



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE

UFR ENVIRONNEMENT

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

ANNEE ACADEMIQUE :
2018-2019

N° D'ORDRE : 0265 /2020

N° CARTE D'ETUDIANT :
CI0414002339

LABORATOIRE :
Sciences et Technologies
de l'Environnement

Soutenu publiquement
le : 10 / 06 / 2020

MASTER

Génie de l'Eau et de l'Environnement

THEME :

**Cartographie des zones favorables à la recharge des
nappes d'eau souterraine du bassin versant de la Lobo
à Nibéhibé (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire).**

Présenté par :

COULIBALY Doh Lamissa

JURY

Président : M. KOUADIO Zilé Alex, Maître de conférences,
Université Jean LOROUGNON GUEDE

Directeur : M. DIBI Brou, Maître de conférences,
Université Jean LOROUGNON GUEDE

Encadreur : M. ANOH Kouao Armand, Maître-Assistant,
Université Jean LOROUGNON GUEDE

Examineur : Mme.YAO Affoué Berthe, Epse TOURE Maître-Assistant,
Université Jean LOROUGNON GUEDE

TABLE DES MATIERES

DEDICACE.....	iv
REMERCIEMENTS	v
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES FIGURES.....	ix
INTRODUCTION.....	1
PARTIE 1 : GENERALITES.....	4
1.1 Généralités sur la zone d'étude.....	5
1.1.1 Situation géographique	5
1.1.2 Climat.....	6
1.1.3 Relief et sol	6
1.1.4 Hydrologie	6
1.1.5 Végétation	7
1.1.6 Géologie.....	7
1.1.7 Population	8
1.2. Télédétection et modélisation agro-hydrologique.....	8
1.2.1. Généralités sur la télédétection	8
1.2.2. Généralités sur la modélisation agro-hydrologique	8
1.2.3 Description du modèle agro-hydrologique SWAT	9
1.2.4 Fonctionnement SWAT	10
1.2.4.1 Phase terrestre du modèle SWAT	10
1.2.4.2 Phase aquatique du modèle SWAT	13
Conclusion partielle.....	13
PARTIE 2 : MATERIEL ET METHODES	15
2.1 Matériel.....	15
2.1.1 Données de l'étude.....	15

2.1.1.1	Données ponctuelles.....	15
2.1.1.2	Données spatiales	15
2.2.1	Matériel de gestion et d'acquisition des données.....	16
2.2.2	Matériel de traitement des données.....	16
2.2	Méthodes	16
2.2.1	Détermination des paramètres du modèle.....	16
2.2.1.1	Correction des données climatiques.....	16
2.2.1.2	Base de données de sol.....	17
2.2.2	Exécution du modèle.....	17
2.2.2.1	Délimitation des sous-bassins	17
2.2.2.2	Intégration de la carte d'occupation du sol	18
2.2.2.3	Intégration de la carte pédologique	18
2.2.2.4	Discretisation des Unités de Réponse Hydrologique (URH).....	18
2.2.2.5	Intégration des données météorologiques	19
2.2.2.6	Création des tables d'entrée par le modèle.....	19
2.2.2.7	Simulations.....	19
2.2.3	Evaluation de la performance du modèle.....	21
2.2.3.1	Analyse de sensibilité.....	21
2.2.3.2	Fonction-objectif	22
2.2.4	Calibration du modèle SWAT	23
2.2.5	Validation du modèle SWAT.....	23
	Conclusion partielle.....	24
	PARTIE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION.....	24
3.1	Résultats.....	25
3.1.1	Paramètres du modèle SWAT.....	25
3.1.1.1	Analyse de sensibilité.....	25
3.1.1.2	Calibration.....	27

3.1.1.3	Validation	28
3.1.2	Estimation de la valeur de la recharge dans chaque unité de réponse hydrologique ..	29
3.1.3	Cartographie des zones de recharge.....	32
3.1.4	Validation de la carte de recharge des nappes	34
3.2	Discussion.....	35
	CONCLUSION ET PERSPECTIVE	37
	REFERENCES.....	40

DEDICACE

A la mémoire de mon défunt père ; que ton âme repose en paix.

A ma mère COULIBALY MAMA, tes prières et bénédictions m'ont été utiles.

A ma tante COULIBALY Tcheborogo, merci pour la confiance et le soutien.

A toute la famille COULIBALY, ce travail est le fruit de vos efforts personnels.

REMERCIEMENTS

Au terme de notre travail, nous voudrions remercier sincèrement toutes les personnes qui ont participé à sa réalisation. Mais avant, permettez-moi de rendre grâce à DIEU le Tout Puissant de m'avoir accordé sa miséricorde pour mener ce travail jusqu'à son terme.

Je remercie le Professeur **TIDOU Abiba Sanogo Epse KONE**, Présidente de l'Université Jean Lorougnon Guédé, pour son dévouement à la bonne marche de cette institution qu'elle a la lourde charge de diriger.

J'exprime ma gratitude au Professeur **KONE Tidiani**, Vice-Président de l'Université Jean Lorougnon Guédé Chargé de la Pédagogie, de la Vie Universitaire, de la Recherche et de l'Innovation technologique pour ses encouragements à la recherche.

Mes remerciements vont à l'endroit de Professeur **AKAFFOU Doffou Sélastique**. Maître de Conférences et Vice-Président de l'Université Jean Lorougnon Guédé, Chargé de la Programmation, de la Planification et des Relations Extérieures.

Je tiens à remercier Docteur **KOUASSI Kouakou Lazare**, Maître de conférences, Directeur de l'UFR Environnement, merci pour votre confiance. Je vous réitère ma sincère reconnaissance m'avoir inculqué l'amour du travail bien fait.

Je témoigne ma gratitude au Directeur scientifique de ce travail Docteur **DIBI Brou**, Maître de Conférences, par ailleurs, Directeur du Laboratoire LSTE. Merci de nous avoir fait confiance et d'accepter de suivre ce travail.

J'adresse également mes remerciements au Docteur **MANGOUA Oi Mangoua Jules**, Maître Assistant, Responsable du parcours Génie de l'Eau et de l'Environnement, pour ses conseils et sa disponibilité.

J'exprime un remerciement spécial à mon encadreur, Docteur **ANOH Kouao Armand**, Maître-assistant. Vos conseils ont suscité en moi des sentiments de persévérance dans l'effort. Cher maître, votre rigueur, vos conseils, vos directives et votre mine toujours joviale en toute circonstance m'ont donné espoir dans les moments de peine. Merci docteur

Grand merci aux membres du jury de la soutenance qui ont acceptés d'évaluer ce travail de sorte à rehausser sa qualité. Merci pour votre contribution si indispensable.

A tous les enseignants-chercheurs des UFR Agroforesterie et Environnement merci pour les conseils, les connaissances scientifiques et pédagogiques à nous transmis.

Nos remerciements vont à l'endroit des aînés du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE) pour leur soutien et encouragement. Sans oublier de mentionner M. **KOFFI Berenger**, M. **KOUADIO Kouamé Jean Olivier** et M. **OUATTARA Gningnéri**

Souleymane qui n'ont pas hésité à nous fournir les données pour la réalisation de ce travail. Grand merci à mon tuteur Mr **OUTTARA Prosper**, qui depuis notre première année à l'Université Jean Lorougnon Guédé, a accepté de nous héberger. Nous vous sommes reconnaissants pour tout l'amour que vous nous avez témoigné durant tout ce temps.

Je remercie également la promotion 2015 agroforesterie et environnement, ainsi que tous nos amis de la filière Génie de l'Eau et de l'Environnement, nous leurs disons merci pour le soutien moral.

Je ne saurai terminer sans mentionner mes amis **TOURE Patrice, Koffi Yao Charlbet, TOURE Sie Phillipe SIDIBE Aboubakar, MEITE Mamadou, KONE Fidele, SINIYOBO Issa, TALL Mamadou, MANIGA Siriki, COULIBALY Kenana, TRAORE Kassoum, OUATTARA Ouana et SAHAN Tanoh Fabrice, SYLLA Zainab et CAMARA Alima**. Le présent document est le vôtre également. Merci infiniment pour votre générosité. Enfin, par crainte d'avoir oublié quelqu'un, que tous ceux et celles dont je suis redevable se voient ici vivement remerciés. Je vous témoigne ma profonde reconnaissance.

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

DGIHH: Direction Générale des Infrastructures de l'Hydraulique Humaine

EAWAG: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology/ Institut Federal Suisse des sciences et Technologies des eaux.

FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations/ Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

GPS: Global Positioning System

INS : Institut National de la Statistique

MNA : Modèle Numérique d'Altitude

ONEP : Office Nationale de l'Eau Potable

SIG : Système d'Information Géographique

SODECI : Société de Distribution d'Eau de Côte d'Ivoire

SRTM: Shuttle Radar Topography Mission / Mission de topographie radar de la navette

SUF12: Sequential Uncertainty Fitting / Adaptation de l'incertitude séquentielle

SWAT: Soil and Water Assessment Tool / Outil d'évaluation des sols et de l'eau

URH : Unité de Réponse Hydrologique

UTM: Universal Transversal Mercator

WGS: World Géodésique System

CN : Curve number / numéro de courbe

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I: Paramètres de sensibilité du model SWAT sur le bassin Lobo	26
Tableau II: Paramètres évaluant la performance de la calibration.....	27
Tableau III: Paramètres évaluant la performance de la validation	28
Tableau IV: la valeur de la recharge par HRU.....	30

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Présentation du bassin versant de la Lobo à Nibéhibé.....	5
Figure 2: Diagramme ombro-thermique du bassin de la Lobo de 2000 à 2017	6
Figure 3: Formations géologiques du bassin versant de la Lobo (Yao, 2015) modifié	7
Figure 4: Procédure d'implémentation du modèle SWAT.....	21
Figure 5: Procédure d'implémentation du modèle SUFI2.	24
Figure 6: Courbe comparatif des débits simulés et observés à la période de calibration.....	28
Figure 7: Courbe comparative des débits simulés et observés à la période de validation.....	29
Figure 8: Carte des zones de recharge	33
Figure 9: Validation de la carte des recharges.....	34

INTRODUCTION

INTRODUCTION

L'accès à l'eau potable a toujours été au centre des grands projets de développement de l'Homme eu égard à son caractère vital. Dans cette optique, des efforts considérables ont été mis en œuvre par plusieurs pays au cours de ces trois dernières décennies, pour améliorer la qualité de vie des populations africaines les plus défavorisées (Koua, 2009). Malgré cela, plus de 300 millions d'africains n'ont pas accès à des services aussi fondamentaux que sont l'eau potable et l'assainissement (Kouamé, 2007).

Dans les pays en développement comme c'est le cas en Côte d'Ivoire, malgré des précipitations très importantes, le pays connaît des problèmes d'approvisionnement en eau potable liés à l'insuffisance des ressources en eau, surtout en saison sèche. Parmi les ressources en eau douces exploitables, les eaux souterraines constituent une ressource de premier choix pour l'alimentation en eau potable des populations, à cause de leur qualité relativement bonne et leur coût peu élevé. De même, selon Biémi (1992), Lasm (2000), Jourda (2005) et Youan (2008), ces aquifères peuvent constituer des réserves d'eau qui présentent l'avantage d'être à l'abri des fluctuations saisonnières et des éventuelles pollutions accidentelles. Dans le bassin de la Lobo, des études réalisées par Yao (2015) ont montré que les eaux souterraines présentaient une excellente disponibilité. Toutefois, elles ne sont pas toujours corrélées avec la demande. En effet, dans certaines parties du bassin, le problème se pose avec autant de gravité que dans d'autres. Cela entraîne donc un taux d'accès à l'eau potable de 41% en milieu urbain. Comme on le constate, les besoins en eau pour combler le déficit en eau restent importants. Or, les eaux souterraines demeurent les ressources les moins exploitées du fait de leur mauvaise connaissance. En effet, les faibles taux de réussite des ouvrages traduisent une méconnaissance du milieu fracturé d'une part et l'inefficacité de la méthode d'implantation employée d'autre part.

En conséquence, la question liée à l'exploitation des ressources en eau souterraine peut être abordée à travers une méthodologie innovante s'appuyant sur les outils numériques d'aide à la décision (Anoh *et al.*, 2012). En effet, l'utilisation des outils numériques d'aide à la décision est devenue incontournable car ils permettent d'intégrer des données multi-sources et de faire des analyses pouvant tenir compte de contraintes très diversifiées pour une optimisation de la gestion des eaux (Anoh, 2014). Parmi ces outils, le couplage de la télédétection, des Systèmes d'Information Géographique (SIG) et de la modélisation agro-hydrologique avec le modèle SWAT (Outils d'estimation de l'eau et du sol) occupent une place de choix, dans la compréhension des processus et des interactions dynamiques entre les paramètres environnementaux et physiographiques qui interviennent dans l'hydrosystème.

INTRODUCTION

Par ailleurs, la présente étude vise à apporter une information sur l'exploitation des aquifères souterrains du bassin à partir de ces outils numériques. La prospection des aquifères sera d'autant plus aisée avec la connaissance des zones de recharge pouvant contribuer à augmenter le taux de réussite lors de l'implantation des forages. En effet, la retenue de la Lobo couramment exploitée pour l'alimentation en eau potable des différentes localités dont celle de Daloa, connaît une forte eutrophisation. Ainsi, l'eau potable produite et distribuée par la Société de Distribution d'Eau de Côte d'Ivoire (SODECI) n'arrive plus à couvrir les besoins de la population d'où un intérêt croissant dans la région pour les eaux souterraines exploitée par l'implantation des forages. C'est donc dans une perspective de réduction du taux d'échec des forages que cette étude dont le thème est : **«Cartographie des zones favorables à la recharge des nappes d'eau souterraine sur le bassin versant de la Lobo à Nibéhibé centre-ouest de la Côte d'Ivoire.»** a été initiée par le Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement. Elle s'inscrit dans le cadre du projet EPEAEP Daloa financé par le contrat de désendettement. L'étude a pour objectif principal de mettre en place un outil de gestion permettant d'identifier les zones de forte productivité des aquifères. De façon spécifique, il s'agit de :

- déterminer les paramètres de la mise en œuvre du modèle SWAT ;
- déterminer les zones d'alimentation en eau de la nappe.

Pour mener à bien cette étude, ce travail a été subdivisé en trois parties qui se présentent comme suit :

- la première partie traite des généralités sur la zone d'étude et le contexte de l'étude.
- La deuxième partie est consacrée aux différents matériel et méthodes utilisés ;
- la troisième partie analyse les principaux résultats obtenus. Cette analyse des résultats va consister à leur interprétation qui sera suivie d'une discussion.

Une conclusion générale qui fait la synthèse des principaux résultats obtenus et des perspectives mettront fin à cette étude.

PARTIE 1 : GENERALITES

1.1 Généralités sur la zone d'étude

1.1.1 Situation géographique

Le bassin versant de la Lobo à Nibéhibé qui fait l'objet de cette étude est situé au Centre-ouest de la Côte d'Ivoire, entre 6°15' et 6°55' de longitude Ouest et entre 6°45' et 7°55' de latitude Nord (Figure 1). C'est un sous bassin du bassin versant du fleuve Sassandra. Le bassin de la Lobo qui est l'un des principaux affluents en rive gauche du fleuve Sassandra et draine une superficie d'environ 7 280 km². Son espace géographique couvre les localités de Daloa, Seitifla, Zahibo, Dania et Vavoua. La ville de Daloa en est le chef-lieu de région.

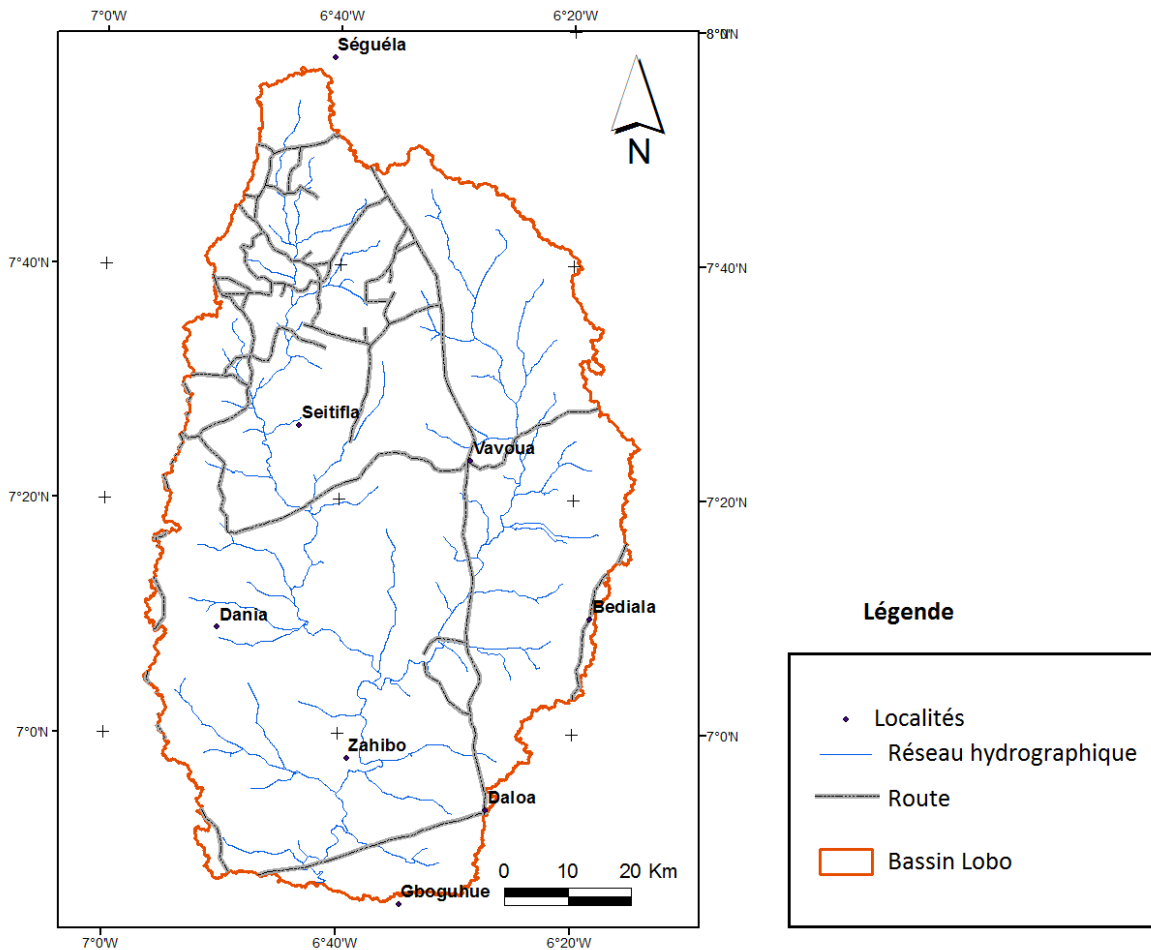


Figure 1: Présentation du bassin versant de la Lobo à Nibéhibé

1.1.2 Climat

Le bassin versant de la Lobo est situé dans une zone forestière avec un climat de type équatorial de transition atténuée. Ce climat est caractérisé par une saison pluvieuse de Mars à Novembre et une saison sèche de Décembre à Février avec une faible variation de température. Le mois de Janvier est le moins pluvieux avec une pluviométrie de 1.3 mm. Le mois de Mai est le plus humide avec une pluviométrie moyenne de 310 mm. La température moyenne annuelle est de 26,9 °C (Figure 2).

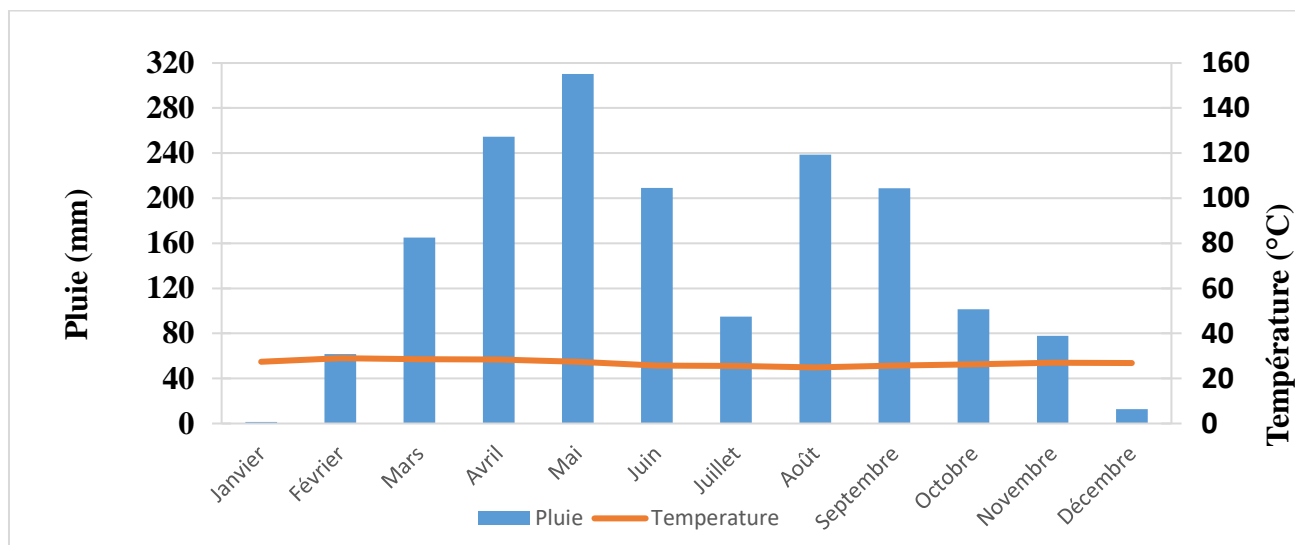


Figure 2: Diagramme ombro-thermique du bassin de la Lobo de 2000 à 2017 Station de Daloa

1.1.3 Relief et sol

Le relief du bassin est composé de plaines et de plateaux. Il se présente comme une pénéplaine dont l'altitude varie entre 160 m et 480 m. La pente longitudinale qui est de 0,82 m/km confirme la monotonie du relief du bassin (Yao, 2015). Les sols sont essentiellement de type ferrallitique avec recouvrement issus de schistes et de granites.

1.1.4 Hydrologie

Les caractéristiques morphométriques d'un bassin versant influencent fortement sa réponse hydrologique et notamment le régime des écoulements en période de crue ou d'étiage (Yao, 2015). Le coefficient de compacité de 1,5 indique que le bassin est de forme allongée avec un temps de concentration des eaux à l'exutoire relativement long favorisant ainsi une bonne infiltration.

1.1.5 Végétation

Le bassin versant de la Lobo est localisé dans la zone forestière propice à l'agriculture. Ce patrimoine forestier s'est progressivement dégradé au cours de ces dernières années (Brou, 2005). La forêt dégradée devient de plus en plus l'élément dominant de cette végétation, car elle est marquée par l'exploitation agricole. Cependant, elle renferme de nombreuses essences telles que le Samba *Triplochiton scleroxylon*, l'Ako *Antiaris africana*, le Bété *Mansonia altissima* (Guillaumet & Adjahohoun, 1971 in Yao, 2015).

1.1.6 Géologie

Les formations géologiques du bassin versant de la Lobo appartiennent principalement au socle précambrien (précambrien moyen) dominées par deux entités géologiques ; à savoir les roches magmatiques et les roches métamorphiques (Figure 3). La géologie du bassin est connue grâce aux travaux de (Ahimon, 1990 & Delor *et al.*, 1995 in Yao, 2015). Les roches magmatiques rencontrées sont de types plutoniques et volcaniques. Elles sont représentées par les granitoïdes qui se rencontrent dans la majeure partie du bassin. Alors que les roches métamorphiques du bassin sont de type migmatite et schisteux dans lesquelles est logé le lit de la rivière.

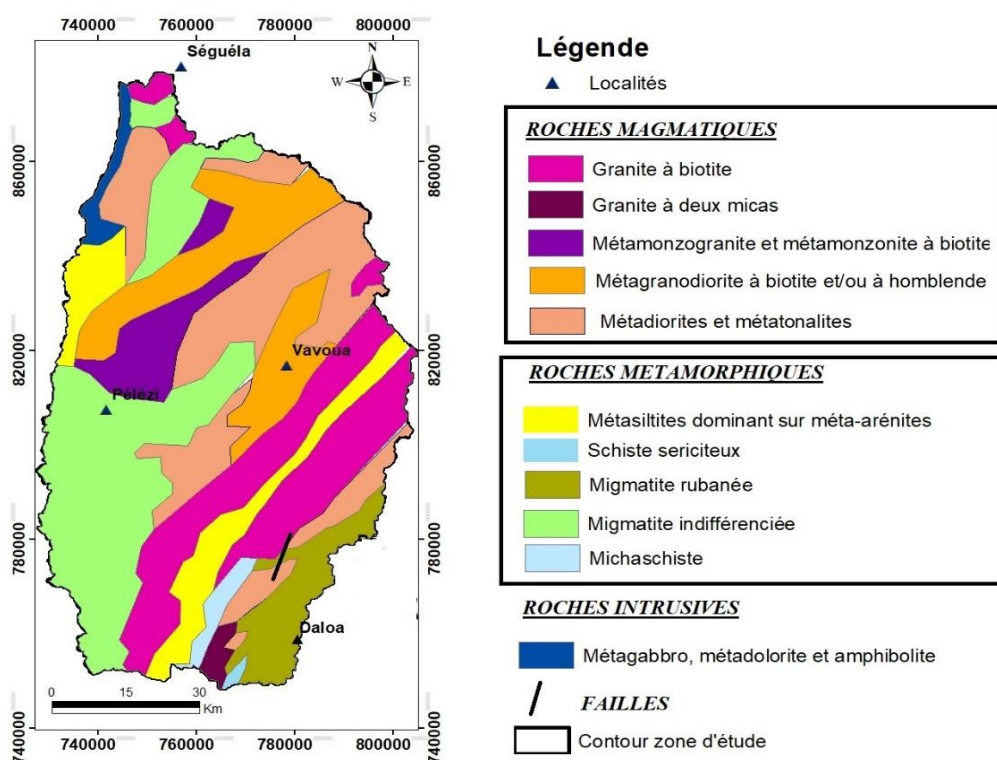


Figure 3: Formations géologiques du bassin versant de la Lobo (Yao, 2015) modifié

1.1.7 Population

Selon le recensement général de la population et de l'habitat réalisé par l'Institut National de la Statistique (INS) en 2010, la population du bassin versant de la Lobo était estimée à 812 742 habitants (INS, 2010). En 2014, une augmentation de 27 292 ; soit 840 034 habitants a été enregistrée (INS, 2014). Cette population est inégalement répartie sur les deux grands départements du bassin avec : 52% pour le département de Daloa et 48% pour celui de Vavoua soit une densité de 115 hbts/km². L'évolution démographique est importante dans le département à cause des activités économiques de développement, notamment l'agriculture.

1.2. Télédétection et modélisation agro-hydrologique

1.2.1. Généralités sur la télédétection

La télédétection est l'ensemble des connaissances et techniques permettant de déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci (Kouassi, 2013). Elle consiste d'une part à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi par une cible, et d'autre part à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information. Les plates-formes utilisées pour l'acquisition des données en télédétection sont diverses (au sol, les ballons, les avions et les satellites). L'un des avantages de la télédétection est de générer directement des cartes informatiques à partir d'une analyse de photographie aériennes ou de photogrammétrie spatiale plus récemment (image satellite LANDSAT ou SPOT). La télédétection est dite passive lorsque la source illuminant la cible est indépendante du capteur. Cette source est le soleil dans le cas des satellites SPOT (Satellite pour l'Observation de la Terre), LANDSAT (Land Satellite), METEOSAT (Meteorological Satellite). La télédétection est dite active lorsque la source est liée au capteur. C'est le cas du LIDAR (Light Detection and Ranging) utilisant une source laser et le RADAR (Radio Detection And Ranging) utilisant une source hyperfréquence. Les satellites LANDSAT et SPOT de par leur altitude basse (300 à 1500 km) offrent des bonnes résolutions au sol.

1.2.2. Généralités sur la modélisation agro-hydrologique

La modélisation est définie comme la méthode qui permet de représenter un objet ou un phénomène du monde réel par une formule du système formel choisi (Lainé & Pavé, 2002). Cette représentation peut être physique, analogique ou mathématique (Lamarre, 2003). La

modélisation hydrologique représente mathématiquement de façon partielle ou totale le cycle de l'eau (Chaponnière, 2005; Bessière, 2008).

La modélisation hydrologique est à l'heure actuelle, largement utilisée pour apporter des informations dans un grand nombre de domaines relatifs à l'environnement ou à l'ingénierie. Ainsi, depuis l'apparition de la modélisation hydrologique, de nombreux modèles ont été développés en fonction des objectifs recherchés, sur la base de différents choix d'élaboration menant à une multitude de modèles exploitables dotant chacun de champs d'application et de validité restreint (Beckers & Degré, 2011). Les différences portent notamment sur les options de simulation en termes de discrétisation spatiale (globaux, semi-distribués ou distribués), de représentation temporelle (continue ou événementielle), de formulation des équations (empiriques, physiques et conceptuelles) et sur la représentation de l'espace, du temps et des processus décrits (déterministes ou stochastiques et cinématiques ou dynamiques) (Payraudeau, 2002).

1.2.3 Description du modèle agro-hydrologique SWAT

Le modèle agro-hydrologique SWAT (Soil and Water Assessment Tool) a été développé en 1998 par Jeff Arnold pour le service de recherche agricole (ARS) du Département de l'Agriculture des États-Unis (USDA) (Anoh *et al.*, 2018). Le modèle SWAT est un modèle semi-distribué, semi-physique et semi-empirique qui fonctionne sur une base continue avec un pas de temps journalier. Le modèle offre beaucoup d'avantages. Entre autres :

- la gestion intégrée de l'eau à travers l'évaluation de la quantité (ruissellement de surface et de sub-surface, interception par le couvert végétal, évapotranspiration, drainage, percolation, retenues, marécages) et de la qualité (sédimentation, nutriment, bactéries et pesticides) ;
- la gestion agronomique du bassin par l'intégration des pratiques culturales, l'irrigation, les rotations de culture et l'usage des pesticides. A ce niveau, il fait la distinction entre les plantes pérennes et les plantes annuelles ;
- la réalisation des prévisions climatiques (pluie, température et neige) ;
- sa gratuité ;
- l'intégration dans ses calculs, de la gestion des eaux de surface et souterraines.

A travers ses possibilités de modification et d'ajustements de certains aspects de son code source en vue d'une adaptation aux conditions locales. SWAT permet de gérer des bassins versants hétérogènes au plan du paysage, de l'utilisation du sol, de la pédologie et du relief

GENERALITES

nonobstant la taille (Anoh *et al.*, 2017). Le modèle peut aussi fonctionner en l'absence de données hydrométriques (Deslandes *et al.*, 2002). Son couplage avec les SIG (Système d'Information Géographique) tel que GRASS ou ArcView est d'une grande utilité car il favorise la gestion des données de type raster, vecteur et alphanumériques. Pour la cartographie des zones de recharge, il existe plusieurs méthodes d'estimation. Dans cette étude l'on a décidé d'utiliser une méthode innovante basée le modèle SWAT pour l'estimation et la cartographie de la recharge. L'estimation de la recharge à l'aide du modèle SWAT dans cette étude n'est pas la première réalisée en Côte d'Ivoire. En effet, cette même étude a été réalisée sur le bassin du lac Taabo par Anoh (2014) donnant ainsi d'excellents résultats.

1.2.4 Fonctionnement SWAT

La structure du modèle SWAT reproduit le cycle de l'eau de manière simplifiée à travers plusieurs modules interconnectés via des algorithmes spécifiques. Dans son exécution, SWAT subdivise la modélisation hydrologique du bassin en deux phases (Neitsch *et al.*, 2005)

- La première phase correspond à la phase terrestre du cycle hydrologique. Dans cette phase, le modèle gère la quantité d'eau, les charges de sédiments, de nutriments et de pesticides déversés dans le canal principal de chaque sous bassin.
- La seconde phase concerne le transport aquatique caractérisé par les mouvements de l'eau, des sédiments, des nutriments et autres polluants à travers le réseau fluvial du bassin jusqu'à l'exutoire.

1.2.4.1 Phase terrestre du modèle SWAT

Dans la phase terrestre du cycle hydrologique, le modèle SWAT procède d'abord par diviser le bassin versant en sous bassins puis en unité de réponse hydrologique (URH). C'est donc dans ces URH que le cycle de l'eau sera reproduit de façon journalière (Thiebault, 2010). Les principaux processus impliqués dans l'évaluation de la quantité de l'eau par SWAT se composent de la précipitation, l'évapotranspiration, le ruissellement de surface, l'écoulement subsurface ou latéral et l'écoulement souterrain (Equation 1).

$$SW_t = SW_0 + \sum (R_{day} + Q_{surf} + E_a + W_{seep} + Q_{gw}) \quad (1)$$

Où : SW_t = quantité finale d'eau dans le sol (mm) ;

SW_0 = quantité initiale d'eau dans le sol par jour (mm) ;

R_{day} = précipitation totale journalière (mm) ;

GENERALITES

Q_{surf} = ruissellement total de surface journalière (mm) ;

E_a = évapotranspiration totale journalière (mm) ;

W_{seep} = quantité journalière d'eau entrant dans la zone vadose à partir du profil du sol (mm) ;

Q_{gw} = quantité d'eau retournant dans le sol (mm).

Le bilan hydrique dans SWAT est décomposé en un ensemble d'échanges verticaux (évapotranspiration, infiltration et percolation) et horizontaux (écoulement de surface et hypodermique) (Neitsch *et al.*, 2005). En effet, lors d'un épisode pluvieux, l'eau est distribuée dans le bassin en trois parties. Une partie des précipitations est interceptée par le couvert végétal. La seconde partie sert à remplir les dépressions en surface. La troisième partie va s'infiltrer pour devenir une Réserve Facilement Utilisable (RFU) par les plantes et aussi alimenter les nappes souterraines.

➤ Infiltration

Lorsque la pluie tombe, elle peut être retenue soit par le couvert végétal soit par la surface du sol. L'eau retenue à la surface du sol va s'infiltrer dans les couches du sol et l'excédent va ruisseler. SWAT tient compte de la diversité des horizons de sol traversés par l'eau infiltrée. Il divise à cet effet le profil du sol en trois niveaux. Le premier niveau correspond à la zone racinaire qui s'étend de 0 à 2 m. Cette zone est aussi subdivisée en couches de sols ou horizons. Dans chaque horizon, l'infiltration de l'eau est fonction de sa profondeur, sa conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}), sa réserve utile (humidité à la capacité au champ (FC_{ly})). Au-delà de la zone racinaire, l'eau va s'infiltrer à travers les fentes puis au sein de la zone vadose pour ultimement recharger la nappe de surface et la nappe profonde. Les échanges verticaux se terminent dans le profil du sol lorsque l'eau atteint le système d'écoulement souterrain. (Neitsch *et al.*, 2005), résume le processus de percolation de l'eau à travers l'équation 2.

$$W_{perc} = (SW_{ly} - FC_{ly}) \times \left(1 - \left[\frac{-\Delta t}{TT_{perc}}\right]\right) \quad (2)$$

Avec :

W_{perc} = la quantité d'eau percolant les couches de sol sur le jour donné (mm) ;

SW_{ly} est le contenu d'eau dans le sol sur un jour donné (mm) ;

FC_{ly} correspond à la capacité au champ ;

Δt est le pas de temps (h) ;

TT_{perc} est la durée de la percolation (h).

➤ **Evapotranspiration**

Une partie de l'eau tombée après une pluie va encore retourner dans l'atmosphère. Ce retour de l'eau dans l'atmosphère se fait par évaporation de l'eau demeurée en surface, sur les toits, dans le réservoir du sol et par transpiration des végétaux (Neitsch *et al.*, 2002, 2005; Chaponnière, 2005). L'ensemble de ces processus de retour de l'eau est appelé évapotranspiration (ETP). Cette ETP est conditionnée par la demande évaporatoire de l'atmosphère et l'état hydrique du sol. Le modèle SWAT propose trois options pour calculer l'évapotranspiration potentielle (Biesbrouck *et al.*, 2002). Il s'agit des équations de Penman-Monteith, de Priestley-Taylor et de Hargreaves. L'utilisation de l'une de ces méthodes dans SWAT est fonction des données disponibles. Dans notre étude c'est l'équation Hargreaves (équation 3) qui a été utilisée. Celle-ci ne peut être appliquée que pour l'obtention des estimations moyennes mensuelles d'ETP (Chaponnière, 2005). Elle n'utilise que les valeurs de pluie et de température pour déduire l'ETP.

$$\lambda E_0 = 0.0023 \times H_0 \times (T_{mx} - T_{mn})^{0.5} \times (\bar{T}_{av} + 17.8) \quad (3)$$

λ correspond à la densité du flux de la chaleur latente de vaporisation (MJ/m².j) ;

E_0 , l'évaporation transpiration potentielle (ETP) (mm/j) ;

T_{mx} , T_{mn} et \bar{T}_{av} , les températures maximale, minimale et moyenne du jour (°C) ;

H_0 correspond au rayonnement incident (MJ/m².j).

➤ **Ruissellement de surface**

Le ruissellement de surface survient lorsque la quantité de pluie tombée à la surface terrestre dépasse le taux d'infiltration (Neitsch *et al.*, 2002). Il se produit lorsque les échanges verticaux sont satisfaits et que la précipitation perdure. Le modèle SWAT propose deux méthodes de calcul du ruissellement de surface qui sont la méthode de Green et Ampt et celle du Curve Number (CN) (Biesbrouck *et al.*, 2002). Dans notre étude, c'est l'équation du Curve Number (CN) qui a été sélectionnée car elle est une fonction dépendant de la perméabilité du sol, de l'occupation du sol et des conditions antérieures d'humidité du sol (Neitsch *et al.*, 2005). Elle calcule le ruissellement de surface en soustrayant aux précipitations, la lame d'eau infiltrée. (Neitsch *et al.*, 2005) ont défini des abaques du CN en fonction de la pluie, de la perméabilité du sol, de l'utilisation du sol et des conditions antérieures d'humidité. Ainsi, suivant la valeur du CN, le ruissellement de surface peut être déduit. Bien que le ruissellement de surface soit le moyen d'alimentation primaire des cours d'eau, le modèle inclut les ruissellements de

subsurface et les ruissellements souterrains de l'aquifère superficiel (débit de base) dans son calcul.

1.2.4.2 Phase aquatique du modèle SWAT

Une fois la phase hydrologique (débit d'eau) terminée, SWAT va entamer la phase aquatique. Cette phase consiste à la détermination des charges de sédiments, de nutriments, de pesticides et de bactéries acheminées et transformées depuis leur entrée dans le réseau jusqu'à l'exutoire du bassin (Salou, 2009). Outre la conservation du débit massique de ces éléments, SWAT modélise tous les processus de leur transformation lors de leur acheminement dans l'eau. En effet, ces polluants exportés vont être remis en suspension, déposés, dégradés, dilués ou diffusés dans le milieu aquatique (Michaud *et al.*, 2006; Rollo, 2012). Le transport des sédiments qui intègre les processus de dépôt et de remise en suspension est déterminé par la puissance de l'écoulement. SWAT utilise l'équation universelle de perte de sol modifiée « Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) » pour le calcul de l'érosion générée sur le territoire (Arnold *et al.*, 1998). Ainsi, pour simuler l'écoulement des sédiments, SWAT simule d'abord l'érosion des berges et ensuite du lit qui concourent à l'accroissement du stock sédimentaire du canal de dérivation.

Conclusion partielle

Le bassin versant de la Lobo à Nibéhibé est caractérisé par un climat de type équatorial de transition atténuée avec deux saisons. Une saison pluvieuse de mars à novembre et une saison sèche de décembre à février avec une faible variation de température. Le relief du bassin est composé de plaines et de plateaux dont l'altitude varie entre 160 m et 480 m. Le patrimoine forestier s'est progressivement dégradé au cours de ces dernières années. La forêt dégradée est de plus en plus l'élément dominant de cette végétation, à cause de l'exploitation agricole. Les formations géologiques appartiennent principalement au socle précambrien (précambrien moyen) dominées par deux entités géologiques ; à savoir les roches magmatiques et les roches métamorphiques. La population du bassin de la Lobo est majoritairement rurale et agricole.

A l'heure actuelle, la modélisation hydrologique est largement utilisée pour l'évaluation des potentialités en eau dans la mesure où elle permet une réduction de la complexité du phénomène naturelle. Le modèle agro-hydrologique SWAT utilisé dans cette étude est un modèle semi-distribué, à base-physique qui fonctionne avec un pas de temps continu. L'utilisation du modèle

GENERALITES

SWAT dans cette étude consistera à cartographier les zones favorables à la recharge des nappes souterraines. SWAT dans son exécution, subdivise la modélisation hydrologique du bassin en deux phases à savoir terrestre et aquatique. La partie suivante sera consacrée aux matériels et méthodes utilisés pour atteindre nos objectifs.

PARTIE 2 : MATERIEL ET METHODES

2.1 Matériel

2.1.1 Données de l'étude

Les données utilisées dans cette étude se composent de données ponctuelles et de données spatiales.

2.1.1.1 Données ponctuelles

➤ Données climatiques

Les données climatiques se composent de la pluviométrie (mm) et de la température (°C) au pas de temps journalier. Ces données ont été fournies par la SODEXAM. Elles concernent (4) quatre stations réparties sur le bassin de la Lobo et couvrent les périodes de 2000 à 2017. Il s'agit des stations de Daloa, Vavoua, Pélézi et Séguéla.

➤ Données hydrométriques

Les données hydrométriques se composent des débits journaliers collectés sur la station de Nibehibé. Elles ont été obtenues auprès de la Direction Générale de l'Office Nationale de l'Eau Potable (ONEP). Ces données couvrent les périodes de 1961 à 2013.

➤ Caractéristiques physico-chimiques du sol

Les données correspondantes aux différentes couches de sol du bassin de la Lobo ont été obtenues grâce aux études réalisées par Reynolds *et al.* (1999). Elles correspondent aux propriétés physico-chimiques de 5 000 types de sols de toute l'Afrique pris à des profondeurs allant de 0 à 100 cm.

2.1.1.2 Données spatiales

Les données spatiales comprennent :

- la carte pédologique de toute l'Afrique établie par la FAO en 1995. Elle prend en compte 5 000 types de sols avec une résolution de 10 km.
- Le Model Numérique d'Altitude (MNA) utilisé dans cette étude a une résolution de 90 m. Elles ont été acquises gratuitement via le site américain «<ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version4/SRTM3/Africa> ».
- La carte d'occupation du sol du bassin de la Lobo. Elle a été établie à l'aide des images Landsat 7 téléchargées sur le site : «<https://earthexplorer.usgs.gov/>».

MATERIEL ET METHODES

- La carte des fractures réalisée par le Laboratoire LSTE sur le bassin de Lobo dans le cadre du projet .

2.2.1 Matériel de gestion et d'acquisition des données

Le matériel de gestion et d'acquisition des données utilisé est composé de :

- Un Global Position System (GPS) pour déterminer les coordonnées géographiques de la station hydrométrique.

2.2.2 Matériel de traitement des données

Le matériel de traitement des données utilisé dans cette étude se compose essentiellement de logiciels. Ces logiciels sont :

- ArcGIS 10.0 de ESRI et son extension ARCSWAT pour la réalisation des cartes thématiques.
- SWAT-CUP version 2012 de l'EAWAG, pour la calibration, l'analyse des incertitudes et la validation du projet de modélisation.
- Envi 4.7 pour le traitement numérique des images satellitaires.
- Excel, Access de Microsoft Office 2013 pour la saisie et le traitement statistique des données.

2.2 Méthodes

2.2.1 Détermination des paramètres du modèle

La mise en place du modèle SWAT sur notre bassin nécessite au préalable une adaptation des données physiographiques standardisées pour l'ensemble du territoire américain. De nombreuses valeurs sont définies par défaut pour des conditions américaines, mais un grand nombre d'entre elles devront être adaptées au contexte du bassin de la Lobo. Il s'agit dès lors d'ajouter ou d'ajuster certains paramètres du code source du modèle aux réalités de la Côte d'Ivoire en général et du bassin de la Lobo en particulier.

2.2.1.1 Correction des données climatiques

Le modèle SWAT requiert pour son fonctionnement, des données journalières de précipitation, de température maximale et minimale, de radiation solaire, d'humidité relative et de vitesse du vent. Dans notre étude ce sont les données journalières de précipitation et de température maximale et minimale qui ont pu être collectées pour la mise en place du modèle. Ces données contenant souvent des lacunes (erreurs ou absence), un programme a été intégré dans SWAT

MATERIEL ET METHODES

afin de corriger ces erreurs. Ce programme, Weather GENerator (WGEN) (Sharpley & Williams, 1990), une fois renseigné, permettra de générer les données climatiques ou de remplir les données manquantes.

2.2.1.2 Base de données de sol

À l'instar des données climatiques, le modèle SWAT intègre dans son calcul, les propriétés physico-chimiques du sol. Suivant le logiciel SIG utilisé, le modèle SWAT permet qu'un certain nombre de couches de sol lui soit intégrées. Dans notre étude, c'est le logiciel ArcGIS qui a été associé ce qui nous a permis de renseigner jusqu'à 25 couches. Une fois la mise à jour des données brutes aux conditions locales achevée, le modèle est prêt pour l'exécution. Toutes les cartes à intégrer au modèle ont été rastérisées et projetées dans le repère UTM-WGS 84, zone 30 de l'hémisphère Nord.

2.2.2 Exécution du modèle

La modélisation des flux d'eau requiert l'introduction d'un certain nombre de données. Ces données incluant par ordre d'introduction la topographie, l'occupation du sol, la pédologie et la climatologie seront superposées dans le modèle SWAT. La mise en place du projet de modélisation implique qu'une procédure soit suivie. Dans le cadre de notre étude, la procédure mise en place est décrite en sept (07) grandes étapes.

2.2.2.1 Délimitation des sous-bassins

Le matériel utilisé par le modèle pour délimiter les sous-bassins est le modèle numérique d'altitude (MNA). À partir du MNA, SWAT utilisera l'algorithme D8 pour délimiter le bassin versant (Jenson, 1991 *in* Anoh, 2014). Plusieurs processus interviennent avant l'obtention du bassin versant. Ces dernières peuvent être regroupées en quatre (04) étapes :

Prétraitement du MNA : le MNA pouvant contenir des imperfections, telles que les puits qui faussent la détermination du réseau hydrographique, SWAT permet au modélisateur de corriger ce dernier. Ainsi, dans la phase de prétraitement, le modèle procède au comblement des points bas et au calcul des pentes. Cette correction s'est faite à partir du réseau hydrographique de la Côte d'Ivoire numérisé par le BNETD.

Extraction du réseau hydrographique : après prétraitement du MNA, le modèle va déterminer la direction et l'accumulation de l'écoulement. Celles-ci seront utilisées pour l'extraction du réseau hydrographique et des limites des sous bassins. Il est très important pour

MATERIEL ET METHODES

le modélisateur de définir une aire seuil d'apparition ou une surface critique drainée. Moins la valeur du seuil d'apparition est élevée et plus le réseau hydrographique est détaillé. Selon les limites inférieures et supérieures de l'aire des sous bassins proposés par le modèle, nous avons fixé la surface critique drainée à 200 km².

Définition des exutoires des sous bassins : à chaque intersection de portion de cours d'eau, le modèle a placé un exutoire potentiel et par conséquent délimité le sous bassin lui correspondant. Le modèle a par ailleurs considéré que toutes nos stations d'observation correspondaient à un exutoire et donc un sous bassin. Le modèle permet l'intégration des réservoirs. Toutefois cette option n'a pas été prise en compte dans cette étude. Par conséquent, il a extrait cent cinquante-huit (158) sous bassins avec leur plus long cours d'eau.

Délimitation du bassin versant. Pour délimiter le bassin versant, le modèle exige que le modélisateur choisisse un exutoire. Dans le cadre de notre étude, c'est la station de Nibehibé qui a été choisie. Après délimitation du bassin versant correspondant à l'exutoire par l'outil « Spatial Analyst » d'ArcGIS, le modèle va calculer les paramètres géomorphologiques de chaque sous bassin. Le bassin de la Lobo a respectivement 610 et 19 m pour élévation maximale et minimale. La moyenne des élévations est de 255,38 m.

2.2.2.2 Intégration de la carte d'occupation du sol

Pour évaluer l'influence des aménagements du territoire sur la qualité des flux d'eau, il est impératif de caractériser les différents usages du sol. C'est dans cette logique que SWAT a été conçu avec une fonction agronomique incluant différents fichiers lui correspondant. La carte d'occupation du sol du bassin de la Lobo au format raster a été chargée au modèle à ce niveau.

2.2.2.3 Intégration de la carte pédologique

Tout comme la carte d'occupation du sol, la carte pédologique est la dernière donnée raster à être introduite au modèle. Une fois l'option d'affichage de cette carte exprimée (cette option peut-être le nom du sol, le numéro du sol dominant dans le triangle texturale de l'USDA ou le code de l'Etat), le modèle va établir une liaison entre les types de sols et ses caractéristiques physicochimiques existantes dans sa base de données.

2.2.2.4 Discrétisation des Unités de Réponse Hydrologique (URH)

L'unité spatiale de base utilisée pour les calculs dans le modèle SWAT est l'URH. Elle est le résultat de la combinaison de trois éléments (occupation du sol, pédologie et pente) unique dans

MATERIEL ET METHODES

les sous bassins obtenus précédemment. Le travail accompli ici, a consisté à choisir le critère de répartition des URH. Afin d'augmenter la précision du modèle et réduire le temps des simulations, l'option maximum de URH a été choisie.

2.2.2.5 Intégration des données météorologiques

Les données météorologiques sont indispensables pour toute modélisation hydrologique car elles régulent le cycle hydrologique. Elles sont ainsi, les dernières données d'entrée à inclure dans le modèle SWAT de Lobo. Ces données climatiques nécessaires au fonctionnement de SWAT sont représentées par six fichiers. Elles se composent de la table WGN et des données journalières de la pluie, de la température, de l'humidité relative, du rayonnement solaire et de la vitesse du vent. Les trois premiers sont indispensables à la mise en place du projet de modélisation. Quant aux trois autres, elles sont facultatives et dépendent de la formule choisie pour le calcul de l'évapotranspiration. Avant toute intégration, SWAT impose un préalable quant à la lecture des dates. Ainsi, la formulation de nos dates a été mise dans le système anglais (mois/jour/année).

2.2.2.6 Création des tables d'entrée par le modèle

La création des tables de la base de données consiste à la récapitulation des fichiers des caractéristiques physico-chimiques du bassin versant, des sous bassins, des URH, des chenaux d'écoulement, des nappes souterraines (recharge des eaux souterraines), des sols, de la météo, de l'usage de l'eau et des pratiques culturales. Ces tables incluant les informations pour générer les entrées par défaut dans SWAT, une mise à jour a été faite. Une fois ces données mises à jour, les derniers réglages introduits au modèle ont consisté à définir le mode de calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP), du débit hydrologique et du ruissellement. L'ETP a été définie selon l'équation de Hargreaves, le débit d'eau par la méthode de stockage variable et le ruissellement par la méthode du CN. Il est par ailleurs important de noter que chaque fois qu'un fichier est modifié dans n'importe quelle étape de la modélisation, une recreation des fichiers d'entrées est impérative. Autrement, le modèle ne va tenir compte que de la version antérieure des fichiers entrés.

2.2.2.7 Simulations

L'onglet d'exécution des simulations comporte plusieurs sections qui permettent de configurer les conditions limites des simulations. Ainsi :

MATERIEL ET METHODES

- la première section consiste à borner les dates de début et de fin de la simulation. Suivant la série des données climatiques et hydrométriques disponible sur le bassin de Lobo, elle a été bornée en 2009 pour le début et en 2013 pour la fin de la simulation ;
- la seconde section concerne le pas de temps des précipitations. Elle a été mise au pas de temps journalier ;
- la troisième section propose le choix entre la distribution asymétrique et la distribution exponentielle des précipitations. La distribution exponentielle fournie en alternative à la distribution asymétrique requiert moins d'entrée et est communément utilisée dans les régions où les précipitations sont disponibles (Biesbrouck *et al.*, 2002). Comme tous les sous bassins ne disposaient pas de stations, nous avons opté pour la distribution asymétrique des précipitations ;
- la quatrième section est le domaine de définition du pas de temps de la restitution des résultats et de la durée du réchauffement. Suivant la chronologie des données observées, le modèle offre le choix entre les pas de temps horaire, journalier, mensuel et annuel pour les simulations. Les mesures effectuées sur le bassin étant journalières, nous avons opté pour le pas de temps journalier. Concernant la durée du réchauffement, elle est requise par le modèle afin de bien restituer les données observées. Elle a été fixée à (01) un an. La figure 4 résume l'ensemble des opérations et fichiers nécessaires à l'exécution des simulations dans le modèle SWAT.

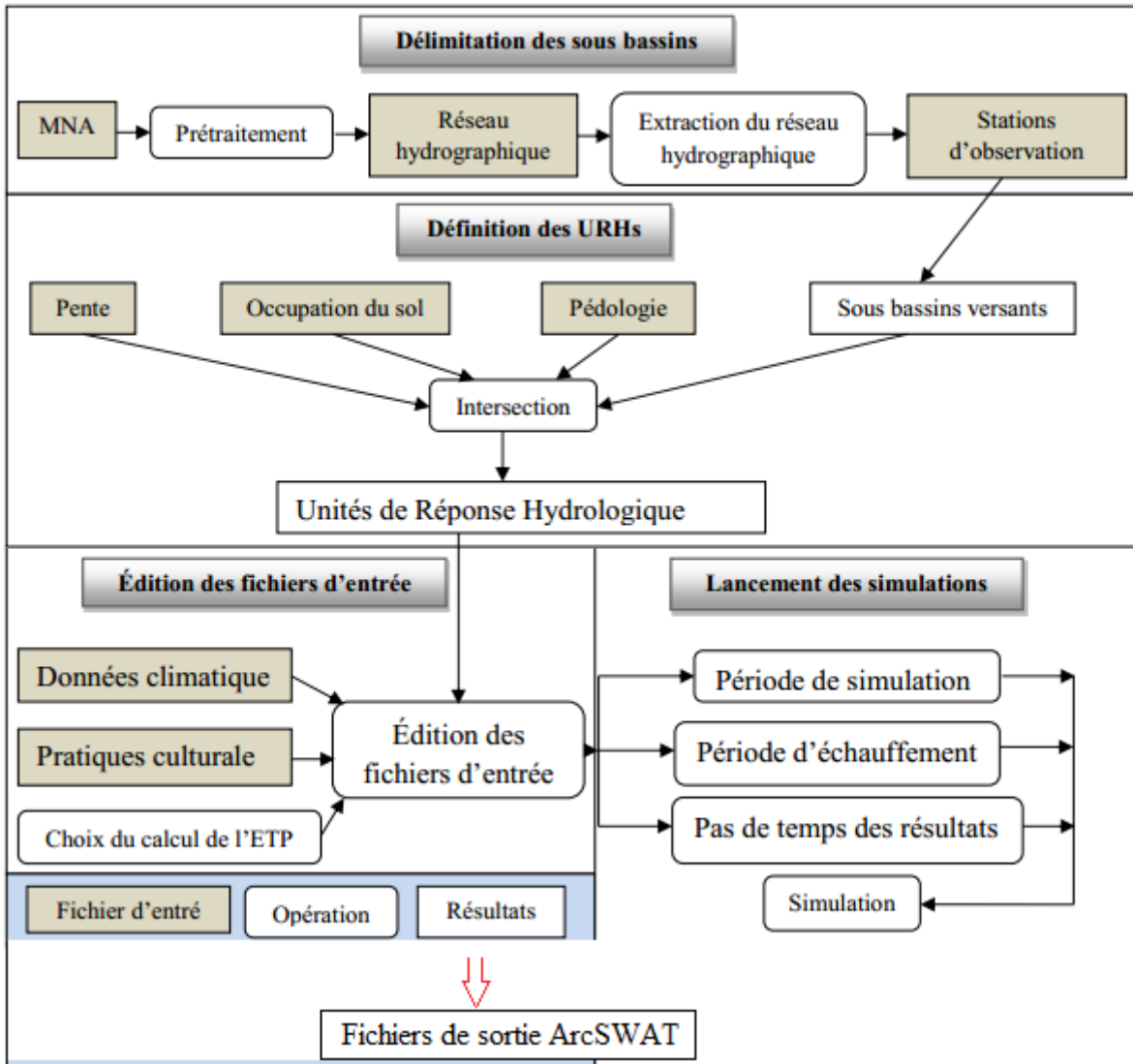


Figure 4: Procédure d'implémentation du modèle SWAT.

2.2.3 Evaluation de la performance du modèle

Quel que soit le mode de paramétrage d'un modèle, il nécessite une évaluation de sa performance. Elle consiste à étudier statistiquement et graphiquement la différence entre les données observées et simulées par le modèle. Elle repose sur la calibration et la validation. Toutefois, ces phases nécessitent de procéder à une étape préliminaire.

2.2.3.1 Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité est l'opération qui consiste à cibler les paramètres qui influencent le plus la performance du modèle. Elle permet de réduire le nombre de paramètres (au total 13 paramètres) à inclure dans la calibration pour réduire les efforts et le temps requis pour converger vers la performance du modèle. Le choix des paramètres à inclure dans le modèle doit être basé sur la littérature. Les paramètres ainsi sélectionnés feront l'objet d'une analyse

individuelle (one-factor-at-the-time) sur l'évolution de la courbe de l'hypercube-latin (latin-hypercube (LH)) dans l'algorithme SUFI2 (Schuol *et al.*, 2008). Le principe consiste à lancer dans l'algorithme SUFI2, une simulation d'au moins 3 itérations avec un paramètre. De la variation de la courbe (latin-hypercube) suivant les différentes valeurs du même paramètre va découler la sensibilité du paramètre. Plus la variation de la valeur des sorties est grande et plus le paramètre est sensible ; autrement il sera retiré de la liste des paramètres à inclure dans la calibration/validation. Pour sélectionner nos paramètres jugés sensible, nous nous sommes basés sur les études antérieures avec le modèle en milieu tropical de (Anoh, 2014) et de (Koua, 2014)

2.2.3.2 Fonction-objectif

La fonction-objectif est un indicateur de la performance du modèle. Elle permet de mieux apprécier la différence entre les valeurs observées et simulées. Elle peut être unique ou multiple. L'algorithme SUFI2 de SWATCUP propose 7 fonctions-objectifs qui peuvent être utilisés. Ils se composent du coefficient de Nash-Sutcliffe « **NS** », des coefficients de détermination « **R²** », « **SSQR** », « **br2** » et « **Chi2** », de la somme « **Sum** » et de la multiplication « **Mult** » de l'erreur au carré. Dans l'étude de la modélisation agro-hydrologique du bassin de la Lobo, nous avons opté pour l'option multifonctions objectives. Ainsi, le coefficient de **NS** (Équation 4) et de détermination **R²** (Équation 5), ont retenu notre attention car ils offrent une évaluation plus précise de l'efficacité du modèle quant au respect des volumes écoulés et des écarts absolus (Bioteau *et al.*, 2002).

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1} (Q_m - \bar{Q}_s)^2}{\sum_{i=1} (Q_m - \bar{Q}_m)^2} \quad (4)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1} (Q_m - \bar{Q}_m)(Q_s - \bar{Q}_s)]^2}{\sum_{i=1} (Q_m - \bar{Q}_m)^2 \sum_{i=1} (Q_s - \bar{Q}_s)^2} \quad (5)$$

Avec Q_m = débit observé,

Q_s = débit simulé,

\bar{Q}_m = moyenne des débits mesurés,

\bar{Q}_s = moyenne des débits simulés.

Le coefficient de NS représente la partie de la variance expliquée par le modèle, le résidu étant la différence entre la valeur observée et la valeur simulée (Patoul, 2008). Il peut varier de $-\infty$ (pour un ajustement très mauvais) à 1 (pour une forte liaison entre les valeurs observées et simulées). Pour donner un ordre de grandeur, des valeurs dépassant 0,65 sont considérées

comme admissibles et 0,75 satisfaisantes (Thiebault, 2010). Le coefficient de détermination R^2 correspond au carré du coefficient de corrélation qui concerne l'intensité ou la netteté de la relation qui existe entre deux séries d'observations. Son intervalle de prédiction s'étend de 0 à 1 pour un modèle parfait. Une valeur de R^2 supérieure à 0,5 traduirait une bonne concordance des données observées et simulées (Santhi *et al.*, 2001).

2.2.4 Calibration du modèle SWAT

La calibration du modèle SWAT a visé une optimisation de sa capacité prédictive en confrontant ses prédictions avec les mesures réelles. Le nombre d'itération requis pour calibrer le modèle SUFI2 dans SWAT-CUP a été fixé à 400 itérations. Aussi, la période de 2010 à 2012 a servi pour la calibration.

2.2.5 Validation du modèle SWAT

La validation permet d'évaluer si le modèle a bien été calé à travers l'usage de périodes dont les conditions climatiques diffèrent de celles de la période de calage (figure5). Une fois la calibration du modèle SUFI2 effectuée, la validation a été faite. Le principe consiste à inclure dans le modèle, la période de validation et les valeurs des paramètres calés. Une seule (01) itération est requise pour la validation du modèle. La période 2013 a été utilisée pour la validation.

Les résultats de la modélisation présentés à la figure 5 sont la recharge et les courbes de la calibration et la validation.

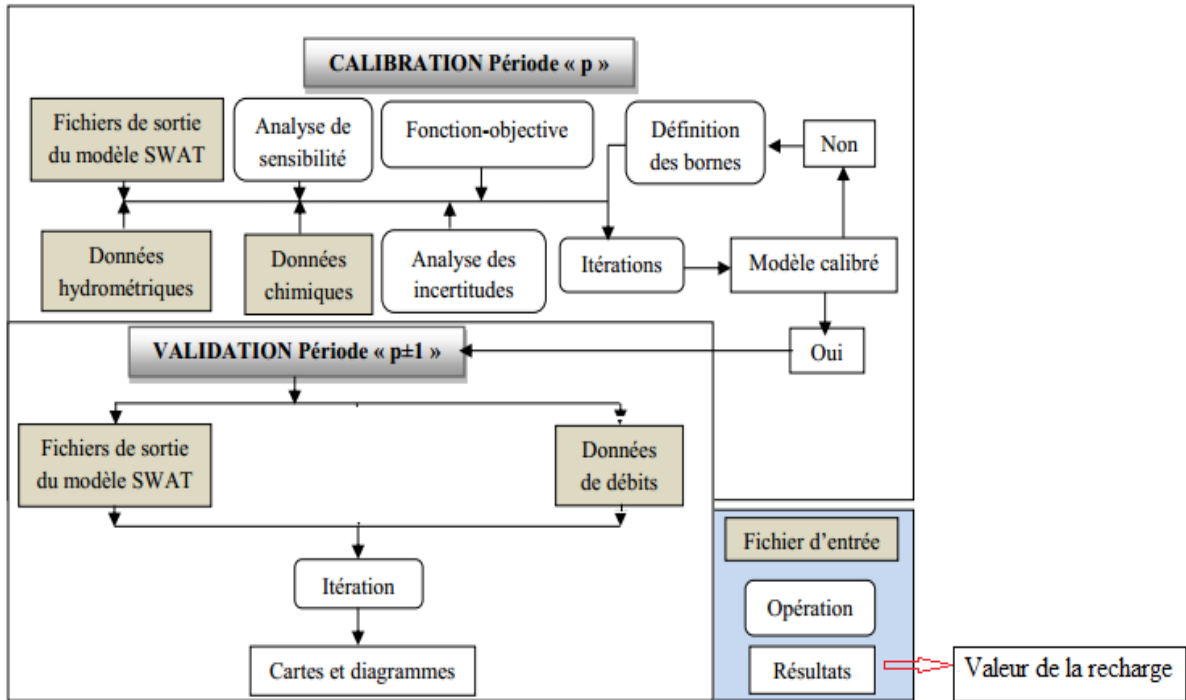


Figure 5: Procédure d'implémentation du modèle SUFI2.

Conclusion partielle

Les données utilisées dans cette étude sont de deux types. Il s'agit des données ponctuelle et les données spatiales. Les données ponctuelles regroupent les données climatiques hydrométriques et les données physico-chimiques du sol. En ce qui concerne les données climatiques, il s'agit de la pluviométrie et la température au pas de temps journaliers sur la période de 2000 à 2017. Les données hydrométriques sont les débits de la station de Nibéhibé. Quant aux caractéristiques physico-chimiques, elles regroupent les propriétés de 5000 type de sols. Les secondes données comprennent la carte pédologique de toute l'Afrique, le Model Numérique d'Altitude (MNA) et la carte d'occupation du sol du bassin.

L'analyse de ces données a été effectuée sur les logiciels à travers des méthodes bien structurées.

Tout d'abord la mise en place du modèle sur le bassin de la Lobo. Ensuite, la détermination des paramètres du modèle à travers l'extension ArcSwat du logiciel ArcGis. Enfin, l'évaluation de la performance du modèle à travers l'algorithme SUFI2 du logiciel SWAT-CUP. Cette dernière étape a abouti à la calibration, la validation et comme résultat de la modélisation la détermination de la carte des zones de recharge du bassin et les courbe de calibration et de validation.

PARTIE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Résultats

3.1.1 Paramètres du modèle SWAT

3.1.1.1 Analyse de sensibilité

Le résultat de l'analyse de sensibilité permettant de juger les paramètres qui influencent les sorties du modèle montre 13 paramètres (Tableau I). Ces paramètres obtenus ont été analysés sur une liste de 19 paramètres sélectionnés dans la littérature basée sur l'utilisation du modèle en zone tropicale humide. La valeur des différents paramètres est obtenue par une opération. Celle-ci est indiquée dans le tableau par : r_ (replace) et v_ (value). Le r_ signifie que la valeur du paramètre est multipliée par (1 + une valeur donnée). Quant au v_ il montre que la valeur du paramètre est remplacée par la valeur donnée.

RESULTATS ET DISCUSSION

Tableau I: Paramètres de sensibilité du model SWAT sur le bassin Lobo

N°	Paramètres	valeurs d'entrées	valeurs de sorties	Définition
1	r_CN2.mgt	-0,6 0,6	-0,577 0,213	Numéro de la courbe de ruissellement du SCS f
2	r_SOL AWC(1).sol	-0,4 0,4	-0,756 0,646	Capacité en eau disponible de la couche du sol
3	v_ALPHA_BF.gw	0,0 1,0	1,073	Facteur alpha du flux de base (jours)
4	r_CH_N1.sub	0,0 20,0	9,685 15,951	La valeur "n" de Manning pour les canaux tributaires.
5	v_CH_K1.sub	0,0 150,0	113,838	Conductivité hydraulique effective dans les alluvions des chenaux tributaires
6	v_CH_K2.rte	15,0 450,0	184,747	La valeur "n" de Manning pour le canal principal.
7	v_GWQMN.gw	0,0 2,0	2,401	Profondeur seuil de l'eau dans l'aquifère peu profond nécessaire pour qu'il y ait un retour d'eau (mm)
8	v_CH_N2.rte	0,0 0,3	0,164	Conductivité hydraulique effective dans les alluvions du canal principal.
9	v_ESCO.hru	0,0 1,0	1,657	Facteur de compensation de l'évaporation du sol.
10	v_GW_DELAY.gw	30,0 450,0	55,558	Retard de la nappe phréatique (jours)
11	v_RCHRG_DP.gw	0,0 1,0	0,746	Fraction de percolation des aquifères profonds.
12	v_CH_L2.rte	0,0 450,0	282,087	Longueur du canal principal.
13	v_EPCO.hru	0,0 1,0	0,52	Facteur de compensation de l'absorption des plantes.

Valeurs d'entrées : Intervalle adopté pour l'analyse de sensibilité.

Valeurs de sorties : Valeur adoptée pour la calibration.

RESULTATS ET DISCUSSION

(.rte) : fichier qui englobe les paramètres représentant les caractéristiques physiques du cours d'eau.

(.gw) : fichier qui englobe les paramètres représentant les caractéristiques de la nappe.

(.bsn) : fichier qui définit les attributs général du bassin.

(.sol) : fichier qui englobe les paramètres représentant les caractéristiques du sol.

(.hru) : fichier qui englobe les paramètres représentant les caractéristiques des unités de réponse hydrologique.

(.sub) : fichier qui englobe les paramètres représentant les caractéristiques du sous bassin.

3.1.1.2 Calibration

Deux simulations de 400 itérations chacune ont permis de calibrer le modèle SWAT de Lobo. L'arrêt des itérations a été dicté par les valeurs de P-facteur et de R-facteur. Quant aux coefficients NS et R^2 , ils ont permis de juger l'adéquation entre les données de la simulation et la calibration. Les résultats de l'analyse statistique des valeurs de la calibration donnent de bons résultats pour le coefficient de détermination, les critères d'efficacité et de performance de Nash-Sutcliffe ainsi que les deux facteurs pour l'étalonnage des données mesurées (Tableau II).

Tableau II: Paramètres évaluant la performance de la calibration

Sous bassin	P-facteur	R-facteur	R^2	NS
158	0,9	1,41	0,73	0,72

Le résultat graphique (Figure 6) présente la courbe des débits simulés et des débits observés de la période de calibration (2010 à 2012). L'analyse montre que les courbes ont la même allure. Cela revient à dire qu'au niveau de la calibration, le modèle a correctement reproduit les débits observés et simulés. De même, la valeur seuil de débits observés et simulés est enregistrée entre septembre 2010 et octobre 2010.

RESULTATS ET DISCUSSION

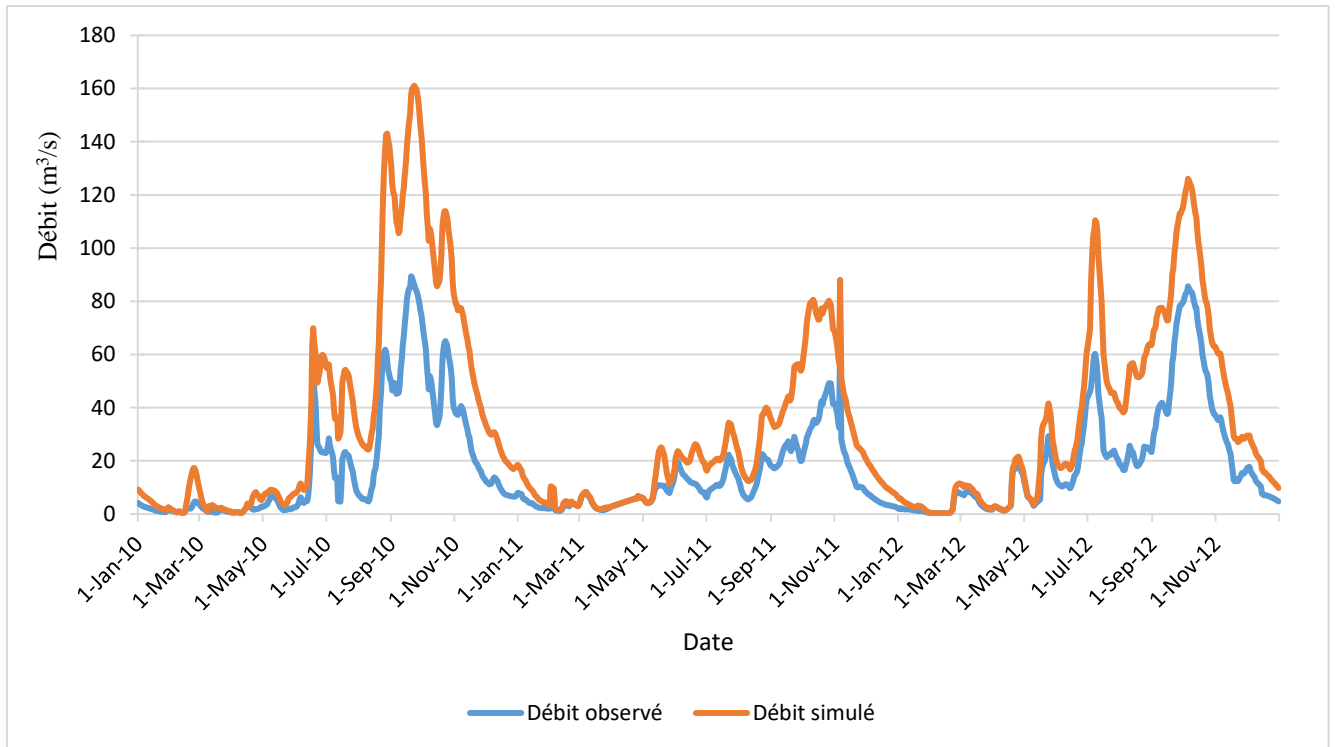


Figure 6: Courbe comparatif des débits simulés et observés à la période de calibration

3.1.1.3 Validation

Après avoir édité les fichiers d'entrées et conservé les valeurs des paramètres de la dernière simulation, l'algorithme SUFI2 a permis d'obtenir les valeurs statistiques suivantes (Tableau III).

Tableau III: Paramètres évaluant la performance de la validation

Sous bassin	P-facteur	R-facteur	R ²	NS
158	0,83	5,62	0,19	0,17

L'analyse statistique des résultats de la validation donne des valeurs satisfaisantes quant aux P-facteur et R-facteur. Pour ce qui est du R² et NS ces valeurs traduisent un mauvais ajustement. En effet, les incertitudes ont été beaucoup ressenties au niveau de la performance du modèle à la validation.

RESULTATS ET DISCUSSION

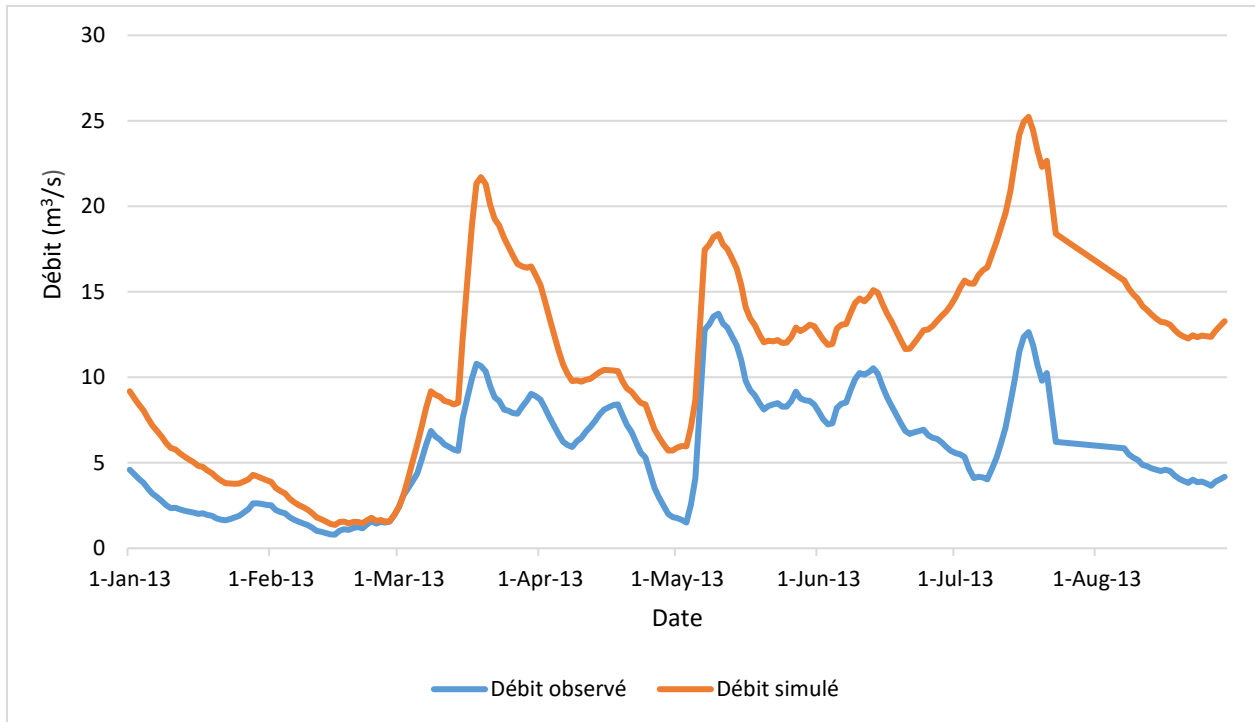


Figure 7: Courbe comparative des débits simulés et observés à la période de validation

Le résultat graphique (Figure 7) présente la courbe des débits simulés et des débits observés de la période de validation (janvier 2013 à août 2013). L'analyse montre que les courbes ont la même allure, par contre, l'écart entre les débits observés et simulés est majeur à l'étape de la validation. Cela traduit, la surestimation des débits simulés par le modèle SWAT.

3.1.2 Estimation de la valeur de la recharge dans chaque unité de réponse hydrologique

RESULTATS ET DISCUSSION

Tableau IV: la valeur de la recharge par HRU

HRU	Valeur de la recharge (mm/mois)	HRU	Valeur de la recharge (mm/mois)
HRU 1	0,53	HRU 29	0,00581
HRU 2	0,511	HRU 30	0,00619
HRU 3	0,233	HRU 31	0,536
HRU 4	0,528	HRU 32	0,0069
HRU 5	0,549	HRU 33	0,245
HRU 6	0,566	HRU 34	0,256
HRU 7	0,542	HRU 35	0,00434
HRU 8	0,548	HRU 36	0,00521
HRU 9	0,495	HRU 37	0,005
HRU 10	0,463	HRU 38	0,00524
HRU 11	0,516	HRU 39	0,561
HRU 12	0,551	HRU 40	0,552
HRU 13	0,25	HRU 41	0,566
HRU 14	0,4	HRU 42	0,535
HRU 15	0,00536	HRU 43	0,00568
HRU 16	0,248	HRU 44	0,00641
HRU 17	0,00447	HRU 45	0,563
HRU 18	0,00651	HRU 46	0,313
HRU 19	0,564	HRU 47	0,247
HRU 20	0,398	HRU 48	0,557
HRU 21	0,00524	HRU 49	0,515
HRU 22	0,00602	HRU 50	0,563
HRU 23	0,55	HRU 51	0,00636
HRU 24	0,55	HRU 52	0,00548
HRU 25	0,0078	HRU 53	0,00343
HRU 26	0,00475	HRU 54	0,00453
HRU 27	0,494	HRU 55	0,0039
HRU 28	0,00695	HRU 56	0,00259
HRU 57	0,00299	HRU 86	0,24

RESULTATS ET DISCUSSION

HRU 58	0,00327	HRU 87	0,00232
HRU 59	0,243	HRU 88	0,00162
HRU 60	0,245	HRU 89	0,132
HRU 61	0,564	HRU 90	0,12
HRU 62	0,558	HRU 91	0,26
HRU 63	0,242	HRU 92	0,133
HRU 64	0,00509	HRU 93	0,00155
HRU 65	0,412	HRU 94	0,00145
HRU 66	0,00349	HRU 95	0,00194
HRU 67	0,564	HRU 96	0,235
HRU 68	0,54	HRU 97	0,266
HRU 69	0,00289	HRU 98	0,455
HRU 70	0,00301	HRU 99	0,00178
HRU 71	0,408	HRU 100	0,24
HRU 72	0,415	HRU 101	0,00178
HRU 73	0,00342	HRU 102	0,00192
HRU 74	0,00338	HRU 103	0,123
HRU 75	0,567	HRU 104	0,00164
HRU 76	0,215	HRU 105	0,463
HRU 77	0,539	HRU 106	0,378
HRU 78	0,00554	HRU 107	0,00148
HRU 79	0,00307	HRU 108	0,0177
HRU 80	0,00351	HRU 109	0,0175
HRU 81	0,00162	HRU 110	0,018
HRU 82	0,00268	HRU 111	0,0175
HRU 83	0,242	HRU 112	0,018
HRU 84	0,00336	HRU 113	0,0175
HRU 85	0,00389	HRU 114	0,0173
HRU 115	0,136	HRU 137	0,0177
HRU 116	0,00126	HRU 138	0,0181
HRU 117	0,0172	HRU 139	0,0188
HRU 118	0,497	HRU 140	0,0686
HRU 119	0,019	HRU 141	0,0189

RESULTATS ET DISCUSSION

HRU 120	0,0198	HRU 142	0,0191
HRU 121	0,0196	HRU 143	0,018
HRU 122	0,0807	HRU 144	0,0185
HRU 123	0,095	HRU 145	0,018
HRU 124	0,0176	HRU 146	0,0165
HRU 125	0,0188	HRU 147	0,0184
HRU 126	0,0191	HRU 148	0,0186
HRU 127	0,0697	HRU 149	0,501
HRU 128	0,0952	HRU 150	0,0182
HRU 129	0,0512	HRU 151	0,0178
HRU 130	0,0649	HRU 152	0,0173
HRU 131	0,0643	HRU 153	0,0196
HRU 132	0,37	HRU 154	0,0201
HRU 133	0,412	HRU 155	0,018
HRU 134	0,0166	HRU 156	0,0184
HRU 135	0,0177	HRU 157	0,0192
HRU 136	0,0167	HRU 158	0,0186
Recharge mensuelle du bassin Lobo		27, 66712 mm/mois	
Recharge annuelle du bassin Lobo		332,00544 mm/an	

3.1.3 Cartographie des zones de recharge

La carte de la répartition spatiale de la recharge d'eau de l'aquifère souterrain est représentée par la figure 8. Elle correspond aux valeurs moyennes de la recharge en eau des URH de chaque sous bassin. L'analyse de cette carte montre de faibles flux verticaux d'eau sur la majeure partie du bassin de la Lobo. La recharge maximale d'eau au niveau du bassin est de 0,56 mm par mois et observée dans la localité de Seitifla. Les plus faibles recharges sont enregistrées au niveau des localités de Daloa, Vavoua, Bediala, Zahibo avec des flux verticaux d'eau allant de 0,028 à 0,075 mm par mois.

RESULTATS ET DISCUSSION

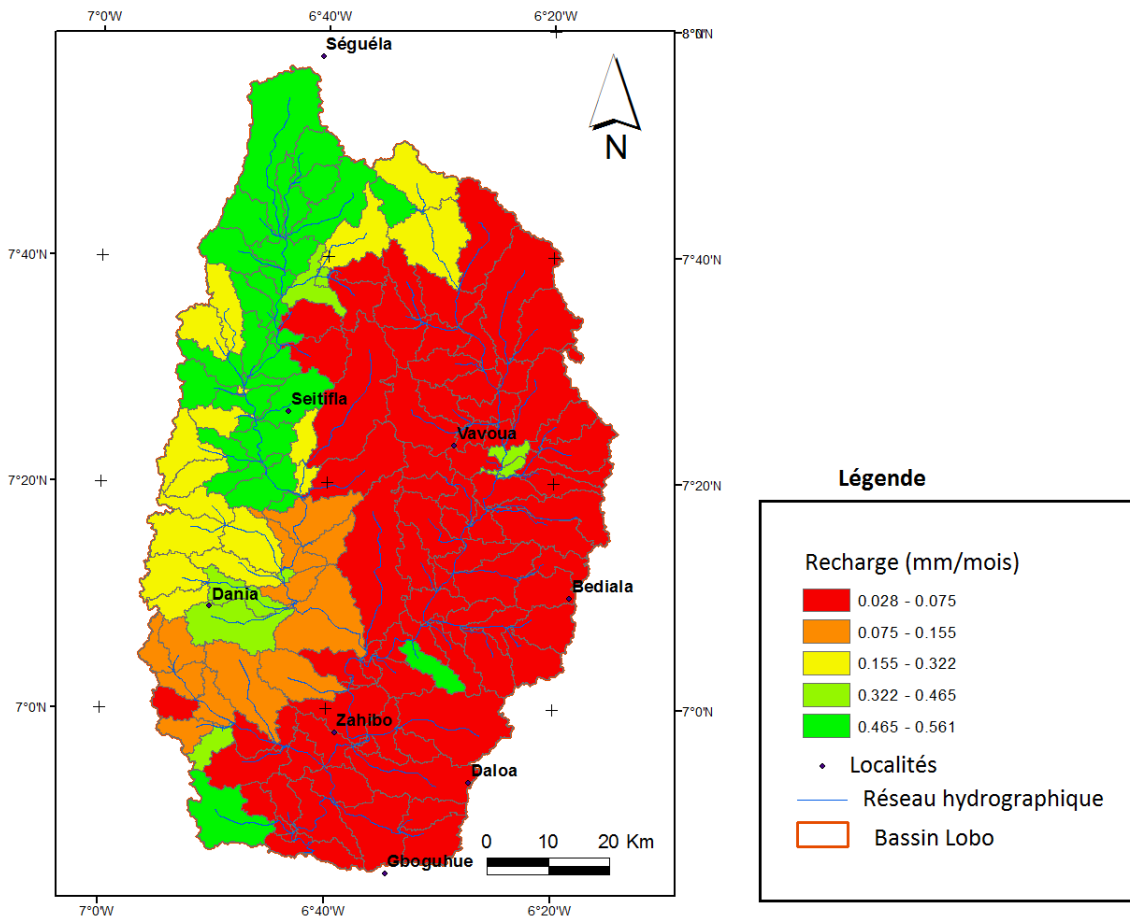


Figure 8: Carte des zones de recharge du bassin

La répartition spatiale des zones de recharge peut être caractérisée en cinq classes :

- la zone de très faible recharge de 0,028 à 0,075 mm/mois. Elle couvre la totalité du bassin avec les localités de Vavoua, Daloa, Zahibo, Bediala et Gboguhué ;
- la zone de faible recharge de 0,075 à 0,155 mm/ mois couvrant les parties centre et Centre-ouest du bassin ;
- la zone de recharge moyenne de 0,155 à 0,322 mm/mois couvrant l'Ouest et la petite partie Sud du bassin ;
- la zone de bonne recharge de 0,322 à 0,465 mm/mois répartie sur la localité de Dania et au Centre-est près de la localité de Vavoua.
- La zone de forte recharge de 0,465 à 0,561 mm/mois partant de la localité de Seitifla jusqu'au Nord-ouest du bassin vers la localité de Séguéla.

3.1.4 Validation de la carte de recharge des nappes

La répartition spatiale des zones de recharge en eau, des linéaments et des forages implantés est présentée à la figure suivante. Cette représentation a été obtenue après superposition des cartes précédentes (figure 9).

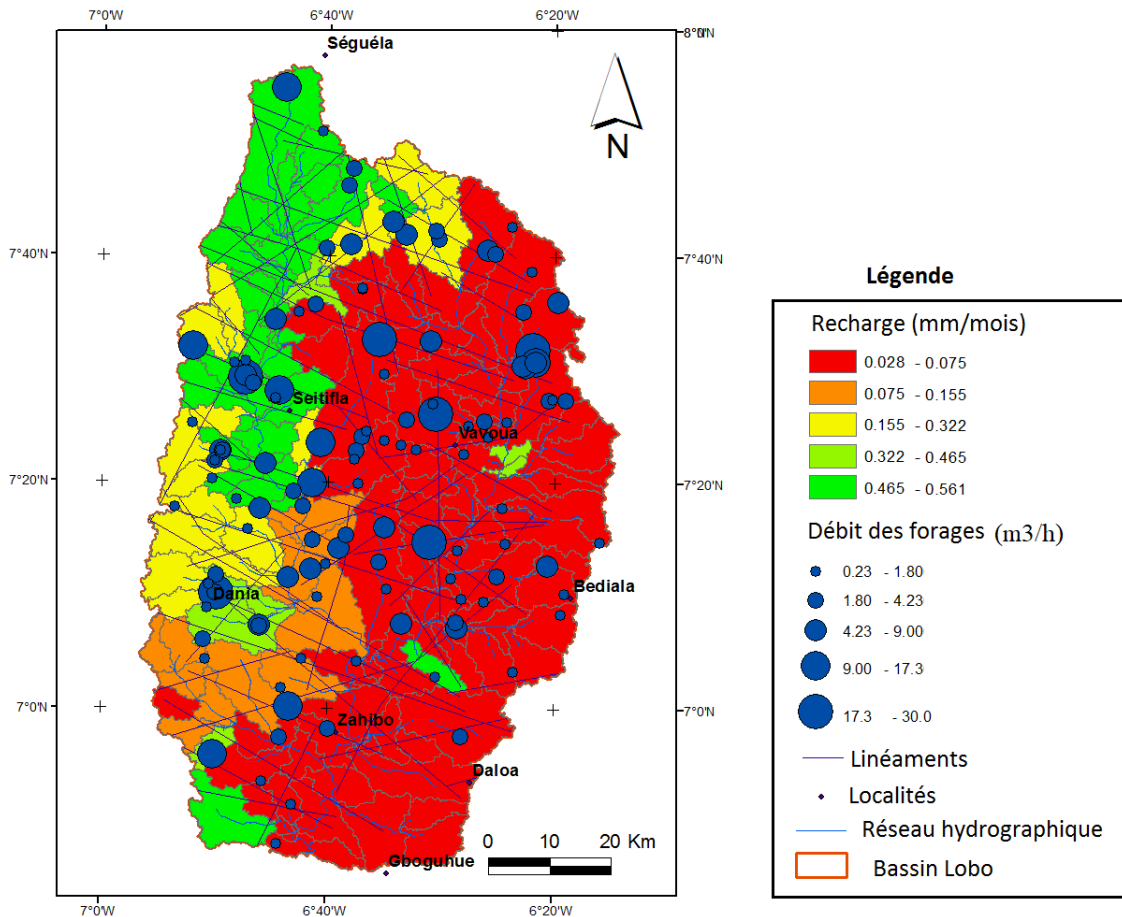


Figure 9: Validation de la carte des recharges

L'analyse de cette carte montre la répartition des zones de recharges avec les forages réalisés. La plupart des forages réalisés dans les zones d'intense recharge ont des débits élevés. Des forages réalisés dans la zone de faible recharge présente toutefois de bons débits par endroit. La superposition de la carte de fracturation à celle de la recharge et les débits obtenus montre que les débits importants ne sont pas liés à la combinaison entre fracturation et recharge. Par conséquent, l'obtention de forts débits n'est pas liée à la fracturation.

3.2 Discussion

Dans le cadre de l'étude portant sur la cartographie des zones favorables à la recharge des nappes, une approche par modélisation agro-hydrologique avec le modèle SWAT a été réalisée. Ainsi, malgré sa relative simplicité par rapport à d'autres modèles distribués, les données à mobiliser pour mettre en place ce modèle restent nombreuses. Le modèle a été alimenté par différentes sources de données suivant leur disponibilité et leurs qualités. A cet effet, les résultats de la modélisation seront conditionnés par la qualité et la précision de ces données introduites dans le modèle. La mise en place du modèle SWAT sur le bassin a permis de discrétiser 158 sous bassins pour un seuil minimal de 200 km². Le modèle a été simulé pour une période de 5 ans de 2009 à 2013. Elle a permis de faire l'analyse de sensibilité et d'évaluer la performance du modèle à travers les deux critères statistiques. Cette technique a été adoptée par la plupart des utilisateurs du modèle dont (Anoh, 2014), (Koua, 2014) et (Thiebault, 2010). L'analyse de sensibilité portée sur les paramètres hydrologiques a montré 13 paramètres jugés sensible sur les 19 paramètres recensés pour la zone tropicale humide. Ces résultats sont conformes à ceux de Anoh (2014) et Koua *et al.* (2014).

Au niveau des tendances hydrologiques, l'adéquation entre les données simulées par le modèle et celles observées sur le terrain apparaît très importante. En effet, les critères statistiques de performance ont présenté à la fois un NS et un R² supérieurs à 0. De plus, pour la calibration, NS et R² ≥ 0.6 correspondent aux critères de performance établis par (Santhi *et al.*, 2001; Tolson & Shoemaker, 2007; Obuobie, 2008; Abbaspour, 2013). Les résultats de la calibration du bassin de la Lobo sont similaires à ceux obtenus par Anoh *et al.* (2017), Anoh (2014) et Schuol *et al.* (2008). En effet, les travaux de Schuol *et al.* (2008) sur la disponibilité de l'eau de toute l'Afrique de l'Ouest de 1970 à 1995 (période de calibration) ont donné des valeurs de P-facteur comprises entre 60 et 90 %, de R-facteur dans la fourchette de 0,1 à 1,5 et de NS comprises entre 0 et 0,70. Ils soulignent que les modèles dont les valeurs du coefficient de NS et R² sont supérieurs à 0,5 représentent mieux le comportement hydrologique du bassin. Cette conclusion a été aussi obtenue par Gassman *et al.* (2007).

La validation du modèle SWAT du bassin de la Lobo s'est déroulée sur la période 2013. Elle a consisté à montrer la robustesse du modèle à prédire des données observées avec les paramètres optimums du calage sur une période différente de la précédente. Cette validation s'est traduite par un écart significatif des données simulées et observées traduisant ainsi une mauvaise représentation des écoulements par rapport à la calibration. En effet, les données simulées ont montré que le NS=0,17 et le R² compris entre 0 et 0,2. La validation du modèle SWAT traduit

RESULTATS ET DISCUSSION

par la bande des incertitudes (R -facteur=5,62) très proche de 6 a montré beaucoup d'incertitudes. Ces incertitudes ont entraîné une mauvaise représentation des écoulements du bassin. Cette mauvaise prédiction de la période de validation peut être imputable à plusieurs facteurs entre autres la qualité des données d'entrées à cette période. En effet, il faut noter que sur l'ensemble des quatre stations pluviométriques renseignées, il y avait une seule station de température pour l'ensemble du bassin. Outre les données climatiques, les données de débits comportent des lacunes avec des données manquantes et non étendues. Selon Moriasi *et al.* (2007), moins la série de données d'entrées est importante et répartie dans l'année, moins les résultats en calage et en validation sont bons. Ainsi, pour une très bonne prédiction du modèle, Obuobie (2008) suggère que le nombre de stations pluviométriques soit égal au nombre de sous bassins. A la qualité et quantité des données d'entrées s'ajoute, la très grande résolution de la carte pédologique. Parallèlement à la carte pédologique, le décalage de date et la petite échelle de la carte d'occupation du sol ne définit pas assez clairement les différentes cultures du bassin. Par conséquent, cette lacune a réduit la discrétisation des URH et par conséquent la précision des prédictions du modèle (Neitsch *et al.*, 2005).

En outre, la carte de la recharge en eau a montré que le bassin regorge d'importante réserve en eau souterraine. Sur cette carte, cinq classes de recharge (très faible, faible, moyenne, bonne et forte) ont été révélées sur l'ensemble du bassin. En effet, les zones Nord-ouest et Ouest du bassin où la recharge est élevée sont due à une faible pente qui entrainerait une bonne infiltration des eaux dans l'aquifère selon (Michaud *et al.*, 2006). Ces résultats confirment ceux de Yao (2015) sur le bassin de la Lobo. Cet auteur affirme que, cette bonne infiltration découle de l'abondance des précipitations qui constituent la source première de l'alimentation des aquifères. En outre, dans les zones tropicales humides comme la Côte d'Ivoire, les aquifères sont essentiellement alimentés par la pluviométrie via les infiltrations de surface (Savane *et al.*, 2002; Kouakou, 2011; Yao *et al.*, 2012). Les zones recensées comme faible et très faible sur la carte de la recharge, réparties sur la plupart du bassin s'explique par une infiltration faible malgré une faible pente. Cela pourrait être due à l'occupation du sol sur le bassin. En effet, ces zones sont situées dans la classe des sols nus et habitat. Leur nature imperméable, réduiraient considérablement la recharge des aquifères en raison de la prépondérance du ruissellement bien que la pente soit faible. Selon Jourda *et al.* (2007), les pentes faibles favorisent l'infiltration. Cependant, dans le cas de cette étude, l'infiltration est surtout liée au couvert végétal et à la nature du sol. Ce constat est en accord avec les travaux de (Ake *et al.*, 2018). Selon, ces auteurs les sols nus et zones urbaines présentent un degré de perméabilité faible certainement liée à la

RESULTATS ET DISCUSSION

constitution lithologique des sols. Ils affirment que, les paramètres importants dans la détermination de la recharge sont notamment l'occupation du sol, le type de sol et la pente.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les travaux présentés de ce mémoire portent sur la cartographie des zones favorables à la recharge des nappes sur le bassin de la Lobo. La méthodologie a été basée sur le modèle agro hydrologique SWAT. Les résultats de cette modélisation ont permis d'estimer la recharge du bassin. Les courbes des débits mensuels simulés sur la période de calibration (2010 à 2012) ont bien reflété les débits observés. Avec des critères de performance satisfaisante (NS=0,72 et $R^2=0,73$), le modèle a montré une bonne inclusion des incertitudes (R-facteur=1,41 et P-facteur = 0,9). La validation qui s'est déroulée sur la période 2013 a montré beaucoup d'incertitudes. Ces valeurs incertitudes (R-facteur =5,62 et P-facteur = 0,83) liées à la qualité des données collectées, ont donné des critères de performance peu satisfaisant (NS=-0,29 et $R^2=0,19$). Par ailleurs, la possibilité du modèle SWAT à simuler les phénomènes observés en l'absence de données observables a permis d'estimer la recharge du bassin donnant ainsi une répartition spatiale de celle-ci. La carte de la recharge a montré les localités de Seitifla et Dania ainsi que le Nord-ouest du bassin comme les zones de forte recharge. Parallèlement à celles-ci le centre et l'est du bassin représenté par les localités de Daloa, Vavoua, Zahibo et Bediala sont qualifié de zone ayant une faible recharge. Enfin, la superposition de cette carte avec celle des forages a permis de valider la carte de la recharge du bassin.

La présente étude a permis de réaliser l'aspect quantité des eaux souterraines sur le bassin à travers la modélisation agro-hydrologique avec le modèle SWAT. Pour mieux juger de l'évolution continue de ces zones de recharge, il serait souhaitable d'inclure dans les prochaines études :

- L'aspect qualité en associant les données d'analyses chimiques des flux de nitrate et de phosphore dans les flux d'eaux du bassin car la zone est beaucoup marquée par l'utilisation de ces produits;
- des données climatiques futures afin d'apprécier l'évolution des bilans hydrologiques et chimiques du bassin;
- la cartographie des zones favorables à l'implantation des forages pour améliorer l'accès à l'eau potable des populations.

REFERENCES

REFERENCES

- Abbaspour K.C. (2013). SWAT-CUP 2012: SWAT Calibration and uncertainty program—A User manual, 103 p.
- Ake G., Kouame K., Koffi A. & Jourda J. (2018). Cartographie des zones potentielles de recharge de la nappe de Bonoua (sud-est de la Côte d'Ivoire). *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 31(2) : 129–144.
- Anoh K.A. (2014). Apport d'un SIG et du modèle agrohydrologique SWAT dans la gestion durable des ressources en eaux du bassin versant du lac de Taabo (centre de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat en Sciences de la Terre, Option : Hydrogéologie, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 179 p.
- Anoh K.A., Jourda J.P., Kouamé K.J., Koua T.J.-J., Eba A.E. & Lazar G. (2012). Demarcation of protection perimeters for surface waters of Taabo (Ivory Coast) watershed using GIS and multicriteria analysis. *Environmental Engineering and Management Journal (EEMJ)*, 11(12): 2124-2131.
- Anoh K.A., Koua T.J.J., Eblin S.G., Kouamé K.J. & Jourda J.P. (2017). Modelling freshwater availability using SWAT model at a catchment-scale in ivory coast. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 5(13): 70–83.
- Anoh K.A., Koua T.J.J., Kouamé K.J., Jourda J.P. & Laurent F. (2018). Modelling water flow in a complex watershed in humid a tropical area using SWAT: a case study of Taabo watershed in Ivory Coast. *International Journal of River Basin Management*, 16(2): 157–167.
- Arnold J.G., Srinivasan R., Muttiah R.S. & Williams J.R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34(1): 73–89.
- Beckers E. & Degré A. (2011). Revue bibliographique: la prise en compte des transferts horizontaux dans les modèles hydrologiques. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 15(1): 143–151.
- Bessière H. (2008). Assimilation de données variationnelle pour la modélisation hydrologique distribuée des crues à cinétique rapide. Thèse de Doctorat, Sciences de l'Univers,

REFERENCES

- de l'Environnement et de l'Espace, Université de Toulouse (Toulouse, France), 311 p.
- Biémi J. (1992). Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahéliens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest: hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 192 p.
- Biesbrouck B., Wyseure G., Van Orschoven J. & Feyen J. (2002). AVSWAT 2000, Katholieke Universiteit Leuven (K. U. L.). Laboratory for Soil and Water Management (LSWM), 199 p.
- Chaponnière A. (2005). Fonctionnement hydrologique d'un bassin versant montagneux semi-aride: cas du bassin versant du Rehraya (Haut Atlas marocain). Thèse de doctorat; Institut National Agronomique Paris-Grignon, 268 p.
- Deslandes J., Michaud A. & Bonn F. (2002). Développement et validation d'indicateurs agroenvironnementaux associés aux pertes diffuses de phosphore dans le bassin-versant de la rivière aux Brochets. *Agrosol*, 13(2): 111–123.
- Gassman P.W., Reyes M.R., Green C.H. & Arnold J.G. (2007). The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE*, 50(4): 1211–1250.
- Jenson S.K. (1991). Application of hydrology information automatically extracted from digital elevation models. *Hydrological processes*, 5: 31-44.
- Jourda J.P. (2005). Méthodologie d'application des techniques de télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'ouest. Concept de l'Hydrotechnique spatiale: cas des zones tests de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat d'État, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 430 p.
- Jourda J.P., Kouame K.J., Adja M.G., Deh S.K., Anani A.T., Effini A.T. & Biémi J. (2007). Evaluation du degré de protection des eaux souterraines: vulnérabilité à la pollution de la nappe de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire) par la method DRASTIC,

REFERENCES

- Actes de la Conférence Francophone, SIG 2007/10 au 11 Octobre 2007, Versailles-France, 11 p.*
- Koua T.J. (2014). Apport de la modélisation hydrologique et des Systèmes d'Information Géographique (SIG) dans l'étude du transfert des polluants et des impacts climatiques sur les ressources en eau: cas du bassin versant du lac de Buyo (Sud-ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët Boigny (Abidjan, Côte d'Ivoire), 167 p.
- Koua T.J.J. (2009). Cartographie de la vulnérabilité spécifique aux nitrates des eaux souterraines du district d'Abidjan (Sud-est de la Côte d'Ivoire) par la méthode AHP (Analyse Hiérarchique des procédés). Mémoire DEA, en sciences de la Terre option Hydrogéologie de l'Université de Cocody-Abidjan, 63 p.
- Koua T.J.-J., Jourda J.P., Kouame K.J., Anoh K.A., Balin D. & Lane S.N. (2014). Potential climate change impacts on water resources in the Buyo Lake Basin (Southwest of Ivory Coast). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 8(3): 1094 p.
- Kouakou K.E. (2011). Impacts de la variabilité climatique et du changement climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest: Cas du bassin versant de la Comoé. Thèse de l'Université d'Abobo-Adjamé (Abidjan, Côte d'Ivoire), 170 p.
- Kouamé K.J. (2007). Contribution à la Gestion Intégrée des Ressources en Eaux (GIRE) du District d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire): Outils d'aide à la décision pour la prévention et la protection des eaux souterraines contre la pollution. Thèse de Doctorat, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire) 222 p.
- Kouassi K.H. (2013). Caractérisation et cartographie des zones humides littorales par l'apport des données radar polarimétriques et optiques : application aux zones de Sassandra, de Grand-Lahou et d'Abidjan (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 150 p.
- Kouassi K.J.M. (2017). Modélisation du fonctionnement hydrodynamique d'un aquifère d'Altérite : cas de la ville de Daloa (Cote d'Ivoire). Mémoire master, Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa, 73 p.

REFERENCES

- Lainé S.C. & Pavé A. (2002). Environnement : modélisation et modèles pour comprendre, agir ou décider dans un contexte interdisciplinaire. *Sciences pour l'ingénierie de l'environnement*, 10(1): 3-35.
- Lamarre H. (2003). Musy, André et Higy, Christophe, 2004. Hydrologie, une science de la nature. Coll. Gérer l'environnement, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 314 p., 250 fig. et tabl., 16 x 24 cm, 54, 00€(env. 86, 50 CAD). ISBN 2-88074-546-2. *Géographie physique et Quaternaire*, 57(2-3): 257-257.
- Lasm T. (2000). Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle: Analyse statistique de la fracturation et des propriétés hydrodynamiques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire (domaine archéen). Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, France, 166 p.
- Michaud A., Deslandes J. & Beaudin I. (2006). Modélisation de l'hydrologie et des dynamiques de pollution diffuse dans le bassin versant de la Rivière aux Brochets à l'aide du modèle SWAT. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, rapport final, 108 p.
- Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D. & Veith T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3): 885-900.
- Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Williams J.R. & King K.W. (2002). Soil and Water Assessment User's Manual Version 2000. Grassland Soil and Water Research Laboratory. Agricultural Research Service. 472 p.
- Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Williams J.R. & King K.W. (2005). Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2005. Grassland, Soil and Water Research Laboratory -Agricultural Research Service. Blackland Research Center - Texas Agricultural Experiment Station, 476 p.
- Obuobie E. (2008). Estimation of groundwater recharge in the context of future climate change in the White Volta River Basin, West Africa. Thesis Doctorat, Universitäts-und Landesbibliothek Bonn, 153 p.

REFERENCES

- Patoul C. (2008). Allocation, modélisation et valorisation des ressources en eau du bassin versant de la rivière Tolomosa (Bolivie). Thèse de doctorat, faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux (Belgique), 283 p
- Payraudeau S. (2002). Modélisation distribuée des flux d'azote sur des petits bassins versants méditerranéens. Thèse de Doctorat, ENGREF Montpellier, 225 p.
- Reynolds C.A., Jackson T.J. & Rawls W.J. (1999). Estimating available water content by linking the FAO soil map of the world with global soil profile database and pedo-transfer functions. *Water resources research*, 36(12): 3653-3662.
- Rodier J.A. & Ribstein P. (1988) : Estimation des caractéristiques de la crue décennale pour les petits bassins versants du Sahel couvrant de 1 à 10 km². Orstom, Montpellier. 133 p.
- Rollo N. (2012). Modélisation des dynamiques de pollution diffuse dans le bassin versant de la rivière d'Auray: quantification, caractérisation et gestion des apports nutritifs terrigènes. Thèse de Doctorat, géographie, Université de Nantes, 318 p.
- Salou B.I.G. (2009). Estimation des apports au lac Saint-Charles à l'aide du modèle hydrologique SWAT. Mémoire de maîtrise, Université Laval Québec, 60 p.
- Sanford W. (2002). Recharge and groundwater models: an overview. *Hydrogeology journal*, 10(1): 110–120.
- Santhi C., Arnold J.G., Williams J.R., Dugas W.A., Srinivasan R. & Hauck L.M. (2001). Validation of the swat model on a large river basin with point and nonpoint sources 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 37(5): 1169–1188.
- Savane I., Coulibaly K.M. & Gioan P. (2002). Variabilité climatique et ressources en eaux souterraines dans la région semi-montagneuse de Man. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 12(4): 231–237.
- Schuol J., Abbaspour K.C., Srinivasan R. & Yang H. (2008). Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model. *Journal of hydrology*, 352(2): 30–49.

REFERENCES

- Sharpley A.N. & Williams J.R. (1990). EPIC Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation. U.S. *Departement. Agricole. Technical*, 1768p.
- Sophocleous M. (2004): Groundwater recharge and the water budgets of the Kansas High Plains and related aquifers. *Kansas Geological Survey Bulletin*, États-Unis, 102 p.
- Thiebault M. (2010). Modélisation hydrologique d'un scénario de changement climatique sur le bassin versant du Bani avec SWAT. Mémoire d'ingénieur, Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg, France, 60 p.
- Tolson B.A. & Shoemaker C.A. (2007). Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration. *Water Resources Research*, 43(1):201-224.
- Yao A.B. (2015). Evaluation des potentialités en eau du bassin versant de la Lobo en vue d'une gestion rationnelle (Centre Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse Unique de Doctorat, Université Abobo-Adjamé (Abidjan, Côte d'Ivoire), 192 p.
- Yao A.B., Goula B.T.A., Kouadio Z.A., Kouakou K.E., Kane A. & Sambou S. (2012). Analyse de la variabilité climatique et quantification des ressources en eau en zone tropicale humide: cas du bassin versant de la Lobo au centre-ouest de la Côte d'Ivoire. *Revue Ivoirienne Science Technologie*, 19: 136–157.
- Youan Ta M. (2008). Contribution de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques à la prospection hydrogéologique du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest: Cas de la région de Bondoukou Nord Est de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 237 p.

Résumé

L'accès à l'eau potable demeure au centre des projets de développement en Côte d'Ivoire. Sur le bassin de la Lobo situé en zone du socle, ce problème est d'autant plus complexe dans la mesure où les eaux de surface n'arrivent plus à couvrir les besoins de la population. L'exploitation des eaux souterraines, est marquée par de nombreux échecs des forages réalisés. C'est dans ce cadre que cette étude vise à mettre en place un outil numérique d'aide à la décision basé sur la modèle agro hydrologique SWAT. La méthodologie basée sur les SIG à travers l'outil ArcGIS a pris en compte les données spatiales (MNA, carte d'occupation du sol et carte pédologique) et les données ponctuelles (climatiques, hydrométrique et physico-chimique du sol). Ces données combinées ont abouti à l'analyse de sensibilité permettant ainsi de calibrer et valider le modèle à travers 2 simulations de 400 itérations. Ces résultats ont permis d'évaluer la performance du modèle à reproduire le phénomène hydrologique. Outre cela, la carte des zones de recharge a permis de montrer les zones d'infiltration susceptible de recharger les aquifères souterrains. Ainsi celle-ci a été validée à l'aide des forages réalisés dans la zone.

Mots clefs : Recharge, Nappes d'eau, SWAT, Côte d'Ivoire.

Abstract

Access to drinking water remains at the center of development projects in Côte d'Ivoire. In the Lobo basin located in the basement area, this problem is all the more complex as surface water can no longer cover the needs of the population. The exploitation of underground water is marked by numerous failures of the boreholes drilled. It is within this framework that this study aims to set up a numerical tool for decision support based on the SWAT agro-hydrological model. The methodology based on GIS through the ArcGIS tool took into account spatial data (DEM, land use map and soil map) and point data (climatic, hydrometric and physico-chemical soil). These combined data led to a sensitivity analysis allowing to calibrate and validate the model through 2 simulations of 400 iterations. These results allowed to evaluate the performance of the model in reproducing the hydrological phenomenon. In addition, the map of recharge zones was used to show the infiltration zones likely to recharge the underground aquifers. Thus, this map was validated with the help of the drillings carried out in the zone.

Keywords: Recharge, Water table, SWAT, Ivory Coast.