0	1991-12-01	1.1920	1999-08-01	7.8111
1988-05-01	0.7376	1992-01-01	0.2047	1999-09-01	8.2645
1988-06-01	1.7213	1992-02-01	0.0753	1999-10-01	5.8557
1988-07-01	3.8772	1992-03-01	0.0154	1999-11-01	1.2981
1988-08-01	6.8091	1992-04-01	0.0652	1999-12-01	1.9498
1988-09-01	9.4076	1992-05-01	0.953	2000-01-01	0.8631
1988-10-01	3.0801	1992-06-01	1.7845	2000-02-01	0.4683

1988-11-01	1.5518	1992-07-01	2.156	2000-03-01	0.3513
1988-12-01	1.3028	1992-08-01	3.7404	2000-04-01	0.3205
1989-01-01	0.1800	1992-09-01	6.7166		
1989-02-01	0.0083	1992-10-01	0.9673		
1989-03-01	0.0011	1992-11-01	0.8176		
1989-04-01	0	1992-12-01	1.1414		
1989-05-01	0.5897	1993-01-01	0.0942		
1989-06-01	1.071	1993-02-01	0.0384		
1989-07-01	2.69609677	1993-03-01	0.04783871		

Annexe II: Paramètres calés

- Scénario 0 :

Parameter_Name	Fitted_Value	Min_value	Max_value
R__CN2.mgt	-0.626268	-0.640553	-0.611983
R__GW_DELAY.gw	-0.038315	-0.045685	-0.030945
R__OV_N.hru	-0.116969	-0.122408	-0.111530
R__SURLAG.bsn	0.135771	0.128588	0.142954
R__SLSUBBSN.hru	-0.002289	-0.016569	0.011991
R__HRU_SLP.hru	-0.476658	-0.486250	-0.467066
R__SOL_AWC (..).sol	-0.480957	-0.500000	-0.461914
V__SOL_K (..).sol	250.277908	245.991318	254.5645
V__GWQMN.gw	2470.101563	2351.846680	2588.356
V__GW_REVAP.gw	0.198120	0.197640	0.198600
V__RCHRG_DP.gw	0.013800	0.010291	0.017309
V__CH_N2.rte	0.058855	0.058339	0.059371
V__CH_K2.rte	20.460207	20.000000	20.920414
V__ESCO.hru	0.003626	0.001589	0.005663
V__EPCO.hru	0.847638	0.841173	0.854103
V__ALPHA_BF.gw	0.975199	0.973551	0.976847

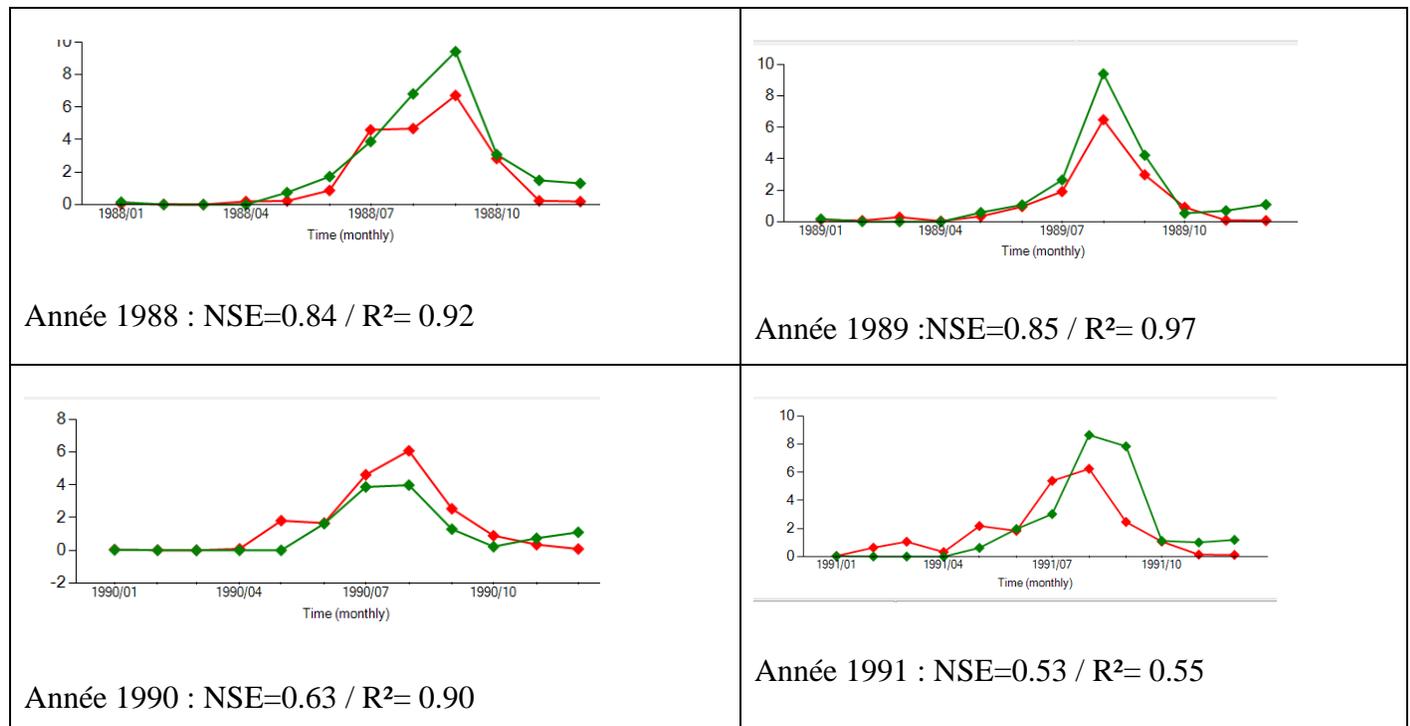
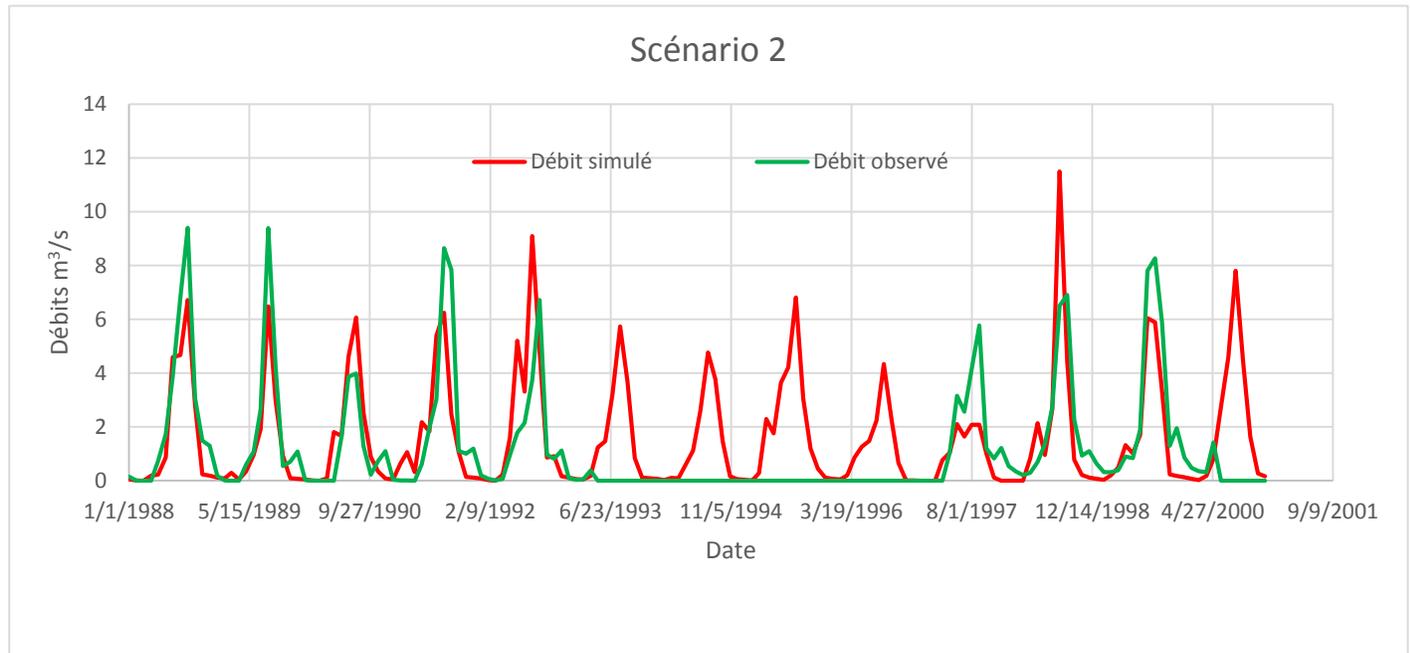
- Scénario 1

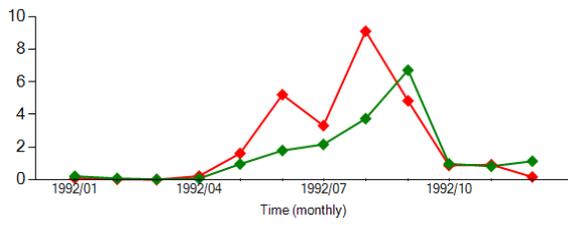
Parameter_Name	Fitted_Value	Min_value	Max_value
R__CN2.mgt	-0.694232	-0.707922	-0.680542
R__GW_DELAY.gw	0.106862	0.102433	0.111291
R__OV_N.hru	-0.224749	-0.237204	-0.212294
R__SURLAG.bsn	0.161211	0.151164	0.171258
R__SLSUBBSN.hru	0.111971	0.072381	0.151561
R__HRU_SLP.hru	-0.487967	-0.493984	-0.481950
R__SOL_AWC(..).sol	-0.463037	-0.500000	-0.426075
V__SOL_K(..).sol	443.175812	421.877899	464.4737
V__GWQMN.gw	2880.273193	2828.428223	2932.118
V__GW_REVAP.gw	0.143377	0.141438	0.145316
V__RCHRG_DP.gw	0.015790	0.010467	0.021113
V__CH_N2.rte	0.041259	0.040541	0.041977
V__CH_K2.rte	21.054684	20.000000	22.109369
V__ESCO.hru	0.012828	0.003724	0.021932
V__EPCO.hru	0.614031	0.601415	0.626648
V__ALPHA_BF.gw	0.984001	0.982148	0.985854

- Scénario 2

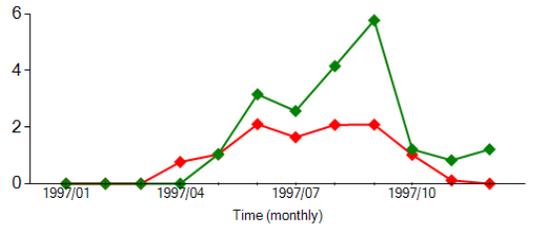
Parameter_Name	Fitted_Value	Min_value	Max_value
R__CN2.mgt	-0.631021	-0.646638	-0.615404
R__GW_DELAY.gw	0.079820	0.076379	0.083261
R__OV_N.hru	-0.134651	-0.145576	-0.123726
R__SURLAG.bsn	0.206997	0.193807	0.220187
R__SLSUBBSN.hru	0.194896	0.165873	0.223919
R__HRU_SLP.hru	-0.493724	-0.500000	-0.487448
R__SOL_AWC(..).sol	-0.476974	-0.500000	-0.453949
V__SOL_K(..).sol	475.955170	462.148804	489.7615
V__GWQMN.gw	2613.058350	2535.924316	2690.192
V__GW_REVAP.gw	0.140858	0.136155	0.145561
V__RCHRG_DP.gw	0.011551	0.005332	0.017770
V__CH_N2.rte	0.045110	0.044715	0.045505
V__CH_K2.rte	20.126858	20.000000	20.253716
V__ESCO.hru	0.090951	0.074332	0.107570
V__EPCO.hru	0.437665	0.420933	0.454397
V__ALPHA_BF.gw	0.965627	0.962960	0.968294

Annexe III: Hydrogramme pour le scénario 2

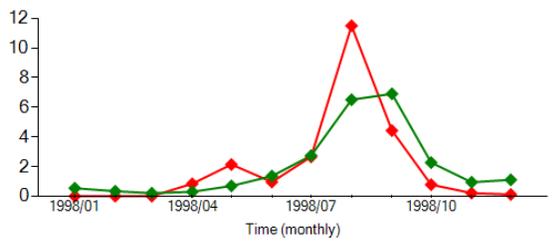




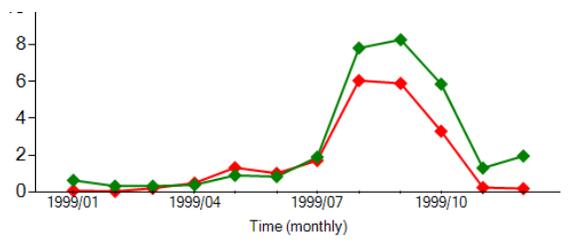
Année 1992 : NSE= -0.12 / R²= 0.54



Année 1997 : NSE= -0.42 / R²= 0.75



Année 1998 : NSE= -0.32 / R²= 0.70



Année 1999 : NSE= -0.79 / R²= 0.93

Annexe IV: Rapport de la foramation des URH

SWAT model simulation Date: 5/13/2019 12:00:00 AM Time: 00:00:00

MULTIPLE HRUs LandUse/Soil/Slope OPTION THRESHOLDS : 15 / 40 / 20 [%]

Number of HRUs: 61

Number of Subbasins: 8

	Area [ha]	Area[acres]
Watershed	93534.9460	231129.5284

	Area [ha]	Area[acres]	% Wat.Area
LANDUSE:			
Agricultural Land-Generic --> AGRL	46307.1653	114427.3208	49.51
Rice --> RICE	1429.2346	3531.7102	1.53
Forest-Mixed --> FRST	13957.0954	34488.6805	14.92
Forest-Deciduous --> FRSD	1625.0150	4015.4933	1.74
Range-Brush --> RNGB	30216.4358	74666.3236	32.30

SOILS:			
Lg5-2a-1515	44583.5900	110168.2801	47.67
Nd1-1544	45832.9925	113255.6162	49.00
I-Rd-79	3118.3635	7705.6321	3.33

SLOPE:			
3-6	23068.0594	57002.3281	24.66
6-20	55086.4356	136121.3367	58.89
0-3	15380.4511	38005.8636	16.44

	Area [ha]	Area[acres]	%Wat.Area	%Sub.Area		
SUBBASIN #	1	3206.7071	7923.9335	3.43		
LANDUSE:						
Agricultural Land-Generic --> AGRL	1576.2050	3894.8813	1.69	49.15		
Rice --> RICE	647.2972	1599.5038	0.69	20.19		
Forest-Mixed --> FRST	983.2049	2429.5484	1.05	30.66		
SOILS:						
Lg5-2a-1515	3206.7071	7923.9335	3.43	100.00		
SLOPE:						
3-6	916.4008	2264.4722	0.98	28.58		
6-20	1219.5757	3013.6325	1.30	38.03		
0-3	1070.7305	2645.8287	1.14	33.39		
HRUs						
1 Agricultural Land-Generic --> AGRL/Lg5-2a-1515/3-6	451.3836	1115.3914	0.48	14.08	1	
2 Agricultural Land-Generic --> AGRL/Lg5-2a-1515/6-20	713.9263	1764.1475	0.76	22.26	2	
3 Agricultural Land-Generic --> AGRL/Lg5-2a-1515/0-3	410.8951	1015.3423	0.44	12.81	3	
4 Rice --> RICE/Lg5-2a-1515/0-3	357.8554	884.2785	0.38	11.16	4	
5 Rice --> RICE/Lg5-2a-1515/6-20	150.1324	370.9848	0.16	4.68	5	
6 Rice --> RICE/Lg5-2a-1515/3-6	139.3094	344.2405	0.15	4.34	6	
7 Forest-Mixed --> FRST/Lg5-2a-1515/0-3	301.9801	746.2079	0.32	9.42	7	
8 Forest-Mixed --> FRST/Lg5-2a-1515/6-20	355.5170	878.5003	0.38	11.09	8	
9 Forest-Mixed --> FRST/Lg5-2a-1515/3-6	325.7078	804.8403	0.35	10.16	9	

	Area [ha]	Area[acres]	%Wat.Area	%Sub.Area
--	-----------	-------------	-----------	-----------

SUBBASIN #	2	4235.8415	10466.9763	4.53		
LANDUSE:						
	Agricultural Land-Generic --> AGRL	3453.9041	8534.7698	3.69	81.54	
	Rice --> RICE	781.9374	1932.2064	0.84	18.46	
SOILS:						
	Lg5-2a-1515	4235.8415	10466.9763	4.53	100.00	
SLOPE:						
	0-3	1151.7537	2846.0411	1.23	27.19	
	6-20	1983.8368	4902.1600	2.12	46.83	
	3-6	1100.2510	2718.7751	1.18	25.97	
HRUs						
10	Agricultural Land-Generic --> AGRL/Lg5-2a-1515/0-3	790.1228	1952.4330	0.84	18.65	1
11	Agricultural Land-Generic --> AGRL/Lg5-2a-1515/6-20	1751.9967	4329.2716	1.87	41.36	2
12	Agricultural Land-Generic --> AGRL/Lg5-2a-1515/3-6	911.7846	2253.0652	0.97	21.53	3
13	Rice --> RICE/Lg5-2a-1515/3-6	188.4664	465.7099	0.20	4.45	4
14	Rice --> RICE/Lg5-2a-1515/0-3	361.6309	893.6081	0.39	8.54	5
15	Rice --> RICE/Lg5-2a-1515/6-20	231.8401	572.8885	0.25	5.47	6

		Area [ha]	Area[acres]	% Wat.Area	% Sub.Area	
SUBBASIN #	3	5407.1430	13361.3207	5.78		
LANDUSE:						
	Agricultural Land-Generic --> AGRL	2493.2058	6160.8362	2.67	46.11	
	Forest-Deciduous --> FRSD	1625.0150	4015.4933	1.74	30.05	
	Range-Brush --> RNGB	1288.9222	3184.9912	1.38	23.84	
SOILS:						
	Lg5-2a-1515	5407.1430	13361.3207	5.78	100.00	

SLOPE:

6-20	3068.7184	7582.9566	3.28	56.75
0-3	934.5989	2309.4405	1.00	17.28
3-6	1403.8257	3468.9235	1.50	25.96

HRUs

16	Agricultural Land-Generic --> AGRL/Lg5-2a-1515/6-20	1295.0001	3200.0099	1.38	23.95	1
17	Agricultural Land-Generic --> AGRL/Lg5-2a-1515/0-3	564.4132	1394.6933	0.60	10.44	2
18	Agricultural Land-Generic --> AGRL/Lg5-2a-1515/3-6	633.7925	1566.1330	0.68	11.72	3
19	Forest-Deciduous --> FRSD/Lg5-2a-1515/3-6	403.4023	996.8273	0.43	7.46	4
20	Forest-Deciduous --> FRSD/Lg5-2a-1515/6-20	851.4270	2103.9187	0.91	15.75	5
21	Forest-Deciduous --> FRSD/Lg5-2a-1515/0-3	370.1857	914.7473	0.40	6.85	6
22	Range-Brush --> RNGB/Lg5-2a-1515/3-6	366.6309	905.9632	0.39	6.78	7
23	Range-Brush --> RNGB/Lg5-2a-1515/6-20	922.2913	2279.0280	0.99	17.06	8

SUBBASIN #	Area [ha]	Area[acres]	%Wat.Area	%Sub.Area
4	18571.0885	45890.0882	19.85	

LANDUSE:

Agricultural Land-Generic --> AGRL	8607.1180	21268.6189	9.20	46.35
Range-Brush --> RNGB	9963.9705	24621.4694	10.65	53.65

SOILS:

Lg5-2a-1515	18571.0885	45890.0883	19.85	100.00
-------------	------------	------------	-------	--------

SLOPE:

3-6	5035.1090	12442.0062	5.38	27.11
0-3	2114.5364	5225.1252	2.26	11.39
6-20	11421.4431	28222.9569	12.21	61.50

HRUs

24	Agricultural Land-Generic --> AGRL/Lg5-2a-1515/3-6	2163.3064	5345.6383	2.31	11.65	1
25	Agricultural Land-Generic --> AGRL/Lg5-2a-1515/0-3	2114.5364	5225.1252	2.26	11.39	2
26	Agricultural Land-Generic --> AGRL/Lg5-2a-1515/6-20	4329.2752	10697.8554	4.63	23.31	3
27	Range-Brush --> RNGB/Lg5-2a-1515/6-20	7092.1679	17525.1014	7.58	38.19	4
28	Range-Brush --> RNGB/Lg5-2a-1515/3-6	2871.8026	7096.3679	3.07	15.46	5

SUBBASIN #	Area [ha]	Area[acres]	%Wat.Area	%Sub.Area
5	9077.4216	22430.7627	9.70	

LANDUSE:

Agricultural Land-Generic --> AGRL	7122.2672	17599.4783	7.61	78.46
Range-Brush --> RNGB	1955.1544	4831.2843	2.09	21.54

SOILS:

Nd1-1544	9077.4216	22430.7627	9.70	100.00
----------	-----------	------------	------	--------

SLOPE:

6-20	5562.9926	13746.4329	5.95	61.28
0-3	1656.2080	4092.5727	1.77	18.25
3-6	1858.2210	4591.7570	1.99	20.47

HRUs

29	Agricultural Land-Generic --> AGRL/Nd1-1544/6-20	3607.8382	8915.1486	3.86	39.75	1
30	Agricultural Land-Generic --> AGRL/Nd1-1544/0-3	1656.2080	4092.5727	1.77	18.25	2
31	Agricultural Land-Generic --> AGRL/Nd1-1544/3-6	1858.2210	4591.7570	1.99	20.47	3
32	Range-Brush --> RNGB/Nd1-1544/6-20	1955.1544	4831.2843	2.09	21.54	4

	Area [ha]	Area[acres]	% Wat.Area	% Sub.Area		
SUBBASIN #	6	16336.6868	40368.7699	17.47		
LANDUSE:						
Agricultural Land-Generic --> AGRL	10664.1779	26351.7167	11.40	65.28		
Forest-Mixed --> FRST	5672.5089	14017.0532	6.06	34.72		
SOILS:						
Nd1-1544	13218.3233	32663.1378	14.13	80.91		
I-Rd-79	3118.3635	7705.6321	3.33	19.09		
SLOPE:						
3-6	4657.9408	11510.0046	4.98	28.51		
0-3	3815.4207	9428.0952	4.08	23.35		
6-20	7863.3253	19430.6701	8.41	48.13		
HRUs						
33	Agricultural Land-Generic --> AGRL/Nd1-1544/3-6	3003.8405	7422.6400	3.21	18.39	1
34	Agricultural Land-Generic --> AGRL/Nd1-1544/0-3	2580.5697	6376.7167	2.76	15.80	2
35	Agricultural Land-Generic --> AGRL/Nd1-1544/6-20	5079.7677	12552.3600	5.43	31.09	3
36	Forest-Mixed --> FRST/I-Rd-79/6-20	1531.4594	3784.3127	1.64	9.37	4
37	Forest-Mixed --> FRST/I-Rd-79/0-3	677.7179	1674.6747	0.72	4.15	5
38	Forest-Mixed --> FRST/I-Rd-79/3-6	909.1862	2246.6447	0.97	5.57	6
39	Forest-Mixed --> FRST/Nd1-1544/3-6	744.9141	1840.7200	0.80	4.56	7
40	Forest-Mixed --> FRST/Nd1-1544/6-20	1252.0983	3093.9974	1.34	7.66	8
41	Forest-Mixed --> FRST/Nd1-1544/0-3	557.1331	1376.7037	0.60	3.41	9

	Area [ha]	Area[acres]	% Wat.Area	% Sub.Area		
SUBBASIN #	7	20695.8777	51140.5486	22.13		
LANDUSE:						
Agricultural Land-Generic --> AGRL	3728.5054	9213.3232	3.99	18.02		
Forest-Mixed --> FRST	4654.3886	11501.2269	4.98	22.49		
Range-Brush --> RNGB	12312.9838	30425.9985	13.16	59.49		
SOILS:						
Lg5-2a-1515	13162.8099	32525.9614	14.07	63.60		
Nd1-1544	7533.0678	18614.5872	8.05	36.40		
SLOPE:						
6-20	15159.4643	37459.7942	16.21	73.25		
3-6	3458.4040	8545.8893	3.70	16.71		
0-3	2078.0094	5134.8651	2.22	10.04		
HRUs						
42 Agricultural Land-Generic --> AGRL/Lg5-2a-1515/6-20	1962.4260	4849.2527	2.10	9.48	1	
43 Agricultural Land-Generic --> AGRL/Lg5-2a-1515/3-6	858.9048	2122.3967	0.92	4.15	2	
44 Agricultural Land-Generic --> AGRL/Lg5-2a-1515/0-3	907.1746	2241.6738	0.97	4.38	3	
45 Forest-Mixed --> FRST/Lg5-2a-1515/0-3	668.6594	1652.2909	0.71	3.23	4	
46 Forest-Mixed --> FRST/Lg5-2a-1515/6-20	1275.8250	3152.6274	1.36	6.16	5	
47 Forest-Mixed --> FRST/Lg5-2a-1515/3-6	561.3158	1387.0393	0.60	2.71	6	
48 Forest-Mixed --> FRST/Nd1-1544/0-3	502.1754	1240.9005	0.54	2.43	7	
49 Forest-Mixed --> FRST/Nd1-1544/3-6	522.1731	1290.3158	0.56	2.52	8	
50 Forest-Mixed --> FRST/Nd1-1544/6-20	1124.2399	2778.0530	1.20	5.43	9	

51	Range-Brush --> RNGB/Lg5-2a-1515/6-20	6928.5043	17120.6806	7.41	33.48	10
52	Range-Brush --> RNGB/Nd1-1544/3-6	1516.0104	3746.1374	1.62	7.33	11
53	Range-Brush --> RNGB/Nd1-1544/6-20	3868.4691	9559.1805	4.14	18.69	12

	Area [ha]	Area[acres]	% Wat.Area	%Sub.Area		
SUBBASIN #	8	16004.1798	39547.1286	17.11		
LANDUSE:						
	Agricultural Land-Generic --> AGRL	8661.7820	21403.6964	9.26	54.12	
	Forest-Mixed --> FRST	2646.9930	6540.8520	2.83	16.54	
	Range-Brush --> RNGB	4695.4048	11602.5801	5.02	29.34	

SOILS:

Nd1-1544	16004.1798	39547.1285	17.11	100.00
----------	------------	------------	-------	--------

SLOPE:

0-3	2559.1935	6323.8951	2.74	15.99
3-6	4637.9070	11460.5001	4.96	28.98
6-20	8807.0793	21762.7334	9.42	55.03

HRUs

54	Agricultural Land-Generic --> AGRL/Nd1-1544/0-3	1972.0230	4872.9675	2.11	12.32	1
55	Agricultural Land-Generic --> AGRL/Nd1-1544/3-6	2370.0206	5856.4394	2.53	14.81	2
56	Agricultural Land-Generic --> AGRL/Nd1-1544/6-20	4319.7384	10674.2895	4.62	26.99	3
57	Forest-Mixed --> FRST/Nd1-1544/3-6	714.0795	1764.5261	0.76	4.46	4
58	Forest-Mixed --> FRST/Nd1-1544/6-20	1345.7430	3325.3983	1.44	8.41	5
59	Forest-Mixed --> FRST/Nd1-1544/0-3	587.1705	1450.9275	0.63	3.67	6

60	Range-Brush --> RNGB/Nd1-1544/6-20	3141.5979	7763.0455	3.36	19.63	7
61	Range-Brush --> RNGB/Nd1-1544/3-6	1553.8069	3839.5346	1.66	9.71	8