



Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
International Institute for Water and Environmental Engineering

**ANALYSE CRITIQUE DES PRINCIPAUX COMPOSANTS DU
BILAN D'EAU DU BASSIN VERSANT DU KOU**

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR DU
GENIE RURAL**

Présenté et soutenu publiquement le [Date] par **Marie-Jeanne NIAMIAN**

Travaux dirigés par : Yacouba HAMMA

Enseignant

UTER GVEA

Jury d'évaluation du stage :

Président : Yacouba HAMMA

Membres et correcteurs : Harouna KARAMBIRI

Joost WELLENS

Angelbert BIAOU

Promotion 2007/2008

DEDICACE

A mon Dieu Tout Puissant qui m'a donné la faculté de connaître et de comprendre et qui ne cesse de me combler de ses bienfaits. Qu'il soit loué éternellement, Amen !

Je dédie ce mémoire

- A Mon défunt Père que le Seigneur à rappelé pendant que je poursuivais ces études. Que Dieu lui accorde son paradis!
- A Ma Mère. KANGHA Marguerite, qui m'a donné la vie et qui a guidé mes premiers pas dans la recherche du savoir, de la réussite et qui n'a jamais cessé de m'encourager. Qu'elle trouve ici la joie !
- A Mes frères et sœurs, mes amis qui m'encouragent toutefois qu'ils le peuvent. Que cet ouvrage soit pour eux une base afin qu'ils fassent mieux !

« A tous, je formule ma profonde gratitude car l'écriture ne soulage guère, mais elle retrace mes sentiments et je vous dédie cet ouvrage qu'est mon mémoire de fin d'étude »

REMERCIEMENTS

Jonchée de difficultés et de riches expériences, ce travail, symbole de l'aboutissement des travaux de fin d'étude n'aurait été une réalité aujourd'hui sans l'appui et le soutien de certaine personne. M'y voilà donc à mon tour d'adresser mes profondes gratitude à tous ceux qui ont permis à ce temps-là d'arriver.

Cette gratitude va à l'endroit de :

- **M. Yacouba HAMMA**, chef d'UTER-GVA (Unité Thématique d'Enseignement et de Recherche en Gestion et Valorisation de l'Eau et de l'Assainissement) qui a accepté que ce mémoire se fasse dans son département.
- **M. Joost WELLENS** pour les moyens mis à ma disposition et sa participation très estimable pour l'encadrement de ce mémoire.
- **M. Harouna KARAMBIRI** qui, malgré ces occupations, a su par ses idées, ses explications et ses critiques, insuffler de l'élan à cette étude.
- **M. Farid TRAORE** qui a été toujours disponible et qui, malgré ses travaux, m'a accordé soutien et compréhension par sa rigueur scientifique, son engagement passionné, ses explications, ses critiques et sa générosité intellectuelle.

Je remercie également tout le corps professoral du 2iE pour l'attention accordée pendant ces trois années de formation.

Que les nombreuses autres personnes qui nous ont aidé et dont les noms ne figurent pas ici reçoivent également notre profonde gratitude.

« L'heure de Dieu est toujours la meilleure, que le Dieu Tout Puissant vous accorde sa grâce selon l'immensité de sa bonté »

SIGLES ET ABREVIATIONS

AEDE: Association pour l'Eau, le Développement et l'Environnement

BUNASOLS: Bureau National des Sols du Burkina Faso

CIEH: Comité Inter africain d'Etudes Hydrauliques

DRAHRH-HB: Direction de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques des Hauts Bassins

DPAHRHH: Direction Provinciale de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques de Houet

EIER: Ecole Inter états d'Ingénieurs de l'Equipement Rural

FIT: Front Intertropical

GEeau: Renforcement Structurel de la Capacité de Gestion des Ressources en Eau pour l'Agriculture dans le Bassin versant du Kou

GIRE: Gestion Intégrée des Ressources en Eau

HYSIM: Hydrological Simulation Model

IGB: Institut Géographique du Burkina

INERA: Institut d'Environnement et des Recherches Agronomiques

IRD: Institut de Recherche pour le Développement

PAFDK: Projet d'Aménagement Participatif des Forêts classées de Dindéresso et du Kou

RESO: Ressources en Eau dans le Sud-Ouest

SEDI: Satellite Enhanced Data Interpolation

SIG: Systèmes d'Informations Géographiques

SPOT: Satellite pour l'Observation de la Terre

ULg: Université de Liège

2iE: Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

SOMMAIRE

DEDICACE
REMERCIEMENTS
SIGLES ET ABREVIATIONS
SOMMAIRE.....1
LISTE DES FIGURES 4
LISTE DES CARTES 4
LISTE DES TABLEAUX..... 4
CHAPITRE I: INTRODUCTION GENERALE.....5
• INTRODUCTION 5
• CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE 6
• ORGANISATION DU RAPPORT 8
CHAPITRE II: OBJECTIFS DE L'ETUDE9
II.1.OBJECTIFS 9
II.1.1. OBJECTIF GLOBAL..... 9
II.1.2. OBJECTIFS SPECIFIQUES 9
II.2-RESULTATS ATTENDUS..... 9
CHAPITRE III: METHODES ET MATERIELS.....10
III.1. MILIEU D'ETUDE 10
III.1.1. PRESENTATION DU PROJET GEEAU..... 10
III.1.2. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE 11
 III.1.2.1-FACTEURS GEOGRAPHIQUES..... 11
 III.1.2.1.1-Situation et cartographie..... 11
 III.1.2.1.2-Hydrographie et régime hydrologique 12
 III.1.2.1.3-Caractéristiques morphologique et pédologique 13
 III.1.2.1.4-Géologie et hydrogéologie 15
 III.1.2.1.5-Occupation des sols et végétation 16
 III.1.2.2- FACTEURS CLIMATIQUES 17
 III.1.2.2.1- Températures, vent, rayonnement solaire et humidité relative 17
 III.1.2.2.2- Pluviométrie et évapotranspiration..... 17
III.2-BILAN D'EAU DU BASSIN VERSANT DU KOU : CADRE THEORIQUE 18
III.2.1-PRINCIPE DU BILAN D'EAU 18
III.2.2-PRINCIPAUX TERMES DU BILAN D'EAU..... 18
III.2.3- REVUE DETAILLEE DES PRINCIPAUX TERMES DU BILAN D'EAU 21
 III.2.3.1-Précipitation (P) 21
 III.2.3.2-Ruissellement (R) 21
 III.2.3.3-Evapotranspiration réelle (ETR)..... 21
 III.2.3.4-Infiltration (I) 22
 III.2.3.5-Variation de stock (ΔR_s)..... 22

III.3. APPROCHES METHODOLOGIQUES ET HYPOTHESES	22
III.3.1. APPROCHES METHODOLOGIQUES	22
III.3.2. HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES	23
III.4. OUTILS UTILISES.....	25
III.4.1- LOGICIEL DE MODELISATION HYDROLOGIQUE « HYSIM »	25
III.4.1.1- principe de fonctionnement	25
III.4.1.2- variables d'entrée et de sortie	27
III.4.1.3- paramètres de calage	27
III.4.2- AUTRES OUTILS	28
III.5. DONNEES DE L'ETUDE	28
III.5.1- SOURCE DE DONNEE.....	28
III.5.2- ECHANTILLON DE DONNEES UTILISE	29
III. 5.2.1-Données pluviométriques	29
III.5.2.1.1.- Choix des stations pluviométriques	29
III.5.2.1.2.- Disponibilité des données.....	30
III.5.2.2-Données d'évapotranspiration	30
III.5.2.2.1.- disponibilité des données	30
III.5.2.3-Données hydrométriques.....	31
III.5.2.3.1.- choix des stations hydrométriques	31
III.5.2.3.2.- Disponibilité des données.....	31
III.5.3- CHOIX DE LA PERIODE D'ETABLISSEMENT DU BILAN	32
III.6- ANALYSE CRITIQUE DES DONNEES.....	34
III.6.1- ANALYSE DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES	34
III.6.1.1- homogénéité des séries	34
III.6.1.2- Précipitations moyennes.....	35
III.6.2- ANALYSE DES DONNEES HYDROMETRIQUES	36
III.6.2.1- Choix d'une échelle d'espace (exutoire) pour l'étude du bilan d'eau.....	37
III.6.2.2- Lame d'eau écoulée (Le) ou Ruissellement	38
III.6.3- ANALYSE DES DONNEES D'EVAPOTRANSPIRATION	39
III.7. MISE EN ŒUVRE DU MODELE HYDROLOGIQUE.....	40
III.7.1. CHOIX DE LA FONCTION CRITERE.....	40
III.7.2- DETERMINATION DES PARAMETRES DU MODELE	41
III.7. 2.1.paramètres hydrauliques	41
III.7. 2.2.paramètres hydrologiques	41
III.7. 2.2.1-paramètres de base	41
III.7.2.2.2-paramètres avancés.....	43
III.7.2.3- conclusion partielle.....	43
III.7. 3 -OPTIMISATION DES PARAMETRES	44
III.7.3.1-influence des paramètres de calage	45
III.7.3.1.1-influence du réservoir d'interception	45
III.7.3.1.2-influence de la profondeur racinaire.....	46
III.7.3.1.3-influence du temps de monté des petits chenaux	46
III.7.3.1.4-influence du facteur de correction de l'ETP et de la précipitation	47
III.7.3.1.5-influence des paramètres de perméabilité.....	48

CHAPITRE IV: RESULTATS ET INTERPRETATIONS	49
IV.1-RESULTATS OBTENUS	49
IV.1.1-PARAMETRES RETENUS	49
IV.1.2-ETABLISSEMENT DU BILAN D'EAU.....	51
IV.2- CALCUL D'ERREUR SUR LES TERMES DU BILAN D'EAU	53
IV.2.1.ERREUR SUR LA PRECIPITATION	53
IV.2.2.ERREUR SUR LES TERMES « ETR ET INFILTRATION »	53
IV.2.2. ERREUR SUR LA LAME D'EAU ECOULEE	54
IV.3. BILAN D'EAU GLOBAL	55
CHAPITRE V: DISCUSSIONS ET ANALYSES	57
V.1. A PROPOS DES PRINCIPAUX COMPOSANTS DU BILAN D'EAU	57
V.1.1- ANALYSE DE L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE (ETR).....	57
V.1.2- ANALYSE DE L'INFILTRATION ET DE LA LAME D'EAU ECOULEE (LE)	58
V.2. A PROPOS DU BILAN D'EAU GLOBAL	60
CONCLUSION GENERALE	62
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	64
LISTE DES ANNEXES	65
RESUME	76

LISTE DES FIGURES

Figure 3. 1: schéma illustratif des termes du bilan d'eau (source EPFL, LATE/HYDRAM).....	19
Figure 4. 3: mise en évidence de la variabilité de la pluie au niveau des stations	34
Figure 3. 4: comparaison des débits à la station de la Confluence Niamé- Baoulé	37
Figure 3. 5: résultats avant optimisation	44
Figure 3. 6: histogrammes obtenus après variation du réservoir d'interception	46
Figure 3. 7: histogrammes obtenus après variation du temps de montée des petits chenaux.....	47

LISTE DES CARTES

Carte 3. 1:situation géographique du bassin versant du Kou.....	11
Carte 3. 2:réseau hydrographique du bassin versant du Kou.....	13
Carte 3. 3: pédologie et morphologie du bassin versant (Source : Projet Eaux Souterraines).....	15
Carte 3. 4:distribution spatiale des stations pluviométriques du bassin versant du Kou et environs...	29
Carte 3. 5:distribution spatiale des stations hydrométriques du bassin versant du Kou	31
Carte 3. 6:Distribution spatiale des stations utilisées pour l'interpolation SEDI.....	39
Carte 5. 1:cartographie de l'évapotranspiration réelle en mm (Traoré, 2007).....	58

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3. 1: principaux caractéristiques de forme du bassin (Traoré, 2007)	14
Tableau 3. 2: récapitulatif des données pluviométriques disponibles	30
Tableau 3. 3:récapitulatif des données d'ETP disponibles	30
Tableau 3. 4: récapitulatif des données hydrométriques disponibles.....	32
Tableau 3. 5: récapitulatif de la combinaison des données disponibles.....	33
Tableau 3. 6: tableau récapitulatif de la pluviométrie moyenne au niveau de chaque station	35
Tableau 3. 7: récapitulatif du volume d'eau tombé et recueilli.....	38
Tableau 3. 8: variation du réservoir d'interception	45
Tableau 3. 9: variation du temps de montée des petits chenaux.....	47
Tableau 3. 10: variation du facteur de correction de la précipitation	48
Tableau 4. 1: récapitulatif des paramètres retenus.....	49
Tableau 4. 2:récapitulation des principaux termes du bilan.....	51
Tableau 4. 3:bilan d'eau global avec prise en compte des incertitudes sur chaque terme	55

CHAPITRE I: INTRODUCTION GENERALE

■ INTRODUCTION

L'Eau, " tu es la plus grande richesse qui soit au monde " disait Antoine de Saint-Exupéry. Elle est présente dans toutes les activités humaines et constitue un atout important dans le développement d'un pays.

Cela est d'autant vrai pour les pays Sahéliens comme le Burkina Faso, qui bien que théoriquement favorisé par la disponibilité et la qualité de certains paramètres climatiques (insolation,...) et naturels (diversité biologique), connaît dans la réalité, des contraintes de divers ordres dont, la forte variabilité spatiotemporelle du climat.

Face à la forte croissance démographique, les cultures pluviales, souvent affectées par une pluviométrie insuffisante et mal répartie, ne sont plus à même d'assurer une sécurité alimentaire durable.

C'est dans cette optique que depuis quelques années, les projets de développement de l'agriculture au Burkina Faso dans les zones hydrologiquement favorables, en particulier sur les bassins versants se multiplient.

Il convient par conséquent de gérer les ressources en eau de ces bassins versants de façon intégrée afin de garantir la durabilité de l'écosystème et de l'eau qu'il fournit.

Cette gestion exige à son tour des renseignements fiables sur l'hydrologie à travers une compréhension quantitative rationnelle de l'origine (superficielle et/ou subsuperficielle), de la trajectoire et de la variabilité des entrées et sorties d'eau, afin de pouvoir élaborer des stratégies d'exploitation. D'où l'étude du bilan d'eau devient incontournable. Elle doit pouvoir conduire à une meilleure compréhension du fonctionnement hydrologique du bassin versant.

C'est dans ce cadre, essentiellement que s'intègre cette étude « *ANALYSE CRITIQUE DES PRINCIPAUX COMPOSANTS DU BILAN D'EAU DU BASSIN VERSANT DU KOU* ».

La présente étude fait l'objet d'un mémoire de fin d'étude à l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) de Ouagadougou et s'inscrit dans le cadre d'un travail de recherche contribuant à l'amélioration de la connaissance, de la gestion et de la protection des ressources en eau pour l'agriculture dans la région des Hauts-Bassins.

■ CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

Le Burkina Faso est un pays sahélien enclavé dont l'économie repose essentiellement sur les activités agricoles. L'agriculture occupe 80% de la population et entre pour plus de 30% dans le PIB. Elle assure plus de 50% des exportations totales.

C'est pourquoi certaines zones hydrologiquement favorables et particulièrement les bassins versants, constituent les principaux atouts de développement du pays, qu'il convient de mettre à profit. Tel est le cas du bassin versant du Kou, objet de notre étude.

Ce bassin versant est situé dans la région des hauts bassins dans le Sud-ouest du Burkina Faso, précisément à l'Ouest de la capitale économique (Bobo-Dioulasso).

Cette Région couvre 20% du territoire du pays, recèle 60% des ressources renouvelables en eau et 40% du potentiel irrigable du pays. (Rapport technique GEeau, 2006)

Le bassin versant du Kou, est l'espace géographique de 1823 km², qui contient le système d'eau associé à la rivière Kou, à ses affluents et aux sources de Nasso (dite « Guinguette ») et Pésso/Déso.

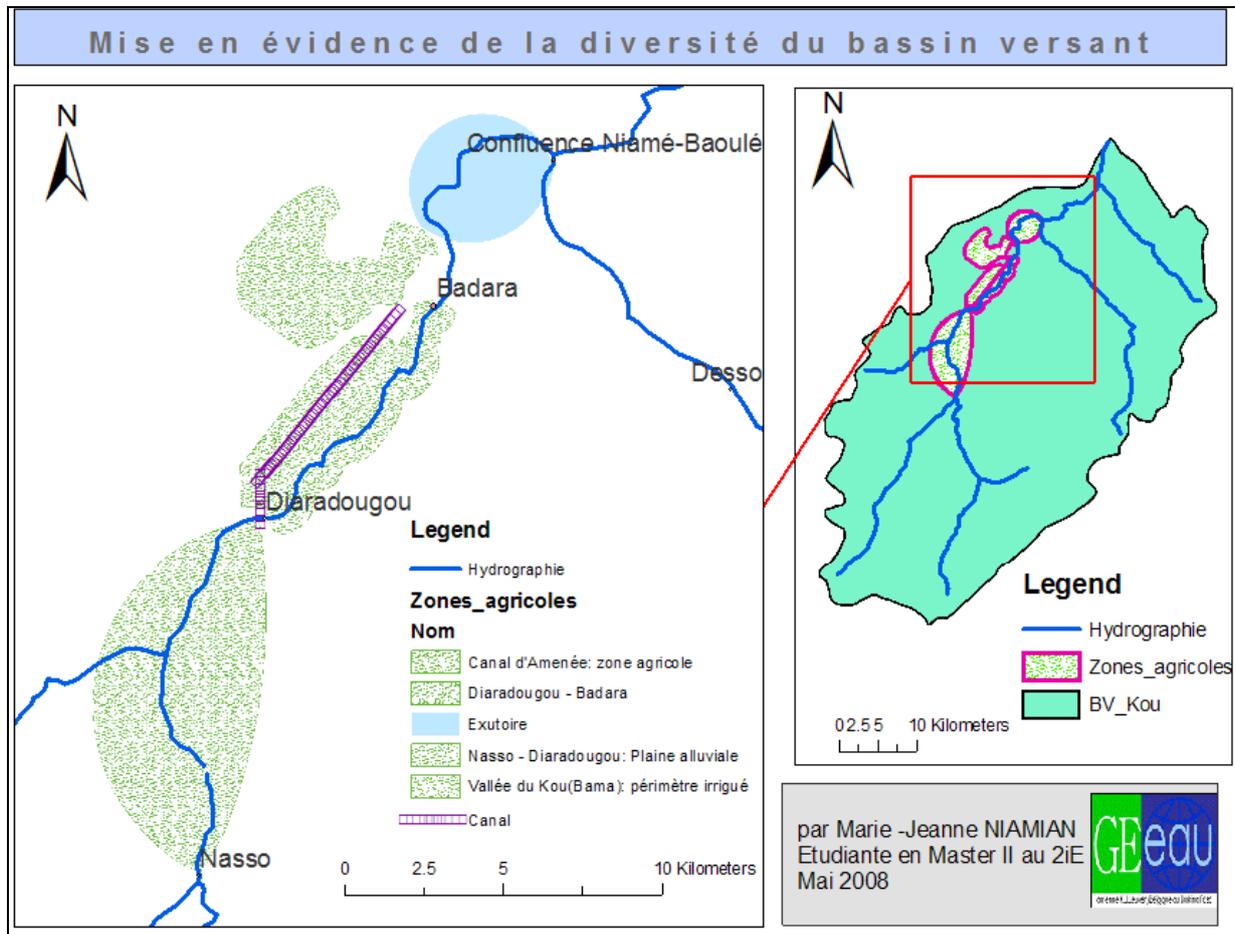
Ces sources sont largement exploitées en partie pour diverses raisons : l'alimentation en eau potable de la population de la région des hauts bassins, l'irrigation de zones agricoles couvrant une superficie totale de près de 3.200 ha ; il s'agit pour l'essentiel de périmètres privés formant la ceinture maraîchère et horticole de Bobo-Dioulasso et du grand périmètre rizicole de 1.200 ha réalisé par l'Etat à Bama et spécialisé dans la production du riz.

Ce bassin est donc par excellence un lieu privilégié d'expression et de satisfaction des besoins en eau pour les hommes qui y vivent, pour leurs activités et pour l'environnement (Diallo, 1998).

Mais, Depuis la décennie 1980, Le bassin versant du Kou est le théâtre de différentes formes de conflits entre exploitants agricoles, au sujet de la satisfaction des besoins en eau généralement dans des zones sous irrigation : Exploitation anarchique des ressources en eau, exploitants prélevant frauduleusement l'eau, etc. (GEeau, rapport technique N°1 2005-2006).

En effet, dans la région, on y observe une importante immigration (notamment dans les zones agricoles de Diarradougou), du fait de l'existence d'immense potentialité permettant des cultures de contre-saison (Ouédraogo et al. 2004).

La carte 1.1 ci-dessous donne une idée de la diversité du bassin du Kou.



Carte 1.1: bassin versant du Kou avec les zones agricoles

Ce fait engendre naturellement une augmentation de la demande en eau qui, quand elle n'est pas satisfaite engendre des conflits.

En outre, l'accroissement démographique enregistré à l'échelle du bassin versant crée une situation concurrentielle entre besoins domestiques, besoins agricoles, besoins pastoraux, etc. Or de nombreuses études sur le sahel, le Burkina Faso en particulier, montrent une tendance à la baisse de la pluviométrie due à une migration des isohyètes vers le sud (l'Hôte et Mahé, 1996 ; Moussa, 2006).

La contribution à l'amélioration de la connaissance, de la gestion et de la protection des ressources en eau est apparue comme une réponse cohérente à ce problème. C'est dans ce contexte difficile que s'inscrit la présente étude, effectuée dans le cadre du projet GEeau « renforcement structural de la capacité de gestion des ressources en eau pour l'agriculture dans le bassin du Kou ».

Cette étude consiste à réaliser le bilan d'eau du bassin versant du Kou afin de permettre à terme une meilleure connaissance du niveau des ressources en eau du bassin, préambule à une meilleure gestion de ces ressources.

Cela favorisera une meilleure répartition des ressources en eau entre les besoins (domestiques et agricoles), la prévention et la gestion des conflits liés à l'usage de l'eau, l'amélioration des rendements des cultures.

■ ORGANISATION DU RAPPORT

Le présent document présente le contenu de cette étude selon le plan suivant :

Le **chapitre I** concerne l'Introduction Générale permettant de situer le cadre, le contexte et la problématique de la présente étude.

Le **chapitre II** est consacré à la présentation des principaux objectifs de l'étude. Il s'agit notamment de l'objectif global suivi des principaux objectifs spécifiques.

Le **chapitre III** aborde les méthodes adoptées et matériels utilisés dans le cadre de la présente étude. Celui-ci décrit successivement la zone d'étude, la méthodologie adoptée pour l'établissement du bilan d'eau, les outils et données utilisées. Ce chapitre traite aussi de la mise en œuvre du modèle.

Le **chapitre IV** est consacré à la présentation des résultats obtenus, suivie d'une interprétation. On s'efforce d'analyser la représentativité de chaque terme en vue d'amélioration la compréhension hydrologique du bassin versant du Kou.

La **dernière partie** (chapitre V) traite des analyses et discussions générales concernant les principaux termes du bilan d'eau. Différents scénarios sur les résultats obtenus y sont exposés.

La conclusion générale synthétise les principaux résultats de l'étude, suivie de quelques recommandations quant à une éventuelle amélioration à apporter à cette étude.

CHAPITRE II: OBJECTIFS DE L'ETUDE

II.1.OBJECTIFS

II.1.1. OBJECTIF GLOBAL

L'objectif global de cette étude est la réalisation du bilan d'eau du bassin versant du Kou dans l'optique de la mise en place future d'un outil de gestion des ressources en eau du bassin.

II.1.2. OBJECTIFS SPECIFIQUES

Les objectifs spécifiques peuvent être résumés comme suit:

- Evaluer et analyser les différents termes mesurables du bilan d'eau du bassin versant du Kou. Cela consiste à reconstituer sur une période donnée les flux d'eau entrant et sortant du dit bassin,
- Estimer et analyser les différents termes non mesurables du bassin versant du Kou à l'aide d'une modélisation hydrologique,
- Etablir le bilan hydrologique à l'échelle du bassin versant du Kou et analyser la fermeture de ce bilan,
- Améliorer la compréhension de l'hydrologie du bassin versant du Kou.

II.2-RESULTATS ATTENDUS

Les résultats attendus sont :

- Une bonne estimation des différents termes du bilan d'eau (ruissellement, infiltration, évapotranspiration, etc.)
- Une meilleure compréhension du fonctionnement hydrologique du bassin versant du Kou.

CHAPITRE III: METHODES ET MATERIELS

III.1. MILIEU D'ETUDE

III.1.1. PRESENTATION DU PROJET GEEAU

Le projet GEeau « renforcement structural de la capacité de gestion des ressources en eau pour l'agriculture dans le bassin du Kou » est une intervention de la Région Wallonne de la Belgique en collaboration avec la Direction de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques des Hauts Bassins (DRAHRH-HB), l'Association pour l'Eau, le Développement et l'Environnement(AEDE) et l'Université de Liège(ULg).

L'objectif global de ce projet est de développer des outils qui peuvent aider à mieux gérer l'eau et qui ont la capacité de formuler une estimation précise du rendement des cultures pluviales dans la région du Sud-ouest.

Et pour atteindre ses objectifs, l'Etat Burkinabé a adopté comme stratégie : « Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) ». La mise en œuvre du projet s'articule en deux phases :

- la première phase s'est déroulée de 2002 jusqu'à fin 2004 sous l'encadrement de K.U.Leuven, Département Gestion des terres et de l'EIER.
- La deuxième phase en cours depuis Janvier 2005 est sous l'encadrement technique d'opérateurs de la coopération Wallonne : APEFE, DRI, CGRI avec l'appui scientifique de l'Université de Liège (ULg).

Au cours de la première phase, l'objectif du projet était de renforcer la capacité de gestion de l'eau par le développement d'outils relatifs :

- A la prévision des rendements et productions agricoles,
- Au suivi-évaluation des aménagements hydro-agricoles tant du point de vue technico-économique qu'environnemental.

En ce qui concerne la deuxième phase, deux volets d'action complémentaires sont considérés :

- Un volet gestion de l'eau pour l'agriculture avec pour objectifs opérationnels : le développement d'outils relatifs à la planification, gestion et protection des ressources en agriculture ; appropriation des outils développés par les acteurs concernés ; accompagnement de la mise en place d'un observatoire de l'eau ; renforcement des capacités par des formations diplômantes et encadrement d'étudiants.

Un volet de gestion des ressources en eau souterraine avec pour objectifs opérationnels : l'amélioration des connaissances sur les ressources en eau pour la compréhension du fonctionnement des systèmes aquifères, des potentialités des ressources en eau, de la vulnérabilité des ressources.

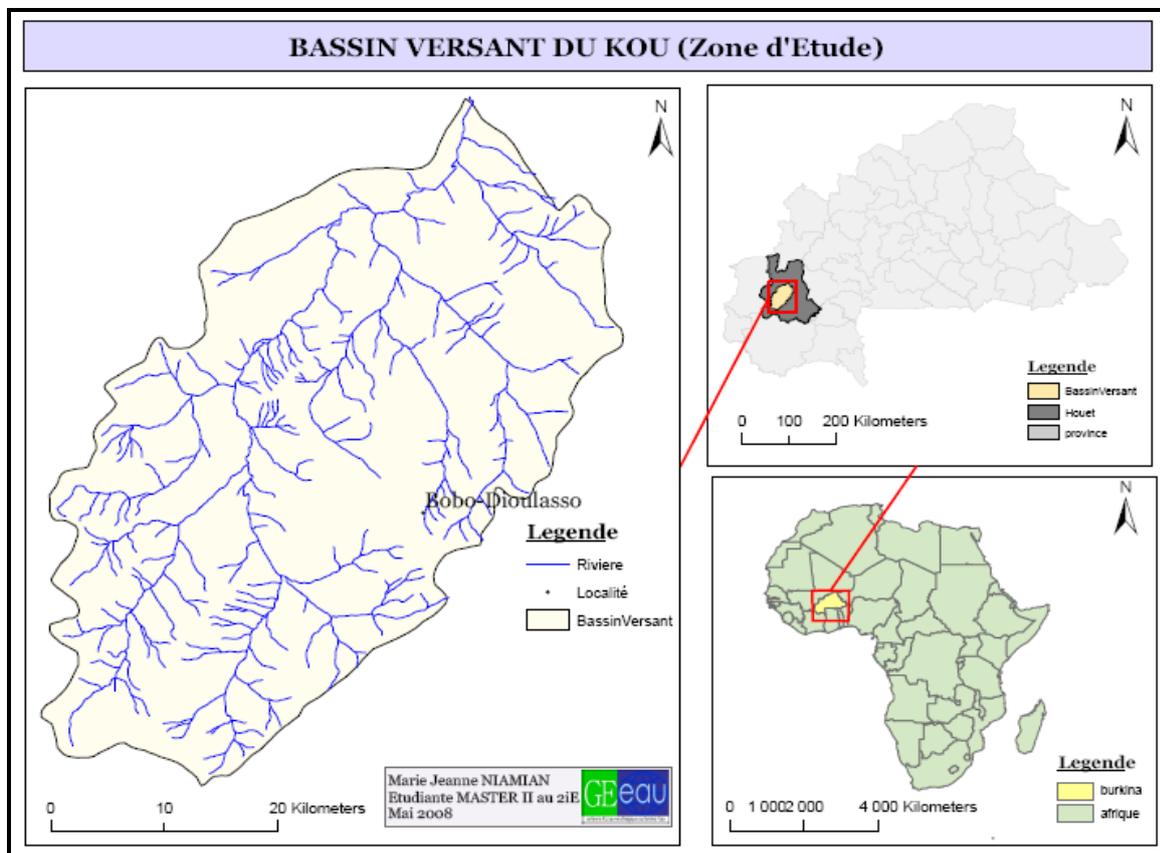
III.1.2. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

La zone d'étude intéresse le bassin versant du Kou et notre description porte sur la détermination des différents facteurs (géographiques et climatiques) intervenant dans le cycle hydrologique d'un bassin versant.

III.1.2.1-FACTEURS GEOGRAPHIQUES

III.1.2.1.1-Situation et cartographie

Situé à l'ouest du Burkina Faso et précisément dans la région des Hauts-Bassins, dans la province du Houet entre les longitudes 4°40'O et 4°10'O et les latitudes 11°N et 11°30N, le bassin versant du Kou présente une surface de 1823 km² et constitue un sous bassin du bassin du Mouhoun. La carte 3.1 ci-dessous met en évidence sa situation géographique.



Carte 3. 1:situation géographique du bassin versant du Kou

Il est orienté Nord-est /sud-ouest et se subdivise en trois (3) sous-bassins principaux, à savoir: Koumi (347 km²), Badara (989 km²), Confluence Niamé-Baoulé (1065 km²).

Le bassin versant du Kou est drainé par la rivière Kou, un affluent du Mouhoun. Il est formé essentiellement par un plateau gréseux culminant aux environs de 500 m au sud, pour s'abaisser progressivement jusqu'à 300 m à l'aval, point de confluence avec le Mouhoun. L'altitude moyenne est de 407 m. (Chabi, 2003).

Ce bassin a une forme allongé sur le plateau sédimentaire Ouest Burkinabé, orienté Sud-ouest-Nord-est parallèlement à la bordure du plateau englobant la ville de Bobo-Dioulasso à l'Est et les localités de Péni au Sud, Souroukoundinga, et Bama à l'Ouest et Nord-Ouest. (Ouedraogo, 2007).

III.1.2.1.2-Hydrographie et régime hydrologique

Le réseau hydrographique est l'ensemble des cours d'eau qui recueillent les eaux des sources et de ruissellement des versants et dépend de la combinaison de nombreux facteurs tels que le climat, la géologie, la topographie et l'érosion.

Le bassin versant du Kou est un sous-bassin du fleuve Mouhoun, l'un des principaux cours d'eau du Burkina Faso. Il a un réseau hydrographique dense et est constitué d'un ensemble de rivières, sources, et mares. Le cours d'eau principal est la rivière Kou.

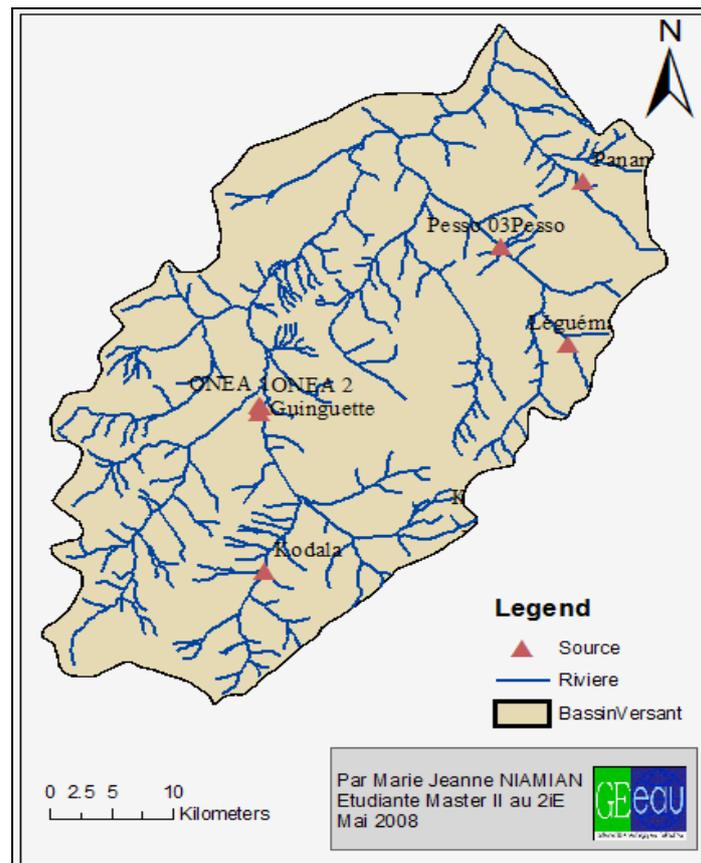
Issue de la jonction des marigots Kiené et Farako-Bâ, cette rivière est le premier affluent important de la rive droite du Mouhoun et prend sa source à une trentaine de kilomètres au Sud-Ouest de Bobo-Dioulasso dans la région de Péni.

Elle est alimentée par le biais des sources de Nasso (dite « Guinguette ») situées à 15 km à l'Ouest de la ville de Bobo-Dioulasso, et par de nombreux ruisseaux au Sud-ouest.

Vers le Nord, les sources de Pessa à 20 km au Nord de Bobo-Dioulasso et Desso alimentent également les ruisseaux qui se jettent dans le Kou (Ouedraogo, 2007).

Pour ce qui est des mares, nous distinguons : celle de Bama localisée dans le lit du marigot Bongo et celle de Toungbagama située dans le lit du Tumbagama qui est un petit affluent du Kou (Mamadou, 2006 ; Ouedraogo, 2007).

La configuration du réseau hydrographique est présentée sur la carte 3.2 suivante :



Carte 3. 2:réseau hydrographique du bassin versant du Kou

III.1.2.1.3-Caractéristiques morphologique et pédologique

Le bassin versant est orienté Nord-est /sud-ouest. Il a une forme allongée avec une soixantaine de kilomètres dans le sens de sa plus grande longueur et une trentaine de kilomètres dans le sens de sa plus grande largeur (Chabi, 2003). Il est constitué essentiellement par un plateau gréseux culminant aux environs de 500 m au sud pour s'abaisser progressivement jusqu'à 300 m à l'aval de la plaine vers le point de confluence avec le Mouhoun.

L'altitude moyenne est d'environ 407 m. Au Sud-ouest, les terrains sont fortement entaillés par le réseau hydrographique. Vers le Nord, se développent des plaines inondables.

La falaise gréseuse de Banfora avec une altitude moyenne qui oscille entre 300 et 400m, limite le bassin vers l'Est (SAURET, 2007). Les différentes caractéristiques de forme sont résumées dans le tableau 3.1.

Tableau 3. 1: *principaux caractéristiques de forme du bassin (Traoré, 2007)*

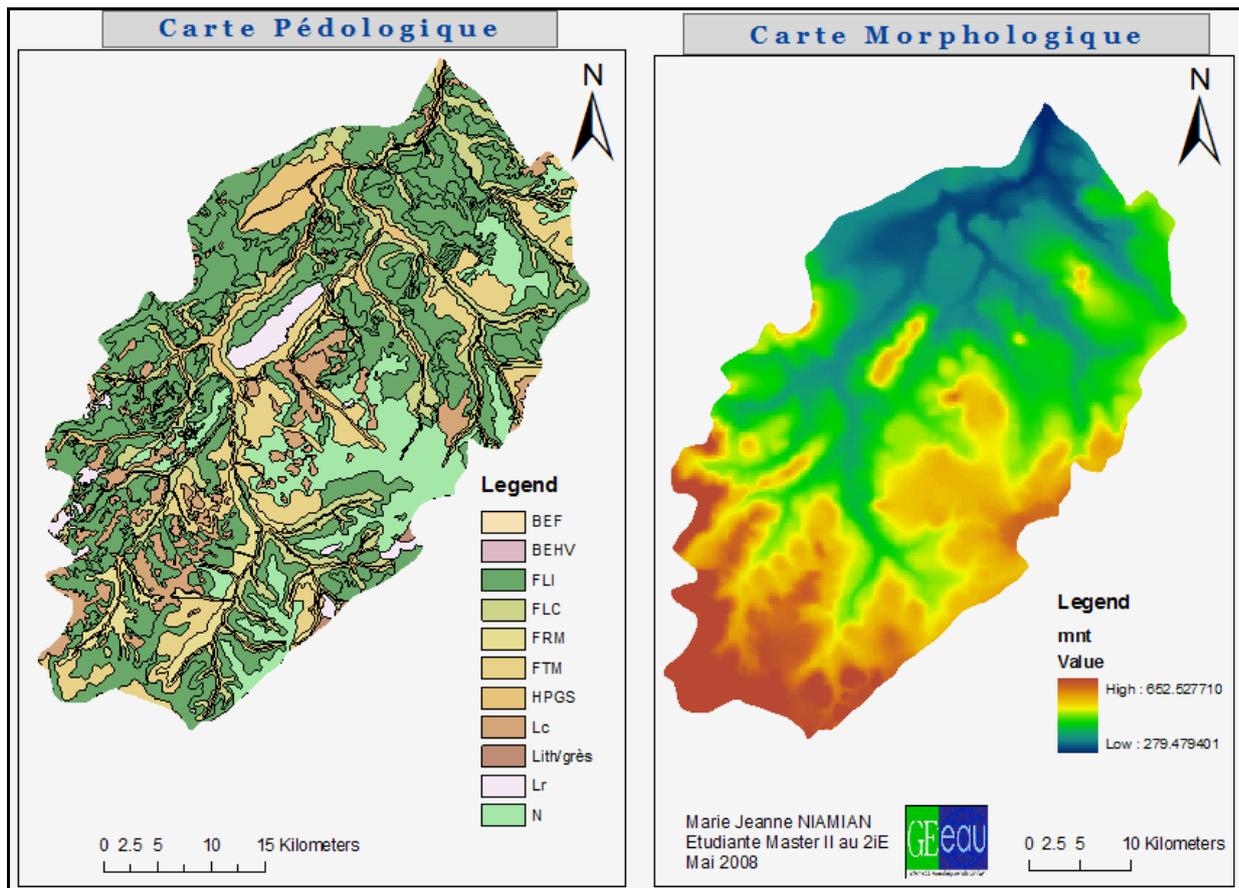
Superficie (Km ²)	1823
Périmètre (Km)	201.37
Coefficient de compacité de Gravelius	1.33
Longueur du rectangle équivalent	77.01
Largeur du rectangle équivalent (Km)	23.67
Indice de pente de Roche (m/Km)	2.02
Indice de pente global (m/Km)	3.17
Altitude moyenne (m)	407
Altitude maximale (m)	500
Altitude minimale (m)	300
Dénivelée (m)	200

Les sols du secteur d'étude sont : les sols peu évolués d'érosion sur matériaux gravillonnaires, les vertisols sur alluvions ou matériaux argileux, les sols ferrugineux tropicaux peu lessivés sur matériaux sableux sols sablo-argileux, argilo-sableux, et les sols ferralitiques.

On distingue deux catégories selon leur profondeur :

- les sols profonds (>100cm) constitués de :
 - sols argileux-sableux en surface et argileux en profondeur,
 - sols limono-argileux en surface et argileux en profondeur,
 - sols sableux en surface, argileux en profondeur.
- les sols à faibles profondeurs (< 40cm) : ce sont les sols gravillonnaires.

La carte pédologique et morphologique du bassin versant du Kou (voir carte 3.3 ci après), a été faite à partir des données du BUNASOLS (Bureau National des Sols) présentent dans la base de données du projet Eaux Souterraines (ESO).



Carte 3. 3: *pédologie et morphologie du bassin versant (Source : Projet Eaux Souterraines)*

Un tableau descriptif des types de sols indiqués sur la carte pédologique, est présenté en annexe 9.

III.1.2.1.4-Géologie et hydrogéologie

Les formations géologiques du bassin versant du Kou sont les suivantes :

- les grès fins glauconieux (GFG) de Takalédougou constitués de grès grossiers conglomératiques glauconieux et de minces niveaux de grès fins, avec parfois un aspect schisteux.
- les grès à granules de quartz (GGQ) composés de grès quartzites fins à moyens avec des passées de grès grossiers à gros galets.
- les silstones, argilites et carbonates de Guéna-Souroukoudinga (SAC 1).
- les grès fins roses de Bonvalé (GFR) composés de grès très fins, roses à violacés, finement lités et très micacés.

Au niveau de l'hydrogéologie, le bassin versant est caractérisé par l'alternance de dépôts perméables et moins perméables, favorables à l'existence de couches aquifères.

D'après Sauret (2007), on classe ces différents aquifères¹ en deux (2) systèmes :

- le système aquifère superficiel représenté généralement par le complexe fluvio-lacustre du Continental Terminal qui forme une nappe très régulière et de grande extension du Burkina.
- Le système aquifère profond est discontinu et correspond à la partie fissurée et fracturée par un réseau de méga-linéaments traversant les grès, calcaires, silexites et schistes compartimentées par des réseaux de failles ouvertes (perméables) de direction Nord-ouest Sud-est et de failles étanches de direction Sud-ouest - Nord-est.

III.1.2.1.5-Occupation des sols et végétation

La distribution présentée sur la carte d'occupation du sol du bassin versant du Kou élaborée par le Projet GEeau, conjointement avec le Projet d'Aménagement Participatif des Forêts Classées de Dindéresso et du Kou (PAFDK) carte montre que :

- le bassin est couvert en grande partie par des terrains agricoles (zones de culture et le périmètre irrigué de la vallée du Kou), avec des zones urbaines (en particulier la ville de Bobo), les zones de forêts et des formations végétales naturelles (savanes arborées et arbustives).
- Sur le bassin versant, on rencontre aussi des zones inondables, des plans d'eau, des zones nues ou érodées.

D'après des études antérieures citées par Traoré (2007), la végétation sur le bassin du Kou est composée des types de formations suivantes :

- la végétation aquatique dans les lits des rivières guinguette et Kou, dominée par *Nymphaea lotus* et *Potamogeton octandrus* ;
- la forêt galerie formant une véritable ceinture autour de la guinguette et du Kou et 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* ;

¹ : Formation géologique suffisamment perméable pour emmagasiner l'eau, permettre son évacuation et alimenter des puits, des sources et des zones humides.

- la savane arborée dominée par *Anogeissus leiocarpus* et *Azelia africana* ;
- la savane arbustive sur les glacis.

III.1.2.2- FACTEURS CLIMATIQUES

Le bassin versant du Kou se situe dans la zone soudanienne. Le climat est caractérisé par l'alternance de deux saisons bien distinguée, à savoir une saison des pluies (de mi-mai à octobre soit 4 à 5 mois) une saison sèche (d'octobre à mai soit 7 à 8 mois). L'alternance de ces saisons est conditionnée par le déplacement annuel du Front Intertropical (FIT).

Ce climat est influencé par les principaux facteurs suivants : la pluviométrie, l'évapotranspiration, les températures, les vents, le rayonnement solaire et l'humidité.

III.1.2.2.1- Températures, vent, rayonnement solaire et humidité relative

Le vent soufflant en saison sèche est l'harmattan, vents chauds, secs et continental des anticyclones du Sahara de secteur Nord-Est à Est. Pendant l'hivernage, c'est la mousson qui prévaut des vents de secteur Sud-Ouest chargés d'humidité, provenant de la zone équatoriale.

La température est maximale de mars à mai (Température moyenne maximale: 37°C) et minimale en janvier et décembre (Température moyenne minimale : 20°C).

L'humidité relative de l'air est très faible en saison sèche (20 % à 40 %) tandis qu'en saison des pluies elle peut atteindre 70 % à 80 % voire 90% au cours des averses.

La durée moyenne d'ensoleillement est de 7 h 42'. L'insolation est minimale en août (5,8 h) et maximale en janvier (9,2 h) (Mamadou, 2006 ; Sogreah Ingénierie, 1994).

III.1.2.2.2- Pluviométrie et évapotranspiration

Le bassin versant du Kou est marqué par une baisse de la pluviométrie liée à une migration des isohyètes vers le Sud constatée dans la sous région.

Toutefois, selon des études récentes (Ozer & Erpicum, 1995), on observe une remontée des isohyètes vers le nord.

La pluviométrie moyenne annuelle sur le bassin varie de 900 à 1500 mm sur la période 1980 à 2001 tandis que l'évapotranspiration moyenne annuelle est de l'ordre de 2000 mm.

Les données issues des stations de Bobo Dioulasso et de Bama, font ressortir des valeurs élevées d'évapotranspiration en mars-avril, en saison sèche et en décembre pour la station de Bama, située à proximité de la vallée du Kou.

III.2-BILAN D'EAU DU BASSIN VERSANT DU KOU : *cadre théorique*

III.2.1-PRINCIPE DU BILAN D'EAU

Le principe du bilan d'eau est fondé sur le fait que l'eau qui parvient à la surface de la Terre s'écoule ou s'évapore. Les calculs se font dans le cadre de l'unité hydrologique qu'est le bassin versant (portion d'espace dans laquelle est concentrée la totalité de l'alimentation d'un cours d'eau, et qui n'est drainée que par lui).

Dans ce cadre, l'équation du bilan s'écrit : ***apports = écoulements + évapotranspiration.***

Si toutefois on se place dans une période trop courte, il faut en outre tenir compte des mises en réserve ou, au contraire, de l'utilisation des réserves en eau du sol ou du sous-sol.

Le bilan d'eau sert à contrôler la validité des données qui ont servi à l'établir et permet en plus, d'évaluer le poids de chacun des termes dans le cycle de l'eau (Z. Bergaoui, 1991).

III.2.2-PRINCIPAUX TERMES DU BILAN D'EAU

Les eaux sur la terre se meuvent dans un cycle hydrologique, qui traduit la loi de conservation de la masse. Mais, du point de vue de l'ingénieur, on s'intéresse :

- Aux apports d'eau, principalement les précipitations,
- Aux écoulements de surface,
- A l'évapotranspiration,
- A l'infiltration.

Qui constituent les composantes principales du cycle de l'eau.

Les autres composantes de l'écoulement à l'exutoire sont l'écoulement de subsurface et l'écoulement souterrain qui proviennent respectivement de l'eau infiltrée en zone non saturée et de l'eau des nappes souterraines.

La figure 3.1 résume ces processus hydrologique sur un bassin versant.

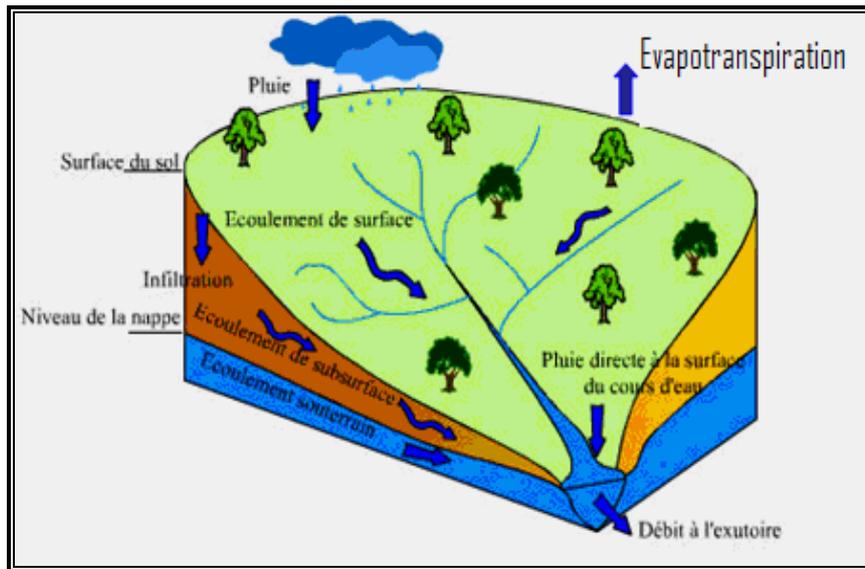


Figure 3.1: schéma illustratif des termes du bilan d'eau (source EPFL, LATE/HYDRAM)

L'estimation des quantités d'eau passant par chacune de ces étapes du cycle hydrologique peut donc se faire à l'aide d'une équation de bilan appelée "**bilan d'eau**" qui représente le bilan des quantités d'eau entrant et sortant d'un système défini dans l'espace (bassin versant) et dans le temps. Etablir alors le bilan en eau du bassin versant du Kou sur une période donnée suppose que l'on puisse estimer les quantités d'eau qui entrent ($\Sigma_{entrées}$) et qui sortent ($\Sigma_{sorties}$) de ce dit bassin.

Ce bilan d'eau fondée sur l'équation de continuité consiste à comparer la quantité d'eau totale arrivant dans le bassin versant avec la quantité d'eau totale sortant et s'écrit dans sa forme la plus générale :

$\Sigma_{entrées} - \Sigma_{sorties} = \Delta R$ avec : ΔR = variation des réserves en eau qui cumule les variations de stockage de l'eau dans le sol (ΔR_{Zns} ou ΔS) et la variation de stockages superficiels (ΔR_s dans les dépressions, retenues d'eau, etc.)

Le but de cette étude est d'évaluer et d'analyser les différents termes du bilan d'eau pris individuellement. Ceci revient à mesurer, calculer ou estimer chacun de ces termes à partir de certaines données : pluviométriques, hydrométriques, évapotranspiration, ...etc.

Cependant, dans le cadre du bassin versant du Kou qui fait l'objet de notre zone d'étude, ceci se révèle assez complexe dans la mesure où certaines données relatives à des termes du bilan d'eau ne sont pas toujours de bonne qualité ou n'existent pas du tout simplement.

On doit donc se baser sur la bibliographie des travaux déjà réalisés pour la détermination de certains termes.

Néanmoins, il est à noter que certaines données résultant de simulations (données reconstituées), ne sont toujours pas fiables car souvent biaisées ou ne reposant pas sur de solides fondements.

En effet, nous ne savons pas quantifier avec exactitude certains termes du bilan d'eau, car n'ayant pas toute la connaissance des paramètres qui régissent ces termes (Ex : variation de stock, ...). Or certains termes du bilan sont plus ou moins interdépendants,

Ce qui implique que de l'estimation la plus précise possible de certains termes dépendra l'estimation d'autres termes et par suite, l'exactitude du bilan. A titre d'exemple, d'après Musy et Soutter (1991), l'infiltration et les débits de ruissellement sont interdépendants et déterminés par les précipitations et l'état du sol.

C'est pourquoi, au stade de notre étude, nous allons subordonner les principaux termes possibles du bilan d'eau à l'ensemble des données existantes (données qui reflètent la réalité d'une manière implicite) sur notre zone d'étude (bassin versant du Kou).

Il s'agit notamment de :

- la pluviométrie et l'évapotranspiration qui reflètent les phénomènes climatologiques.
- Le débit, mesuré à l'exutoire qui révèle le fonctionnement hydrologique du bassin versant.

En tenant compte de toutes ces hypothèses, nous aboutissons à une équation plus légère du bilan d'eau se présentant comme suit :

$P = R + ETR + I + \Delta R_S$ (mm) avec:

P= précipitations [mm],

R=ruissellement ou écoulement de surface et écoulement souterrain [mm],

ETR= évapotranspiration réelle [mm],

I= infiltration [mm].

ΔR_S = variation de stockages superficiels (dépressions, retenues d'eau, etc.). Mais, à l'échelle annuelle le terme de variation de stock peut être négligé.

III.2.3- REVUE DETAILLEE DES PRINCIPAUX TERMES DU BILAN D'EAU

On peut mesurer ou déterminer par calcul chacun des termes du bilan hydrologique et cette revue détaillée permet de mettre en exergue les caractéristiques de chaque terme.

III.2.3.1-Précipitation (P)

Ce terme est déterminé directement à partir des données pluviométriques enregistrées. Etant donné la variabilité de la pluie dans l'espace, nous utilisons les données provenant de plusieurs stations pour avoir une estimation convenable de la quantité d'eau réellement tombée sur le bassin-versant. La pluie considérée est donc la moyenne obtenue par la méthode de Thiessen.

III.2.3.2-Ruissellement (R)

Ce terme encore appelé « lame d'eau écoulée » est déterminé à partir des données hydrométriques. Mais dans le bassin versant du Kou, il est très important de noter que le débit mesuré à certains exutoires n'est pas représentatif de la lame d'eau écoulée car il faut tenir compte des prélèvements. Tel est le cas de Badara où l'on assiste à des prélèvements effectués à la prise d'eau de Diaradougou pour l'alimentation des périmètres irrigués de la vallée du Kou.

III.2.3.3-Evapotranspiration réelle (ETR)

Ce terme désigne au départ les pertes d'eau par retour direct à l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau. Il correspond à la somme de la quantité d'eau qui s'évapore depuis un sol (évaporation) et de la quantité d'eau évaporée par la végétation qui le recouvre (transpiration). L'évapotranspiration est, après la précipitation, le terme le plus important du bilan hydrologique, tout au moins dans les pays chauds. (Roche, 1963).

Ce terme fait partie des termes les plus complexes de l'équation du bilan, dans la mesure où sur le bassin versant du Kou, il n'y a aucun suivi de l'évapotranspiration réelle, tel n'est pas le cas pour la précipitation et l'hydrométrie.

L'ETR peut être déterminé par modélisation à partir des données d'ETP (Evapotranspiration potentielle) qui correspondent à l'évapotranspiration dans des conditions optimales pour les cultures dans lesquelles l'eau n'est pas un facteur limitant, c'est à dire la quantité maximale d'eau qu'utilisera une culture lorsque l'apport en eau dont elle dispose est illimité.

Mais, il faut noter qu'une estimation de l'évapotranspiration a été faite sur le bassin versant du Kou dans le cadre du projet GEeau à l'aide de plusieurs méthodes combinées. (Traoré, 2007)

III.2.3.4-Infiltration (I)

L'infiltration qualifie le transfert de l'eau à travers les couches superficielles du sol, lorsque celui-ci reçoit une averse ou s'il est exposé à une submersion. L'eau infiltrée remplit en premier lieu les horizons superficiels du sol et percole par la suite sous l'action de la gravité et des forces de succion. Il peut se former une ou plusieurs nappes. Des écoulements de nappes peuvent alors apparaître. Ils sont le plus souvent latéraux et rejoignent le réseau hydrographique.

Plusieurs méthodes existent dans la littérature pour la détermination de ce terme mais dans le cadre de notre étude, nous utilisons un modèle hydrologique.

III.2.3.5-Variation de stock (ΔR_s)

Ce terme correspondant à la variation de stockages superficiels d'eau est assez dynamique dans le cas de notre étude en ce sens que les points d'eau sont très exploités. Cette variation de stock (ΔS) peut être obtenue suite à un bilan des points d'eau. Cependant, la difficulté réside dans le fait que les variations des niveaux d'eau au niveau des stockages superficiels sont peu connues, ce qui rend difficile la quantification du volume d'eau.

Cependant, si nous considérons un pas de temps annuel pour le calcul du bilan d'eau, nous pouvons faire l'hypothèse que d'une année à l'autre les réserves en eau n'évoluent pas trop et par conséquent, ce terme s'annule.

III.3. APPROCHES METHODOLOGIQUES ET HYPOTHESES

III.3.1. APPROCHES METHODOLOGIQUES

Deux (2) approches distinctes peuvent être suivies pour la détermination des principaux termes du bilan d'eau du bassin versant du Kou. Elles se présentent comme suit :

Approche 1 : le bassin versant du Kou est constitué de trois (3) sous bassins versants tous contrôlés par une station hydrométrique en considérant les sous réseaux hydrographiques du bassin versant.

Cette approche permet de calculer le bilan d'eau du bassin versant du Kou par une combinaison des « sous bilans » effectués pour chaque sous bassin versant.

Approche 2: cette approche opposée à la première consiste à considérer le bassin versant du Kou comme un système unique et de ce fait, rechercher chaque terme du bilan de façon « global » en considérant un seul exutoire (le plus en aval).

Dans le cadre de notre étude, nous utiliserons cette deuxième approche. En effet, la première approche modulaire bien qu'elle permette d'étudier les spécificités de chaque sous bassin versant, puisqu'elle descend à une échelle plus réduite et plus fine (échelle de sous bassin), est assez difficile à mettre en œuvre du fait du réseau de mesure (réseau hydrométrique, notamment) parfois « sinistré », occasionnant de sérieuses lacunes au sein des séries chronologiques de débits (cas de la Confluence Niamé-Baoulé difficilement accessible en saison des pluies car inondée). (Voir plus en détail analyse des données hydrométriques)

C'est pourquoi, dans cette étude, nous faisons le bilan d'eau de manière globale en ce sens que seul le réseau hydrométrique situé à l'aval du bassin a les données les plus complètes.

III.3.2.HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES

La complexité du bassin versant du Kou, marquée par l'indisponibilité et la fiabilité de certaines données relatives, empêchent de procéder à une estimation fiable de certains termes du bilan. Cependant, face à la nécessité de faire une estimation du bilan d'eau de ce dit bassin, il convient de formuler un certain nombre d'hypothèse, en particulier :

- L'établissement du bilan d'eau se fait sur une année hydrologique. Cette hypothèse offre l'avantage de s'affranchir de l'estimation de certains termes complexes du bilan d'eau, comme la variation des stockages superficiels (dans les dépressions, retenues d'eau, etc.).

En choisissant l'année hydrologique, on fait implicitement l'hypothèse que le niveau du stock d'eau varie très peu pour une même période, d'une année à l'autre (cycle hydrologique).

Ce terme serait alors sensiblement nul ($\Delta R_S \sim 0$) et l'équation du bilan hydrologique se résume qu'aux termes : Précipitation (P), lame d'eau écoulee (Le), infiltration (I) et l'évapotranspiration réelle (ETR).

Tout ce qui tombe sous forme de précipitation (P) en un temps donné, soit s'évapore ou est transpiré par les végétaux et repart dans l'atmosphère par évapotranspiration (ET), soit s'infiltré (I) et participe à la recharge des réserves en eau du sol ou du sous-sol, soit ruisselle (R) sur la surface du sol et enrichit les chenaux d'écoulement qui drainent l'eau des différentes parties du bassin versant vers l'exutoire.

La figure 3.2 présente les termes du bilan d'eau que nous aurons à quantifier dans cette étude à partir des données disponibles.

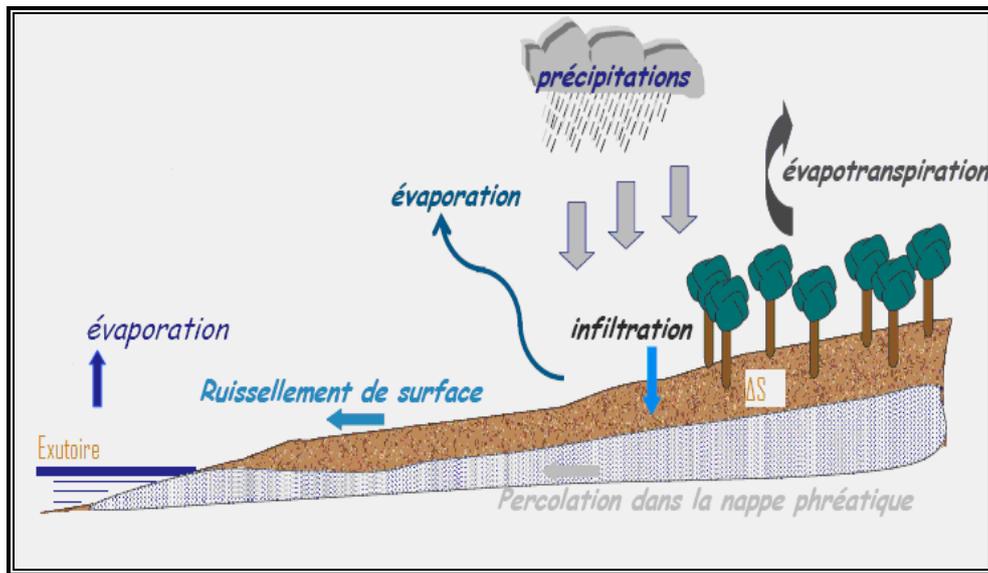


Figure 3. 2: schéma illustratif des termes du bilan d'eau du bassin versant du Kou

Dans l'établissement du bilan d'eau, nous raisonnons en termes de lame d'eau écoulee plutôt qu'en volume. On la définit comme étant la lame d'eau répartie uniformément sur l'ensemble du bassin versant et représente le volume des apports de l'année. On la désigne par la lettre **Le** et on l'exprime en millimètres. Pour l'année, on a donc :

$$1000 * Le = Q * 24 * 3600 * (l/s)$$

$$D'où \quad Le = 86.4 * Q/S$$

Avec $\left\{ \begin{array}{l} Q : \text{module de l'année en m}^3/s \\ S : \text{surface du bassin versant en m}^2 \end{array} \right.$

Si on appelle P la pluviométrie moyenne sur le bassin pour l'année considérée, exprimée en millimètres d'eau, l'équation du bilan pour un cycle complet devient, en tenant compte des réserves que nous avons faites : **P = Le + ETR+I**

III.4. OUTILS UTILISES

Pour mener à bien cette étude, nous avons utilisé un certain nombre d'outils. Il s'agit d'un logiciel de modélisation hydrologique auquel s'ajoutent d'autres outils.

Cependant, nous présentons d'une façon particulière le principal outil qui a fait l'objet d'une mise en œuvre plus poussée afin d'obtenir certains termes du bilan d'eau. Il s'agit du logiciel de modélisation hydrologique HYSIM (Hydrological Simulation Model).

III.4.1- LOGICIEL DE MODELISATION HYDROLOGIQUE « HYSIM »

III.4.1.1- principe de fonctionnement

HYSIM est un modèle conceptuel de simulation hydrologique mis au point par la « water resource associates » de Grande Bretagne et est basé sur le concept de réservoirs linéaires, faisant passer la pluie par une succession de sept (7) réservoirs.

Il est à cheval entre les modèles 'physiques' basés sur l'analyse et la quantification des phénomènes physiques se produisant dans un bassin versant et les modèles empiriques à base de régressions multiples où la physique n'intervient que pour suggérer des variables explicatives.

HYSIM, basé donc sur l'utilisation de schémas à réservoirs permet de définir de manière réaliste l'hydrologie et l'hydraulique de l'ensemble du bassin plus que de nombreux autres modèles et par conséquent à beaucoup de paramètres (24 paramètres).

La structure de base est présentée sur la figure 3.3 :

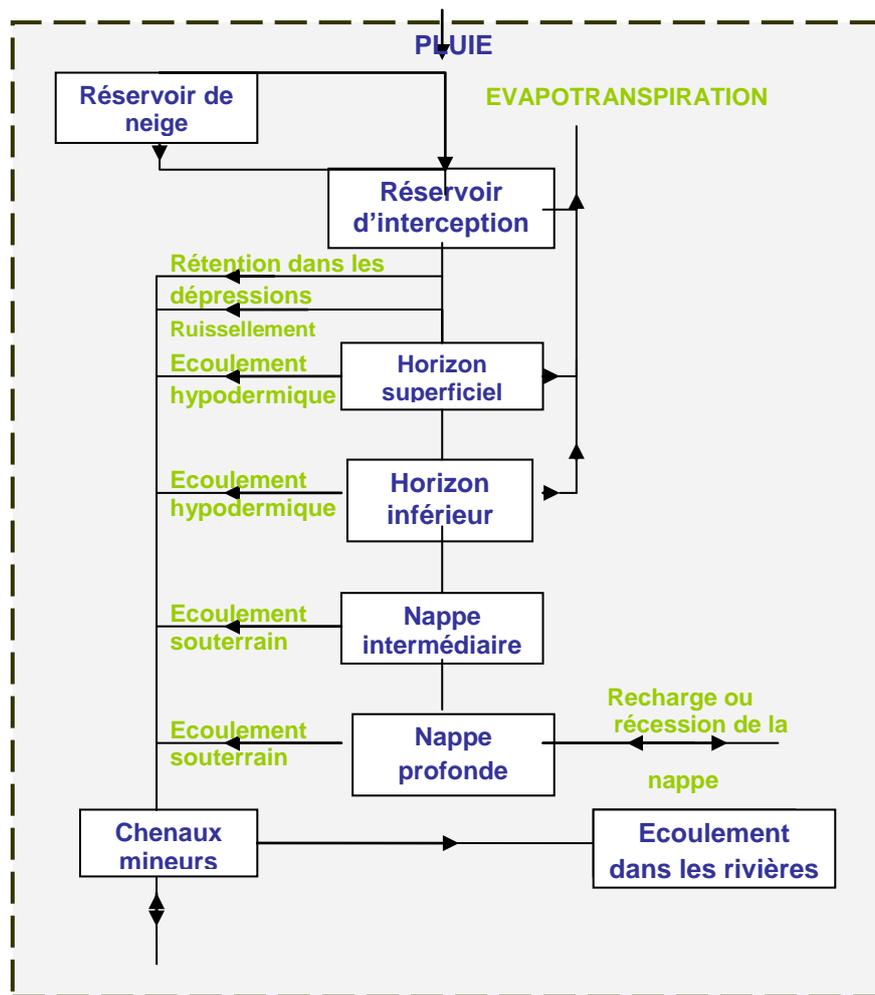


Figure 3.3: structure du modèle hydrologique HYSIM

- ◆ **Réservoir d'interception** : ce réservoir représente la quantité d'eau interceptée par la végétation. Pour qu'il y ait passage d'eau au deuxième réservoir, il faut que la lame précipitée dépasse sa capacité. Le premier appel de ce réservoir est l'évaporation.
- ◆ **Horizon superficiel** : ce réservoir représente la tenue d'humidité dans la partie supérieure du sol (horizon A). Il a une capacité finie, égale à la profondeur de l'horizon multipliée par sa porosité. l'écoulement hypodermique et l'évapotranspiration (qui si la succion capillaire est inférieure à 15 bars, s'établit au taux potentiel) sont les principaux facteurs de réduction de la capacité de ce réservoir.
- ◆ **Horizon inférieur du sol** : il représente l'humidité du sol situé dans la zone racinaire (horizon B et C) en dessous de l'horizon supérieur. De même que le réservoir superficiel, l'évapotranspiration et l'écoulement hypodermique n'ayant pas encore été satisfaits sont les principaux facteurs de réduction de sa capacité.

- ◆ **Nappe intermédiaire** : Ce réservoir correspond à la zone non saturé du sol existant entre la zone racinaire et la nappe phréatique. Il représente les eaux souterraines de transition. De façon plus claire, il s'agit d'un réservoir infini linéaire et représente la première étape de stockage des eaux souterraines. Son fonctionnement est défini par deux paramètres: le coefficient de décharge et la proportion de stockage laissant l'humidité qui pénètre les chenaux.
- ◆ **Nappe profonde** : ce réservoir correspond au stockage des eaux souterraines. Les eaux souterraines sont donc extraites de ce réservoir. De même que la nappe intermédiaire, ce réservoir est infini linéaire et comme dans le cas ci-dessus, le taux de ruissellement peut être calculé explicitement.
- ◆ **Chenaux mineurs** : Cette composante représente l'acheminement des flux dans les petits ruisseaux, les fossés et, si le bassin est saturé, les chaînes éphémères. Il utilise un hydrogramme unitaire, de forme triangulaire, avec un temps de base égale à 2,5 fois le temps de montée.

III.4.1.2- variables d'entrée et de sortie

Les principales variables d'entrée sont la pluviométrie moyenne sur le bassin ou le sous bassin versant considéré et l'évapotranspiration. Mais, HYSIM peut utiliser aussi les données brutes des stations pluviométriques.

Dans ce cas, il effectue le test de double masse, corrige les lacunes et calcule la pluviométrie moyenne. Les principales variables de sortie sont :

- la précipitation, l'évapotranspiration réelle, l'infiltration, les réserves d'eau stockées, la percolation, etc. (en mm)
- le ruissellement (en m³/s).

III.4.1.3- paramètres de calage

Avec tout modèle, assigner des valeurs convenables aux paramètres est crucial à l'exactitude de la simulation. HYSIM tente de recréer au mieux la nature du bassin versant et par conséquent, a plus de paramètres à savoir :

- Huit (8) paramètres hydrauliques : ces paramètres concernent les caractéristiques géométriques, la pente et la rugosité des chenaux.

- 26 paramètres hydrologiques repartis en « paramètres de base » dont leur modulation influence beaucoup les résultats du modèle et « paramètres avancés » car le modèle est peu sensible à leur modulation.

III.4.2- AUTRES OUTILS

Les autres outils utilisés dans le cadre de cette étude sont : les Systèmes d'Information Géographique (SIG) dont ARCGIS 9.0 qui nous a permis de présenter des cartes relatives à la zone d'étude en passant par le logiciel de traitement des données Hydraccess qui nous a permis de visualiser les courbes de jaugeage au niveau de chaque station hydrométrie .

Le SIG a aussi été utilisé pour calculer les valeurs pondérées et spatialisées de certains paramètres par manque de module SIG dans le modèle hydrologique HYSIM.

III.5. DONNEES DE L'ETUDE

III.5.1- SOURCE DE DONNEE

Les données pluviométriques proviennent de la base de données GEeau. Cette base combine à la fois, la base de données PLUVIOM de la Direction Régionale de l'Hydraulique des Hauts Bassins (DRH/HB), la base de données de l'Aéroport de Bobo Dioulasso et de l'INERA, et la base de données de la Direction Provinciale de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques (DPAH/RH) du Houet.

Ces données sont au pas de temps journalier, en ce qui concerne les stations de Bobo Dioulasso et de la Vallée du Kou (Bama). Ces données de pluie sont particulièrement disponibles pour près de treize (13) stations.

Les données hydrométriques proviennent de la base de données HYDROM, générée par les services de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), mais aussi de la base de données hydrométriques du réseau hydrométrique national, de la base de données issue du Projet "Vallée du Kou", et de la base de données du Projet "Ressources en eau de Bobo Dioulasso". Ces données sont au pas de temps journaliers et mensuels.

Les données cartographiques proviennent du projet GEeau et Viennent pour la plupart de l'Institut Géographique du Burkina (IGB), du Programme de valorisation des Ressources en Eau dans le Sud Ouest (RESO). Et sont également les résultats de plusieurs études effectuées par le projet.

III.5.2- ECHANTILLON DE DONNEES UTILISE

III. 5.2.1-Données pluviométriques

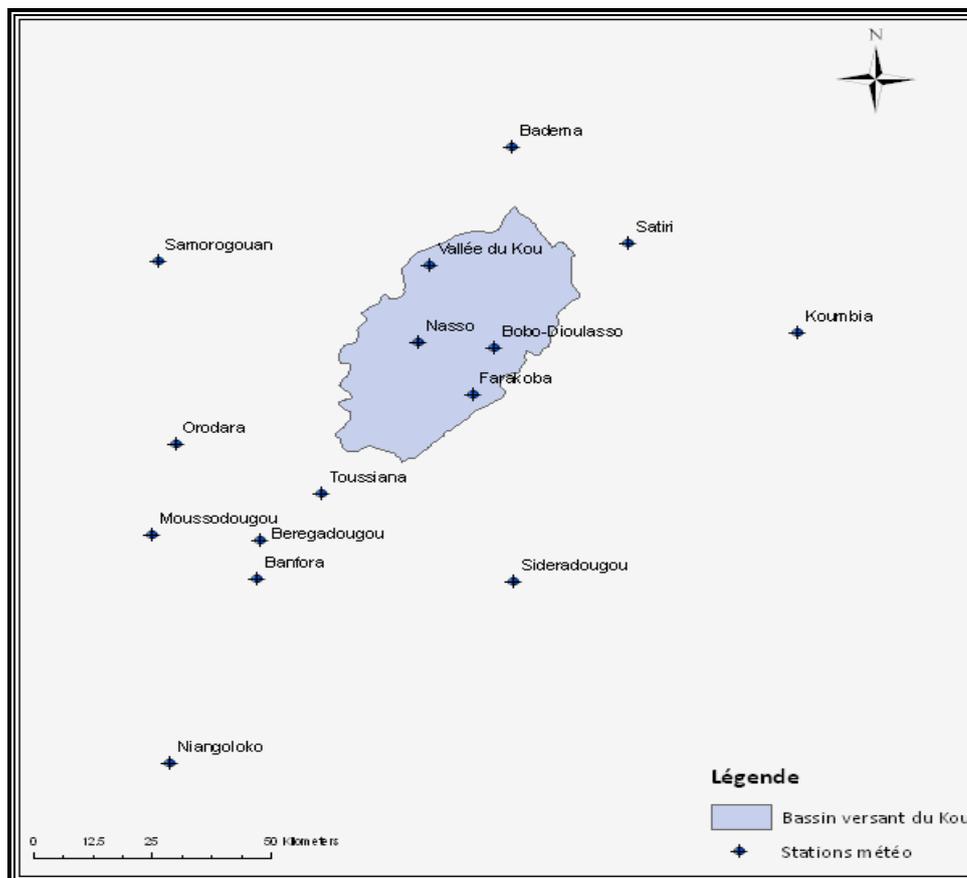
III.5.2.1.1.- Choix des stations pluviométriques

Pour l'étude du bilan d'eau du bassin versant du Kou, nous utilisons comme base de calcul les modules pluviométriques annuels de trois stations. Il s'agit notamment de la station de : Bobo-Dioulasso (stations synoptiques), Farako-Bâ et Bama (stations bioclimatologistes).

Ces stations ont des chroniques assez longues (durée > 30 ans) et des taux de lacunes (données manquantes) acceptables.

La carte 3.4 met en exergue la distribution spatiale de toutes les stations dans le bassin versant du Kou et ses environs.

Au vu de cette carte, nous voyons qu'il existe quatre (4) stations pluviométriques sur l'ensemble du bassin versant du Kou : Bobo-Dioulasso, Farako-Bâ, Bama et Nasso. L'exclusion de la station de Nasso vient du fait que cette station n'est plus fonctionnelle, favorisant une rupture dans sa série chronologique dès l'année 1996.



Carte 3. 4: distribution spatiale des stations pluviométriques du bassin versant du Kou et environs

III.5.2.1.2.- Disponibilité des données

Les données pluviométriques sont dans l'ensemble assez satisfaisantes, en termes de répartition et de longueur des séries chronologiques. Enfin, on y observe peu de lacunes, comme l'atteste le récapitulatif dans le tableau 3.2 ci-dessous.

Tableau 3. 2: *récapitulatif des données pluviométriques disponibles*

Stations	Disponibilité des données		Observations
	Début	Fin	
Bobo -Dioulasso	1959	2005	▪ Série complète
Farako-Bâ	1960	1986	▪ Quelques données sont manquantes pour les années : 1999 à 2003 ▪ Absence de données pour les années : 1987, 1988 et 1992
	1989	1991	
	1993	2005	
Bama (Vallée du Kou)	1986	1987	▪ Quelques données sont manquantes pour les années : 1993, 1994, 1995
	1989	1991	
	1993	2005	

III.5.2.2-Données d'évapotranspiration

III.5.2.2.1.- disponibilité des données

Les données d'évapotranspiration potentielle (ou de référence) sont disponibles pour les stations de Bobo-Dioulasso et Bama sur une période de 43 ans allant de 1961 à 2003. Ces valeurs ont été calculées suivant la formule de Penman-Monteith en fonction des données climatiques (température, ensoleillement, ...). Comme présenté dans le tableau 3.3, toutes les séries sont complètes.

Tableau 3. 3: *récapitulatif des données d'ETP disponibles*

Stations	Disponibilité des données		Observations
	Début	Fin	
Bobo-Dioulasso	1961	2003	▪ Toutes les séries sont complètes
Bama (vallée du Kou)	2000	2000	

Cependant, il faut ajouter qu'une estimation de l'évapotranspiration a été faite dans le cadre du projet GEeau sur l'ensemble du bassin versant du Kou.

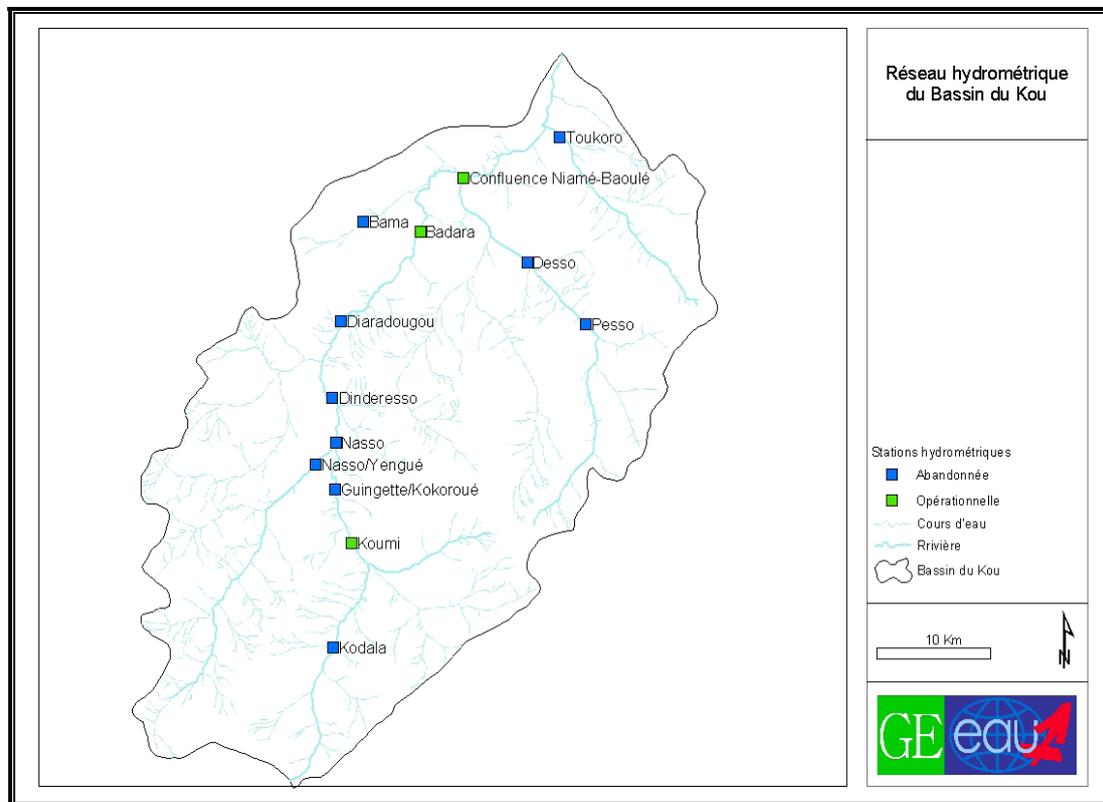
III.5.2.3-Données hydrométriques

III.5.2.3.1.- choix des stations hydrométriques

Nous utilisons les données provenant des trois (3) stations hydrométriques nationales dont : Koumi, Badara et la confluence Niamé-Baoulé.

Cela est dû au fait qu'actuellement parmi les nombreuses stations mises en place sur le bassin versant du Kou, seules ces trois (3) stations dites nationales sont suivies et demeurent fonctionnelles.

La carte 3.5 présente la distribution spatiale de toutes les stations hydrométriques (fonctionnelles ou non) mise en place sur le bassin versant du Kou.



Carte 3. 5: distribution spatiale des stations hydrométriques du bassin versant du Kou

III.5.2.3.2.- Disponibilité des données

Les séries chronologiques de données hydrométriques sont moins longues et moins fournies que celles de la pluie. De plus, la qualité de certaines séries est assez douteuse du fait que les courbes de tarages ou carrément les jaugeages sont extrêmement difficiles à établir lors de l'hivernage à cause des inondations.

Des lacunes sont systématiquement présentes dans la plupart de ces séries.

Le tableau 3.4 ci-après résume la disponibilité des données journalières de débits de ces différentes stations.

Tableau 3. 4: *récapitulatif des données hydrométriques disponibles*

Stations	Disponibilité des		Observations
	Début	Fin	
Koumi	1986	1993	▪ La majorité des séries contiennent des données manquantes
Badara	1984	1993	▪ La majorité des séries contiennent des données manquantes à l'exception de l'année 2000
	1996	2002	
Confluence Niamé-Baoulé	1986	1997	▪ La majorité des séries contiennent des données manquantes à l'exception des années 1993 et 1986
	1999	2000	
	1989	1991	▪ Toutes les séries contiennent des données manquantes.
	1993	2005	

III.5.3– CHOIX DE LA PERIODE D'ETABLISSEMENT DU BILAN

L'équation du bilan d'eau est valable à n'importe quel intervalle de temps, mais n'a d'intérêt que lorsqu'elle est utilisée dans un intervalle ayant une signification hydrologique (année hydrologique; épisode de crue ; saison hydrologique...).

Dans le cadre de notre étude, le choix de l'année hydrologique est fait de manière particulière, en priorité, à partir des données (agro météorologiques) disponibles.

La méthode que nous avons adoptée pour le choix de l'année d'étude, est de faire des croisements entre les séries chronologiques des différentes variables auxquelles, nous nous intéressons pour notre étude de bilan d'eau.

Ces croisements servent à déterminer les années pour lesquelles, il existe un maximum de données journalières disponibles. De ces années, est choisie l'année hydrologique pour cette étude.

Ainsi, comme variables, sont prises en compte les séries chronologiques de pluie, de débits, et des variables climatiques (températures, humidités, vitesse du vent, etc.) mesurées aux stations hydrométriques et météorologiques du bassin versant.

Par conséquent, le choix de l'année se fera pour celle qui sera relativement la plus complète et la plus proche, chronologiquement, de la période actuelle.

Le tableau 3.5 met en évidence la combinaison des données de pluies et de débits, en s'appuyant surtout sur les périodes pour lesquelles sont disponibles les données de débit. Cette période va de 1984 à 2002.

Le manque de données au-delà de cette période est dû, soit à l'absence d'instruments de mesure sur le terrain, soit à l'absence de courbes de tarage actualisées.

Tableau 3. 5: récapitulatif de la combinaison des données disponibles

Années	Pluies				Débits		
	Bobo-Dioulass	Farako-Bâ	Vallée du Kou	Nasso	Koumi	Badara	Confluence Niamé-Baoulé
1984	*	*				*	
1985	*	*		*		*	
1986	*	*	*	*		*	*
1987	*		*	*	*	*	*
1988	*			*	*	*	*
1989	*	*	*	*	*	*	*
1990	*	*	*		*	*	*
1991	*	*	*		*	*	*
1992	*			*	*	*	*
1993	*	*	*	*	*	*	*
1994	*	*	*	*			*
1995	*	*	*				*
1996	*	*	*	*		*	*
1997	*	*	*			*	*
1998	*	*	*			*	
1999	*	*	*			*	
2000	*	*	*			*	*
2001	*	*	*			*	*
2002	*	*	*			*	*

- * Représente les années où les données sont disponibles.
- Représente les années susceptibles d'être choisie pour l'étude du bilan d'eau.
- Représente les années ne disposant pas de données.

Le véritable critère de choix de l'année d'étude, est celui qui tient compte de la disponibilité des données pluviométriques, hydrométriques, mais aussi des données météorologiques permettant le calcul de l'évapotranspiration.

Partant de ce critère, notre attention s'est portée sur l'année **2000**. Le bilan d'eau du bassin versant du Kou sera donc établi pour l'année 2000.

III.6- ANALYSE CRITIQUE DES DONNEES

III.6.1– ANALYSE DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES

III.6.1.1– homogénéité des séries

L'étude de l'homogénéité des séries pluviométriques ne sera pas abordée dans cette étude. Elle a déjà fait l'objet de travaux dans le cadre du projet GEeau. Bicaba (1991), Moussa (2003), Chérif (2006) ont travaillé sur les stations pluviométriques du bassin versant du Kou et parmi lesquelles figurent les stations retenues dans la présente étude. Les valeurs douteuses ont été décelées et reconstituées. Cela à aboutir à une banque de données pluviométriques opérationnelle de bonne qualité.

■ Variabilité de la pluie

Nous présentons les variations annuelles de ces différentes stations de 1965 à 2005.

Nous constatons que pour toutes ces stations, les pluies se concentrent sur la période de mai à mi-octobre (saison des pluies) qui représente plus de 90% de la pluie.

La figure 4.3 ci-après met en évidence ce constat.

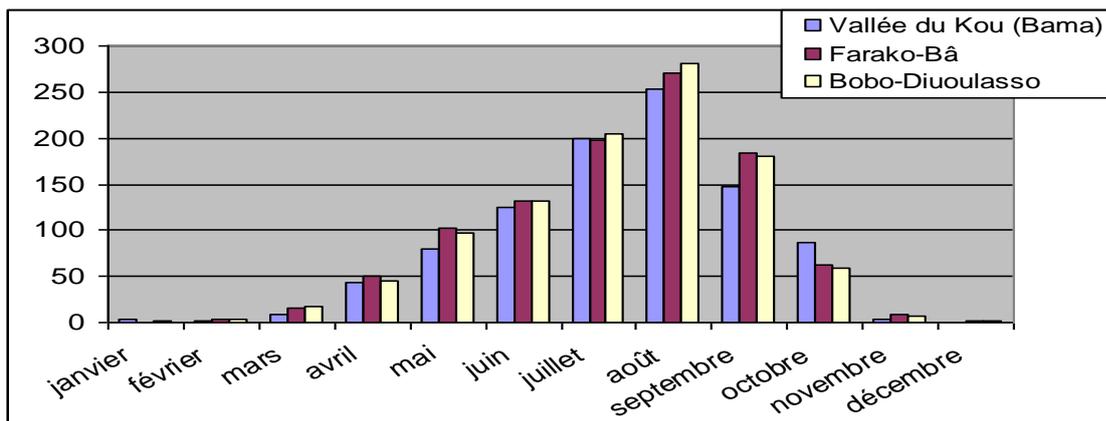


Figure 4. 2: mise en évidence de la variabilité de la pluie au niveau des stations

Toutefois, on observe ces dernières années, une tendance à la baisse de la pluviométrie dû à une migration des isohyètes vers le Sud. (Ozer et Epricum, 1995 ; Moussa, 2006).

III.6.1.2– Précipitations moyennes

Pour la détermination de la pluie moyenne annuelle, nous utilisons la méthode de Thiessen. Le principe de cette méthode est d'évaluer la hauteur moyenne des précipitations pour un pas de temps donné, sur un bassin ou une région d'après la moyenne pondérée des enregistrements pris à plusieurs stations. Le facteur de pondération d'une station est la superficie du polygone formé par les médiatrices des segments d'union entre cette station et les stations environnantes. Le polygone de Thiessen est présenté en annexe 1.

La précipitation moyenne sur le bassin est donc calculée par :

$$P_{moy.} = \frac{\sum A_i P_i}{A} \quad \text{Avec :}$$

P_{moy} = précipitation moyenne sur le bassin ;

P_i = la précipitation enregistrée à la station i ;

A = aire totale du bassin ;

A_i = la superficie du polygone associé à la station i .

Ainsi, nous calculons la pluviométrie moyenne annuelle de notre année d'étude (année 2000) pour chaque sous bassin versant, avec les données pluviométriques journalières de Bobo Dioulasso, Bama et Farako-Bâ.

Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau 4.4 ci-dessous.

Tableau 3. 6: *tableau récapitulatif de la pluviométrie moyenne au niveau de chaque station*

Stations pluviométriques	Station hydrométrique de Badara			Station hydrométrique de la confluence Niamé-		Station hydrométrique de Koumi	
	Farako-bâ	Bobo-Dioulasso	vallée du Kou	vallée du Kou	Bobo-Dioulasso	Farako-bâ	Bobo-Dioulasso
Coefficient de pondération	0.56	0.09	0.35	0.46	0.54	0.06	0.94
Pluviométrie moyenne annuelle (mm/an)	1072.1			734.5		907.9	

Afin de dégager une idée sur la représentativité de l'année hydrologique (année 2000), nous comparons la pluviométrie mensuelle tombée sur les sous bassins versants durant cette année d'étude à la pluviométrie moyenne normale sur une période de trente (30) ans pour les stations de Farako-Bâ et Bobo-Dioulasso et une période de dix sept (17) ans pour la station de la vallée du Kou.

Nous remarquons que les précipitations mensuelles pour l'année hydrologique 2000 sont en général supérieures à la moyenne au niveau de toutes les stations, Ce qui nous permet de classer cette année plutôt humide d'autant que la hauteur annuelle est de **15%** supérieure à la moyenne interannuelle. Les graphes en annexe 2 présentent cet état de fait.

III.6.2– ANALYSE DES DONNEES HYDROMETRIQUES

Les données hydrométriques sur le bassin versant du Kou souffrent à présent de plusieurs lacunes du point de vue de leur qualité.

En fait, les stations limnimétriques, dans les normes, devraient être calibrées (tarées) assez souvent, en raison des profils des berges qui évoluent avec le temps et sont susceptibles d'introduire des biais dans les calculs de débits.

Une reconstitution des données de débits a été faite dans le cadre du projet GEeau sur la base d'observations des jaugeages d'hauteurs d'eau enregistrées dans le logiciel Hydraccess.

C'est ainsi que ne disposant pas du maximum d'informations, certaines données de jaugeage ont été supprimées automatiquement dans Hydraccess dans les situations suivantes :

- cas où les hauteurs d'eau enregistrées sont négatives.
- cas où les hauteurs d'eau enregistrées ont des valeurs déraisonnables (telles que : 0,0001 cm).

Malgré ce prétraitement, les données hydrométriques sont inévitablement biaisées (voir les graphes en annexe 3 pour la mise en évidence des lacunes observées au niveau de chaque station).

III.6.2.1– Choix d'une échelle d'espace (exutoire) pour l'étude du bilan d'eau

Initialement, la confluence Niamé-Baoulé, du fait qu'elle est la dernière station en aval du bassin versant du Kou, pour laquelle il existait des séries de mesures agro météorologiques devrait être l'exutoire choisi pour l'étude du bilan d'eau du bassin versant.

La station de la Confluence Niamé-Baoulé, est un « nœud » qui reçoit les eaux provenant de Badara, de Pessa et du canal qui draine le lac de Bama.

Cependant, un constat est que, en comparaison avec la station de Badara, celle de la Confluence Niamé-Baoulé présente assez de dysfonctionnement dont :

- manque de données journalières pour les années 1997 à 2002,
- les données de débits sont facilement disponibles pour les périodes de contre-saison.

En effet, en saison hivernale, cette station hydrométrique est très difficilement accessible, car inondée et présente des courbes de jaugeage très instables du fait de l'érosion des berges. La question qui se pose est de savoir si il faudrait abandonner les mesures de débit disponibles en saison des pluies, pour la station hydrométrique de la Confluence Niamé-Baoulé ? (Sachant qu'il est pratiquement impossible de jauger cette station en saison hivernale : voir figure 3.4).

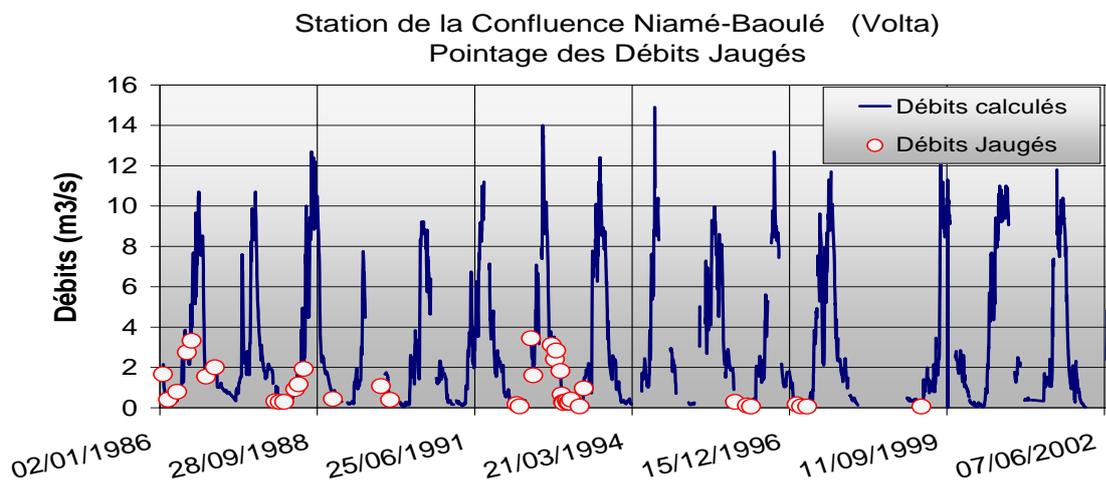


Figure 3.3: comparaison des débits à la station de la Confluence Niamé- Baoulé

Ceci pris en compte, il semble alors préférable pour l'estimation du bilan d'eau de ne considérer que les données provenant de Badara, ce qui en fait l'exutoire du nouveau sous bassin versant ainsi créé.

La superficie de ce sous bassin versant est estimée à **989 km²**. Elle est, la station possédant une bonne courbe d'étalonnage. De plus, elle est la station la mieux jaugée contrairement à la station de la confluence qui n'a pas été jaugée en période d'étiage.

Par conséquent, la lame d'eau écoulée pour l'année hydrologique (année 2000) n'est calculée que pour le sous bassin ayant pour exutoire Badara.

III.6.2.2– Lamé d'eau écoulée (Le) ou Ruissellement

Il faut noter que dans ce sous bassin versant, le débit mesuré à l'exutoire n'est pas représentatif de lame d'eau écoulée car il faut tenir compte des prélèvements effectués au niveau de la prise d'eau de Diaradougou qui a été aménagée pour irriguer le périmètre rizicole de la vallée du Kou.

D'une superficie totale de **1.260 ha** aménagés, ce périmètre rizicole irrigué de la vallée du Kou fait partie d'une vaste plaine de **9.700 ha** de superficie dont **2.300 ha** sont exploitables (**Oubib, 2000**).

Les débits prélevés au niveau de cette prise d'eau étant plus ou moins bien estimés, on peut connaître les volumes d'eau drainés en dehors du sous bassin versant (débit exutoire Badara + débit prise d'eau de Diaradougou) à partir de cette section (Badara). (Voire tableau récapitulatif des débits en annexe 5)

En plus de ces débits, il faudrait tenir compte du débit de base (~ 2.7 m³/s) des sources du Kou « dites guinguette » comme débit initial lors de la mise en œuvre du modèle.

Les volumes d'eau annuels sont :

Tableau 3. 7: *récapitulatif du volume d'eau tombé et recueilli*

Volume d'eau tombé (pluviométrie annuelle)	Volume d'eau recueilli (Débit annuel enregistré à Badara)
1072.1 mm soit 1 060 259 131.30 m³	151.5 mm soit 149 788 004.57 m³

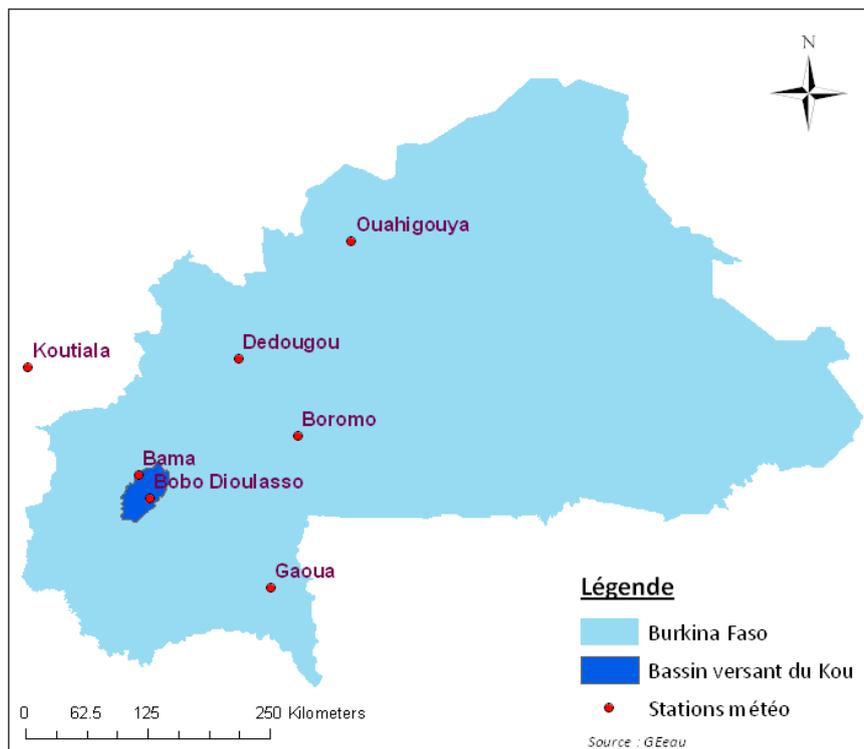
III.6.3– ANALYSE DES DONNEES D'EVAPOTRANSPIRATION

Pour cette étude, nous utilisons les données d'ETP estimées dans le cadre du projet GEeau à l'aide **des méthodes combinées de Pike-Turc et du bilan hydrique Agrometshell suivi d'une interpolation par la méthode des distances inverses SEDI (Satellite Enhanced Data Interpolation)** afin d'obtenir une estimation globale de l'évapotranspiration réelle à l'échelle du bassin versant. (Voir annexe 4 pour les données d'ETP)

Ce choix est motivé par le fait que l'utilisation des valeurs d'ETP de Bobo-Dioulasso et de Bama dans l'équation du bilan d'eau serait une extrapolation et participera à biaiser davantage le bilan d'eau.

De plus, l'interpolation SEDI tient compte des valeurs mesurées liées aux valeurs des images satellitaires qui présentent l'index de végétation, un index qui est fortement lié à l'évapotranspiration. Et a nécessité la prise en compte de plusieurs stations météorologiques dans le but d'augmenter le nombre de points disponibles pour les interpolations.

Ces stations sont présentées sur la carte 3.6 ci-dessous :



Carte 3. 6: *Distribution spatiale des stations utilisées pour l'interpolation SEDI*

En outre, l'évapotranspiration de référence sur les zones urbaines est parfois surestimée par les formules classiques (Penman-Monteith, par exemple) et devrait de ce fait être 'corrigée' de façon à être plus 'réaliste'.

Tel était le cas spécifique de l'évapotranspiration sur le bassin versant du Kou où l'ET_o à Bobo était supérieure (en théorie) à celle de Bama.

Ce qui était en pratique impossible vu l'occupation du sol, plus "verte" à Bama, et relativement en meilleure situation quant au stress hydrique. (Traoré, 2007).

L'originalité de cette démarche était donc la « **correction**² » apportée à l'estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) de Bobo et la prise en compte de la répartition spatiale des différentes stations météorologiques en vue d'une estimation globale d'évapotranspiration du bassin versant du Kou.

III.7. MISE EN ŒUVRE DU MODELE HYDROLOGIQUE

La mise en œuvre du modèle s'est faite sur l'année d'étude 2000 sur la base des données disponibles.

III.7.1. CHOIX DE LA FONCTION CRITERE

La fonction critère ou fonction objective permet de mesurer l'écart entre les valeurs simulées à l'aide du modèle et les valeurs observées. Il existe différentes formes de fonctions critères. Citons à titre d'exemple : le critère de Nash (Nash et Sutcliffe, 1970) ; Le critère de Fortin (Fortin et al. 1971) ; etc....

Notre choix s'est porté sur le critère de Nash qui est une reformulation de l'écart quadratique et représente le pourcentage de la variance de la série mesurée.

Ce choix est motivé par le fait qu'une étude comparative entre différentes formes de critères a été effectuée par Servat et al. (1989) et a montré que le critère de Nash s'impose comme celui qui, globalement, permet d'accéder aux meilleurs paramètres des modèles hydrologiques.

² D'après Ted Floyd, un scientifique australien, l'évapotranspiration de référence (ET_o ou ETP) annuelle des zones urbanisées (faiblement) ne devrait pas dépasser 60 % du total pluviométrique annuel. Quant aux zones fortement urbanisées, ET_o annuel ne dépasserait pas les 10 % du total pluviométrique.

Le critère de Nash s'écrit comme suit :

$$Nash = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_m)^2 - \sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_m)^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_m)^2} \quad \text{Avec :}$$

n = nombre d'observations, **Qi** = débit simulé pour le pas de temps i (m³/s),

Qobs = débit observé pour le pas de temps i (m³/s), **Qm** = débit moyen des observations.

Les valeurs du critère de Nash varient entre $-\infty$ et 1 (**Nash** \in]-8 ,1]). Un critère de Nash d'une valeur de 1 signifie un ajustement parfait entre données mesurées et observées. Un critère négatif indique que le modèle donne de mauvais résultats. On considère généralement qu'un modèle hydrologique donne des résultats acceptables si la valeur du critère de Nash est supérieure à 0.8. (Monfodji, 2004)

III.7.2-DETERMINATION DES PARAMETRES DU MODELE

La détermination de la plupart des paramètres est faite sur la base de ces indications du manuel d'utilisation de HYSIM.

III.7. 2.1.paramètres hydrauliques

Les paramètres hydrauliques ont été déterminés à l'aide des données topographiques disponibles et sur la base des observations de terrain. D'après Arcement et Schneider (1990) :

Largeur en gueule : 30m

Largeur au plafond: 15m

Profondeur : 2m

Longueur : 40km

Pente longitudinale : 2 ‰

Largeur du lit majeur : 100m

Coefficient de rugosité de Manning du chenal : 0.033

Une capture d'image du panneau des paramètres hydrauliques est présentée en annexe 6.

III.7. 2.2.paramètres hydrologiques

III.7. 2.2.1-paramètres de base

Il s'agit de :

◆ Réservoir d'interception

Nous choisissons une valeur de 10 mm sur la base de l'occupation des sols car il est recommandé une valeur de 2 mm pour les prairies et une valeur supérieure à 10 mm et même plus pour les zones de forêt.

◆ Proportion de zone imperméable

Cela correspond à la proportion du bassin versant que l'on peut considérer comme imperméable y compris les routes, les parkings, les aires naturelles ayant cette propriété ainsi que la rivière elle-même. Nous choisissons une valeur de 0.02 car il est recommandé une valeur typique de 0.02 pour les zones rurales tandis que pour les zones urbanisées, cette valeur peut aller jusqu'à 20% ou même supérieure.

◆ Temps de monté des petits chenaux

Ce paramètre correspond au temps mis par les affluents des canaux mineurs en amont du bassin versant pour atteindre une valeur maximale au niveau de la station hydrométrique. Une équation qui a été utilisée pour déterminer ce paramètre avec succès est donné par $TP = 2.8 * (L / S) * 0.47$ (ROYAUME-UNI Inondation Études Rapport) où L est la longueur du ruisseau en km, S est l'inclinaison du ruisseau en m/km et Tp est le temps pour atteindre un maximum en heures. Et La valeur utilisée devrait être la valeur moyenne obtenue de 4 ou 5 affluents. On a adopté $Tp = 43$ h (Chérif, 2006).

◆ Profondeur racinaire

Ce paramètre détermine la capacité de rétention totale des horizons superficiels et inférieurs du sol et dépend des types de végétations, du type de sol, etc. Cette valeur varie entre 500 et 1000 mm et peut aller à 5000 mm et même plus dans une zone boisée. Vu notre zone d'étude, nous considérons une valeur de base de 5000 mm.

◆ Indice granulométrique

Il contrôle la réponse du sol et est déterminé en fonction de la texture du sol (voir annexe 7). La carte pédologique de notre zone d'étude montre une hétérogénéité avec : 8.5% argileux, 5.5% argilo-sableux, 23% limoneux, 40.9% limono-argileux, 1% limono-sableux et 21.1% sablo-limoneux (Wellens, 2008). En considérant la texture la plus dominante (limono-argileux), nous obtenons une valeur de 0.12.

◆ Perméabilité verticale à saturation à la limite entre l'horizon superficiel et l'horizon inférieur

Ce paramètre contrôle le taux de transfert d'humidité entre les deux horizons du sol. Sa valeur varie entre 5.0 mm/hr (dans les sols argileux) jusqu'à 200.0 mm/hr (dans les sols sableux).

La valeur de ce paramètre est égale au double de la valeur lue dans le tableau des paramètres hydrologiques d'HYSIM en annexe 6 soit, une valeur de : $2 \times 9 \text{ mm/hr} = 18 \text{ mm/hr}$.

◆ Perméabilité verticale à saturation à la base de l'horizon inférieur

Ce paramètre contrôle le taux de transfert d'humidité du sol vers la nappe. Sa valeur varie entre 1.0 mm/hr (dans les sols lourds) jusqu'à 100.0 mm/hr et plus (dans les sols sableux) et est de 0 mm/hr en absence de nappe. Nous utilisons la valeur par défaut égale à 10 mm/h.

◆ Perméabilité horizontale à saturation de l'horizon superficiel et de l'horizon inférieur

Comme dans le cas précédent, nous utilisons la valeur par défaut égale à 10 mm/h.

◆ Coefficient de récession de la nappe

Sachant qu'en période d'étiage, la contribution du ruissellement cesse en premier et l'écoulement se prolonge après l'arrêt de l'écoulement hypodermique. Il est admis que le débit du cours d'eau provient d'une nappe.

En admettant que la période relative de basses eaux de la zone d'étude s'échelonne généralement de septembre à avril, le coefficient de récession de la nappe correspond à la pente du logarithme obtenue à partir du report des débits de cette période en fonction du temps sur un papier log. Ce qui nous conduit à une valeur de 0.95

◆ Facteur de correction de la pluie et de l'ETP

Ces paramètres permettent de corriger une éventuelle sous-estimation ou une éventuelle surestimation de la pluviométrie. Nous retenons les valeurs par défaut de 1.

III.7.2.2.2-paramètres avancés

Pour ces paramètres dits « avancés », nous nous contenterons des valeurs par défauts suggérées. Ces paramètres sont présentés en annexe 8.

III.7.2.3- conclusion partielle

A la suite de l'utilisation de ces paramètres (paramètres de base et paramètres avancés), nous constatons :

- Une défaillance des paramètres qui influencent l'infiltration et l'ETR. Ce qui donne une surestimation de ces deux termes de telle sorte qu'on a : $ETR + I \gg \gg P$.

- Une discordance entre l'hydrogramme observé et simulé à plusieurs niveaux : les volumes simulés observés par le modèle sont très élevés par rapport aux volumes mesurés. Les débits de pointe simulés sont faibles par rapport aux volumes mesurés.

Les figures 3.5 ci-dessous mettent en évidence ces constats.

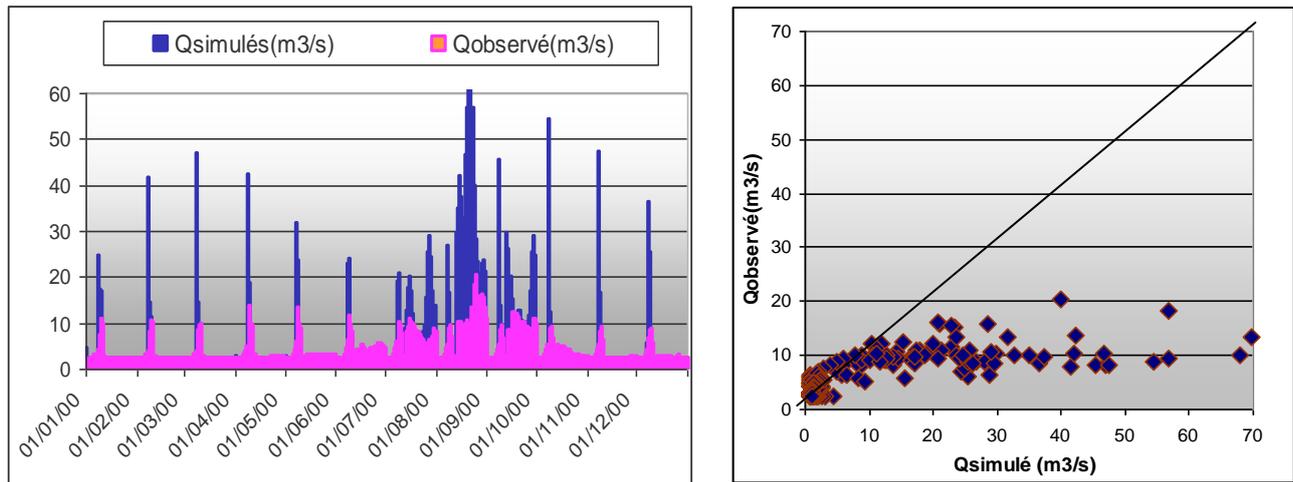


Figure 3. 4: résultats avant optimisation

Nous procédons à l'optimisation des paramètres du modèle afin d'obtenir de meilleurs résultats.

III.7. 3 -OPTIMISATION DES PARAMETRES

L'optimisation peut se faire manuellement par une procédure « essai et erreur » ou par une procédure d'optimisation automatique.

Mais, dans le cas de notre étude afin de rechercher les paramètres, nous utilisons la procédure « essai et erreur » c'est-à-dire analyse des résultats précédents et modification des paramètres pour améliorer les résultats ; ceci est répété jusqu'à ce que les débits simulés soient comparables aux débits observés tout en ayant un regard critique sur les données de sortie. Chaque fois, nous fixons tous les paramètres et nous faisons varier automatiquement un jusqu'à trouver son influence.

Cette procédure a abouti à des résultats, que l'on peut estimer satisfaisants. Mais avant de donner ces résultats, nous présentons une analyse de sensibilité³ (ou l'effet de chaque modification opérée) à travers une mise en évidence de l'influence des différents paramètres de calage sur l'obtention des résultats trouvés.

L'effet de chaque paramètre a été analysé sur trois (3) sorties à savoir : ETR, infiltration et débit simulé.

III.7.3.1-influence des paramètres de calage

III.7.3.1.1-influence du réservoir d'interception

C'est le premier paramètre qui intervient dans le calcul du volume ruisselé par le modèle puisqu'il définit la capacité de rétention du premier réservoir. Pour qu'il y ait passage d'eau au deuxième réservoir, il faut que la lame précipitée dépasse la valeur de ce paramètre.

Dans le tableau 3.8 ci-dessous, figurent les résultats des variations de ce paramètre :

Tableau 3. 8: *variation du réservoir d'interception*

Capacité du réservoir d'interception (mm)	8	9	10
Ruissellement (mm)	989.25	958.27	927.8
Infiltration (mm)	437.8	420.8	405.9
ETR (mm)	1482.7	1485.7	1488.9

Nous remarquons qu'une réduction de 10 à 20% de la capacité de ce réservoir entraîne une augmentation de 2 à 3 % pour l'ETR et une baisse de 6.5 à 7% pour l'infiltration. Avec un rapport de $Q_{\text{simulé}}/Q_{\text{observé}} = 0.49$ à 0.57

³ Selon Saltelli *et al.* (1999), il est impératif pour l'utilisateur d'un modèle de chercher à savoir comment réagit son modèle par rapport aux facteurs d'entrée.

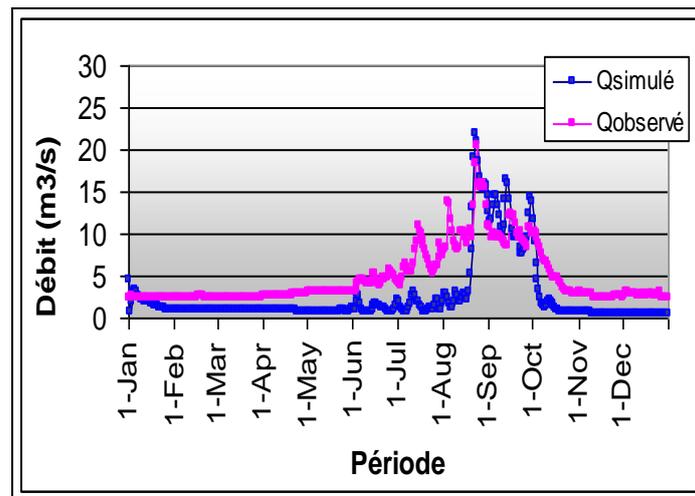


Figure 3.5: histogrammes obtenus après variation du réservoir d'interception

(Ce réservoir évolue dans le même sens que l'ETR et le débit simulé mais en sens opposé par rapport à l'infiltration).

A partir des résultats obtenus, on peut déjà dire que le réservoir d'interception a une capacité inférieure à 10 mm d'où le choix après de la valeur 8 pour ce paramètre.

III.7.3.1.2-influence de la profondeur racinaire

Ce paramètre intervient aussi bien au niveau de l'ETR qu'au niveau de l'infiltration. Cela s'explique par le fait que ce paramètre caractérise la densité de la végétation. Plus grand est ce paramètre, plus grands sont l'ETR et l'infiltration et plus petit est le débit simulé.

La densité de végétation réduit les précipitations réelles au sol par interception d'une partie de la pluie et accroît la capacité d'emmagasinement du bassin versant par augmentation de la capacité de rétention du sol et par diminution de l'évaporation du sol. Mais, on s'est rendu compte que pour une valeur inférieure à 3000 mm, ce paramètre n'a aucune influence sur l'ETR et l'infiltration. D'où le choix après d'une valeur supérieure à 3000 mm.

III.7.3.1.3-influence du temps de monté des petits chenaux

Ce paramètre intervient au niveau des débits simulés. On s'est rendu compte que, pour une valeur supérieure à 50 heures, l'hydrogramme simulé est bien restitué en ce sens que les pics de l'hydrogramme simulé correspondent bien à ceux de l'hydrogramme observé.

Le tableau 3.9 présente les résultats obtenus après la variation de ce paramètre, suivi des hydrogrammes obtenus.

Tableau 3.9: variation du temps de montée des petits chenaux

Temps de montée des petits chenaux	38	40	50
Ruissellement (mm)	666.1	827.8	927.69
Infiltration (mm)	405.8	405.8	405.8
ETR (mm)	1488.9	1488.9	1488.9
N° de graphe attribué	1	2	4

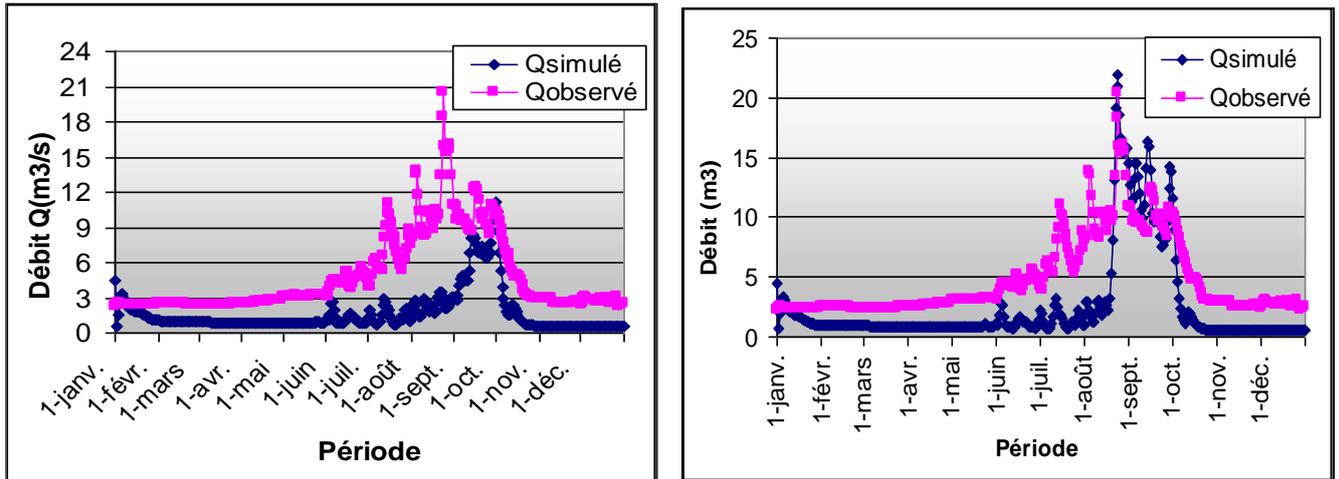


Figure 3.6: histogrammes obtenus après variation du temps de montée des petits chenaux

III.7.3.1.4-influence du facteur de correction de l'ETP et de la précipitation

Le facteur de correction de l'ETP est étroitement lié à l'ETR. Il évolue dans le même sens que l'ETR mais en sens inverse avec l'infiltration. Donc plus ce paramètre est grand, cela veut dire que le bassin versant est beaucoup exploité et une grande quantité d'eau serait perdu par évapotranspiration favorisant donc une baisse de la quantité d'eau infiltrée.

Quant au facteur de correction de la pluie, il favorise à la fois la baisse de l'ETR et de l'infiltration. Cela se justifie en ce sens que l'eau perdue par évapotranspiration et par infiltration sont étroitement liée à la précipitation.

A titre indicatif, le tableau 3.10 ci-dessous présente les résultats de la variation de ce paramètre.

Tableau 3. 10: *variation du facteur de correction de la précipitation*

Facteur de correction de la précipitation	0.9	1.1
Ruissellement (mm)	381.61	1110.9
Infiltration (mm)	318.4	500.9
ETR (mm)	1572.99	1659.4

Mais, nous maintenons ce paramètre à 1. Ce qui est d'ailleurs plus logique en ce sens que les données pluviométriques sont de bonne qualité et l'objectif recherché dans le cas de notre étude par l'utilisation du modèle HYSIM est la quantification de l'ETR et de l'infiltration.

III.7.3.1.5-influence des paramètres de perméabilité

Parmi les nombreux paramètres de perméabilité, nous montrons l'influence de la perméabilité verticale à saturation à la limite entre l'horizon superficiel et l'horizon qui lui est inférieur car plus sensible que la perméabilité aux autres niveaux (perméabilité horizontale à saturation de l'horizon superficiel, perméabilité horizontale à saturation de l'horizon inférieur).

Ce paramètre est fonction du type de sol⁴ et évolue en sens inverse avec le débit simulé et n'a pas d'influence sur l'ETR.

⁴ Le sol par le biais de sa capacité de rétention capillaire et de sa perméabilité joue un rôle de filtre entre l'atmosphère et le sous-sol. Il partage les quantités d'eau précipitées entre ruissellement, stockage, et infiltration.

CHAPITRE IV: RESULTATS ET INTERPRETATIONS

IV.1-RESULTATS OBTENUS

IV.1.1-PARAMETRES RETENUS

Après plusieurs essais, nous avons abouti aux résultats présentés dans le tableau 4.1 ci-dessous:

Tableau 4. 1: *récapitulatif des paramètres retenus*

Réservoir d'interception (mm)	8
Proportion de terrain imperméable (%)	0.11
Temps de montée (h)	60
Profondeur racinaire (mm)	4000
Indice granulométrique	0.12
Perméabilité verticale à saturation entre horizons supérieur et inférieur (mm/h)	120
Perméabilité verticale à saturation à la base de l'horizon inférieur (mm/h)	12
Perméabilité horizontale à saturation de l'horizon superficiel (mm/h)	12
Perméabilité horizontale à saturation de l'horizon inférieur (mm/h)	12
Facteur de récession de la nappe	0.95
Facteur de précipitation	1
Facteur d'ETP	1.1
Superficie du bassin versant (Km ²)	989

Une comparaison des débits simulés et observés est mise en évidence à travers les figures 4.1 et 4.2 et se présente comme suit :

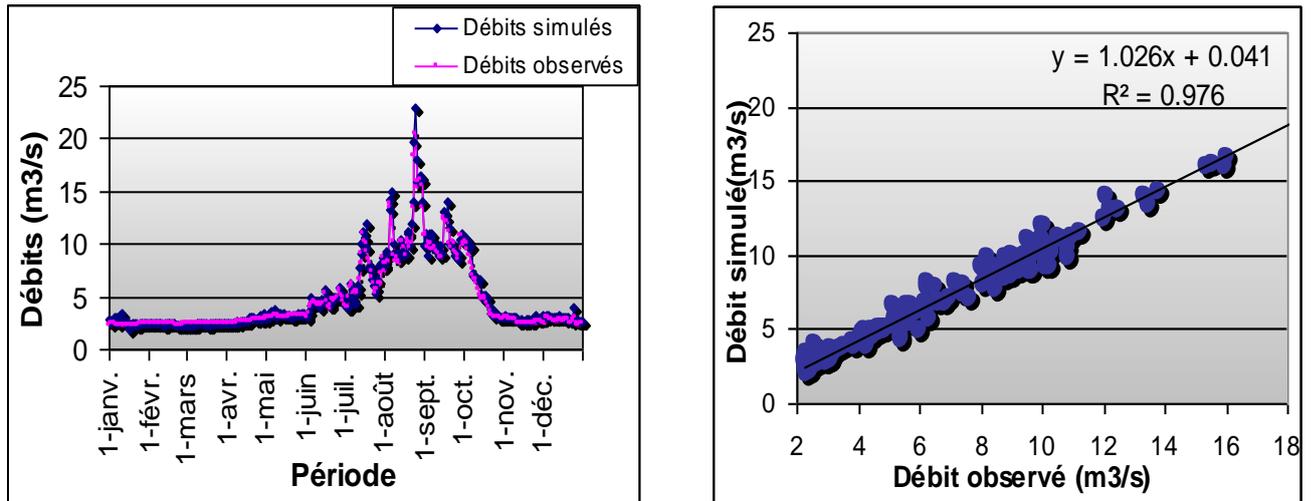


Figure 4. 1: mise en évidence des corrélations entre les débits simulés et observés

Le critère de Nash appliqué aux débits donne un coefficient de Nash de 0.976 soit 0.98 avec un rapport de Débits simulés/Débit observé de 1.04.

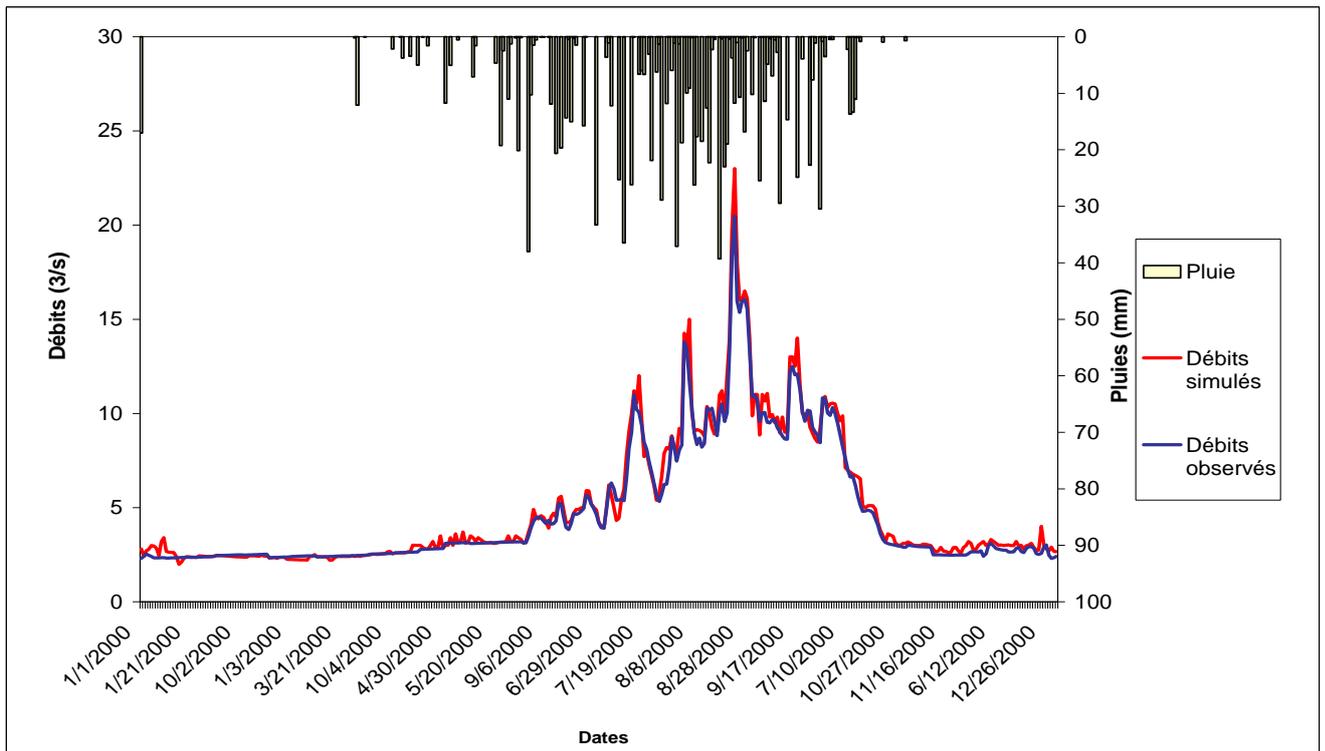


Figure 4. 2: mise en évidence des corrélations entre débits (simulés et observés) et pluie

L'observation visuelle des graphiques et les valeurs du critère de Nash sur les débits y compris le rapport Débits simulés/Débit observé autorisent les remarques suivantes :

- Critère de Nash $> 0,8$: très bonne restitution des débits cependant, l'observation des graphiques montre que le modèle a légèrement tendance à surestimer les débits. Mais, il est à noter que de la qualité des données dépendent en grande partie les résultats d'un modèle.

IV.1.2-ETABLISSEMENT DU BILAN D'EAU

Pour l'établissement du bilan d'eau, comme déjà énoncé précédemment, nous raisonnons en hauteur d'eau d'où l'utilisation de la hauteur de lame d'eau équivalente.

On appelle déficit d'écoulement, que l'on désigne par la lettre D, la différence, pour une période donnée, entre la précipitation moyenne sur le bassin et la quantité d'eau sortie du bassin (la lame d'eau écoulée et infiltration). Nous avons déterminé les termes du bilan hydrologique, et certains coefficients caractéristiques à savoir ; la précipitation moyenne, la lame écoulée, le déficit d'écoulement, le coefficient d'écoulement ($KE=P/LE$) et l'évapotranspiration réelle.

Le tableau 4.2 ci-dessous met en exergue les principaux termes du bilan d'eau de l'année hydrologique (année 2000), auquel on a ajouté les valeurs des termes au pas de temps mensuels. Les termes issus de la modélisation sont l'ETR et l'infiltration (I).

Tableau 4. 2: *récapitulation des principaux termes du bilan*

	Précipitation P (mm)	Lame d'eau écoulée Le (mm)	Déficit d'écoulement D (mm)	Infiltration I (mm)	Coefficient d'écoulement Ke (%)	ETR (mm)
Janvier	17.1	6.4	10.6	0	2.7	10.2
Février	0.0	6.2	- 6.2	0	-	7.5
Mars	12.4	6.6	5.8	0	1.9	11.2
Avril	16.2	7.0	9.2	0	2.3	18.6
Mai	85.5	8.5	77.0	0	10.1	57.4
Juin	183.9	11.7	172.2	21.4	15.8	129.6
Juillet	204.9	18.5	186.4	40.6	11.1	143.4
Août	315.9	31.5	284.5	32.9	10.0	233.4
Septembre	192.2	26.30	165.9	17.5	7.3	189.3
Octobre	44.1	14.7	29.4	0	3.0	36.2
Novembre	0.00	7.0	- 7.0	0	-	12.7
Décembre	0.00	7.3	-7.3	0	-	14.3
Année	1072.1	151.5	920.6	112.4	7.1	863.8
Bilan d'eau =Σentrées -Σsorties = - 55.6 mm						

Σ entrées = précipitation et Σ sorties = I+ETR+Le

Afin d'apprécier l'équilibre du bilan, nous comparons la somme des sorties aux apports (P)

par : $\delta = \frac{P - (ETR + I + Le)}{P}$ et le bilan est équilibré si δ est proche de 1.

$$\text{AN : } \delta = \frac{1072 - (863 + 151.5 + 112.4)}{1072} = -0.05$$

La valeur négative de δ traduit que le bilan est déficitaire avec un excès d'eau (comme l'atteste Σ entrées - Σ sorties = - 55.6 mm). D'où provient ce surplus d'eau ? Cette situation paraît problématique pour la présente étude et peut provenir d'une sous-estimation de la pluie du bassin, surestimation des débits, d'une contribution de la nappe.

La valeur négative du déficit d'écoulement confirme que les débits enregistrés ne proviennent pas seulement d'un écoulement de surface puisque la précipitation enregistrée est nulle (pour les mois de Février, Décembre et Janvier).

Nous affirmons donc que cet excès d'eau pourrait provenir d'une contribution de la nappe au débit d'écoulement et ne peut être dû aux erreurs de mesure.

Néanmoins, vu que l'estimation des termes du bilan d'eau (lame d'eau écoulée, précipitation, ...) peut présenter un certain degré d'incertitude (incertitude liée aux données, incertitude liée aux paramètres du modèle, ...etc.), nous allons évaluer l'incertitude admis sur chaque terme afin de voir si cet excès d'eau (-55.6 mm) est significatif.

Nous procédons donc au calcul d'erreur absolue⁵ sur chaque terme du bilan en considérant les erreurs relatives⁶ globales de mesures admises.

⁵ L'erreur absolue correspond à l'erreur admissible définie comme une plage réelle indépendante de la valeur de la variable estimée.

⁶ L'erreur relative est l'erreur maximale admissible définie comme étant une fraction de la valeur de la variable estimée.

IV.2- CALCUL D'ERREUR SUR LES TERMES DU BILAN D'EAU

IV.2.1.ERREUR SUR LA PRECIPITATION

L'estimation de la précipitation moyenne est entachée d'une incertitude provenant de plusieurs sources : erreur liée à l'emplacement de l'appareil, à la direction et force du vent, ...etc. Mais dans la pratique une erreur absolue globale de $\pm 0.5\text{mm}$ admise par lecture est raisonnable et tient compte généralement des différents types d'erreurs de mesure (Audinet et al., 1995).

La pluie moyenne de notre zone d'étude a été calculée à partir des données pluviométriques de 3 stations selon la formule :

$$P_{\text{moy.}} = \frac{\sum A_i P_i}{A} \quad \text{Avec : } P_{\text{moy}} = \text{précipitation moyenne sur le bassin ; } A = \text{aire totale du}$$

bassin, P_i = la précipitation enregistrée à la station i , A_i = la superficie du polygone associé à la station i . Ce qui conduit à une erreur de :

$$dP_{\text{moy.}} = \frac{\sum A_i dP_i}{A} = \frac{1}{A} \left[\frac{A_1 dP_1}{P_1} + \frac{A_2 dP_2}{P_2} + \frac{A_3 dP_3}{P_3} \right] \quad \text{Or } dP_1 = dP_2 = dP_3 = dP = \pm 0.5\text{mm}$$

$$\text{D'où : } \Delta P_{\text{moy}} = \frac{dp}{A} \left[\frac{A_1}{P_1} + \frac{A_2}{P_2} + \frac{A_3}{P_3} \right] P_{\text{moy.}} \quad \text{d'où on a : } \Delta P_{\text{moy}} = \pm 0.46\text{mm} \quad (\Delta P_{\text{moy}} \text{ et } \Delta P$$

correspondent respectivement à l'erreur absolue et l'erreur relative à une station de mesure) à l'échelle d'une mesure (échelle journalière)

A l'échelle annuelle, cette incertitude s'applique aux jours où il y a eu lecture (ou $P > 0$).

D'où nos obtenons : Une incertitude de $\pm 35 \text{ mm}$

IV.2.2.ERREUR SUR LES TERMES « ETR ET INFILTRATION »

La détermination de l'erreur absolue sur ces paramètres est un peu particulière en ce sens qu'ils sont obtenus par modélisations et constituent des sorties directes du modèle hydrologique.

L'infiltration est un paramètre influencé par l'ETP et la pluie tandis que l'ETR est une fonction directe de l'ETP selon l'équation : $\text{ETR} = \alpha \cdot \text{ETP}$; α étant un coefficient réducteur.

Nous nous basons sur le principe de la « Local Sensitivité analysis »⁷ pour estimer les erreurs admises sur ces deux termes.

Quand on applique cette méthode, les relations entre les entrées et les sorties sont supposées être linéaires et par conséquent, la relative variation de la sortie du modèle en faisant varier le facteur d'entrée d'un certain pourcentage (prise égale à l'erreur relative admise) autour de sa valeur de base permet de connaître l'erreur maximale admise.

Une erreur relative de 5 % peut être observée pour la grande majorité des paramètres qui caractérisent un sol ou une végétation dans un modèle (Amy *et al.* 2002).

Ainsi, nous estimons l'erreur absolue maximale sur ces deux termes après plusieurs combinaisons (exemples : Pmin avec ETPmin, Pmax avec ETP max, ...etc.).

Nous obtenons : Une incertitude sur les valeurs annuelles de **±12.1 mm** pour l'**ETR** et une incertitude de **±4.2mm** pour l'**Infiltration**.

IV.2.2. ERREUR SUR LA LAME D'EAU ECOULEE

L'erreur globale sur ce terme provient des jaugeages qui restent les meilleurs moyens de construire une courbe de tarage.

En pratique, si les jaugeages ont été établis suivant « l'état de l'art », on peut considérer que les débits sont connus à **10 % près** (Forray *et al.*, 1998). Cela rejoint l'hypothèse selon laquelle les incertitudes associées aux techniques de mesure de débits conduisent à proposer un résultat avec une erreur toujours supérieure à 4%, (Audinet, 1995).

La lame d'eau écoulee peut être estimée sous forme linéaire par : $Le = \frac{Q * t}{S}$ avec :

$Q*t$ = volume d'eau écoulé, S = surface. En considérant une erreur relative de 10%, le calcul d'erreur absolu conduit à :

$$\frac{dLe}{Le} = \frac{dQ}{Q} \Rightarrow \Delta Le = \frac{\Delta Q}{Q} Le \quad \text{Comme } \frac{\Delta Q}{Q} = 10\% , \text{ on a } \Delta Le = 0.1 * Le$$

A l'échelle annuelle, cette incertitude s'applique aux débits journaliers et nous obtenons :

Le. annuelle ∈ [136.3 mm, 166.6 mm] soit une incertitude d'environ **±15.1 mm**

⁷ Elle s'attache à déterminer l'impact local des facteurs d'entrée sur le modèle

⇒ **Erreur sur la fermeture du bilan**

Soit \mathcal{E} , la fermeture admis sur le bilan d'eau annuel. On a : $\mathcal{E}=P-(I+ETR+Le)$

$$\frac{d\mathcal{E}}{d} = \frac{dP}{P} - \left(\frac{dI}{I} + \frac{dETR}{ETR} + \frac{dLe}{Le} \right) \implies \Delta\mathcal{E} = \Delta P + \Delta I + \Delta ETR + \Delta Le$$

D'où l'erreur sur la fermeture du bilan est de : $\Delta\mathcal{E} = \pm \mathbf{64.4 \text{ mm}}$

Nous pouvons donc conclure que la valeur de 55.6 mm (correspondant à l'excédent du bilan) n'est pas significative puisqu'elle est inférieure à $\Delta\mathcal{E}$. Cela confirme que le bilan d'eau établi est équilibré et peut être considéré comme valide.

Des études théoriques et expérimentales ont prouvées la contribution des eaux souterraines à l'écoulement du Kou. Il s'agit notamment des mesures isotopiques (avec comme indicateur privilégié le tritium) qui ont permis de déterminer la présence d'eau correspondant à des apports de nappe. (Dakouré., 2003)

IV.3. BILAN D'EAU GLOBAL

Le bilan d'eau global peut être évalué en comparant les sorties à la pluie (apport) par :

$$\delta (\%P) = \frac{P - (ETR + I + Le)}{P} \cdot 100$$

Le tableau 4.3 présente le bilan d'eau global en tenant compte des incertitudes sur l'estimation des principaux termes.

Tableau 4.3: bilan d'eau global avec prise en compte des incertitudes sur chaque terme

	Valeur minimale	Valeur maximale
Précipitation (mm)	1037.1	1107.1
Le (mm)	136.3	166.6
ETR (mm)	851.7	875.9
Infiltration (mm)	108.2	116.6
Σ entrées =P (mm)	1037.1	1107.1
Σ sorties = I +ETR+Le (mm)	1096.2	1159.1
δ (%P)	- 5.7%	- 4.7%

Les valeurs négatives montrent qu'il s'agit d'un excès d'eau provenant de la contribution de la nappe. De façon plus large (en tenant compte des erreurs de mesure) on a :

4.7% P ≤ contribution de la nappe ≤ 5.7 %P

A ce terme, nous pouvons conclure que sur le bassin versant du Kou (avec pour exutoire le sous bassin versant de Badara), et plus précisément à l'année 2000, en termes de valeurs moyennes, on a :

- pour un apport d'eau de 1127.7 mm dont 95% provient de la pluie et 5% de la nappe,
- **863.8 mm** (soit 77%) sont perdus par évapotranspiration,
- **151.5 mm** (13%) sont évacués par ruissellement de surface,
- tandis que **112.4 mm** (10%) s'infilte.

Ce bilan global peut être schématisé comme suit :

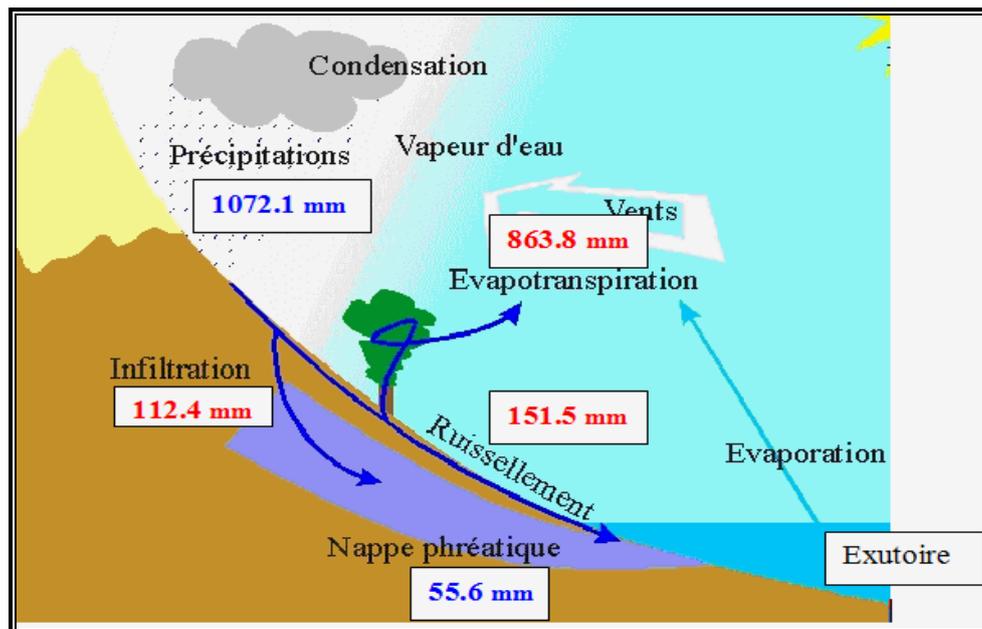


Figure 4.3: schéma récapitulatif du bilan d'eau global

La question qui se pose est de savoir si les valeurs trouvées sont réalistes. La réponse à cette interrogation nous conduit à une analyse des résultats obtenus.

CHAPITRE V: DISCUSSIONS ET ANALYSES

V.1. A PROPOS DES PRINCIPAUX COMPOSANTS DU BILAN D'EAU

Cette analyse des résultats obtenus se justifie par le fait que le bilan d'eau n'est pas un moyen d'évaluation de données inconnues mais plutôt un moyen pour valider les données qui ont servi à l'établir. Il permet plus, d'évaluer le poids de chacun des termes dans le cycle de l'eau (Bergaoui, 1991).

V.1.1- ANALYSE DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION REELLE (ETR)

Au vu du bilan d'eau global, nous constatons que le terme le plus dominant est l'ETR avec une valeur de 863.8 mm. Cette valeur semble être logique, car inférieur à celle de l'évapotranspiration potentielle sur le bassin versant pour la même période, et inférieure au total pluviométrique annuel.

Aussi, de même que l'ETP, une estimation globale de l'ETR sur le bassin versant du Kou a été faite dans le cadre du projet GEeau **par la méthode des distances inverse SEDI (Satellite Enhanced Data Interpolation)** avec la prise en compte de plusieurs stations météorologiques dans le but d'augmenter le nombre de points disponibles pour les interpolations.

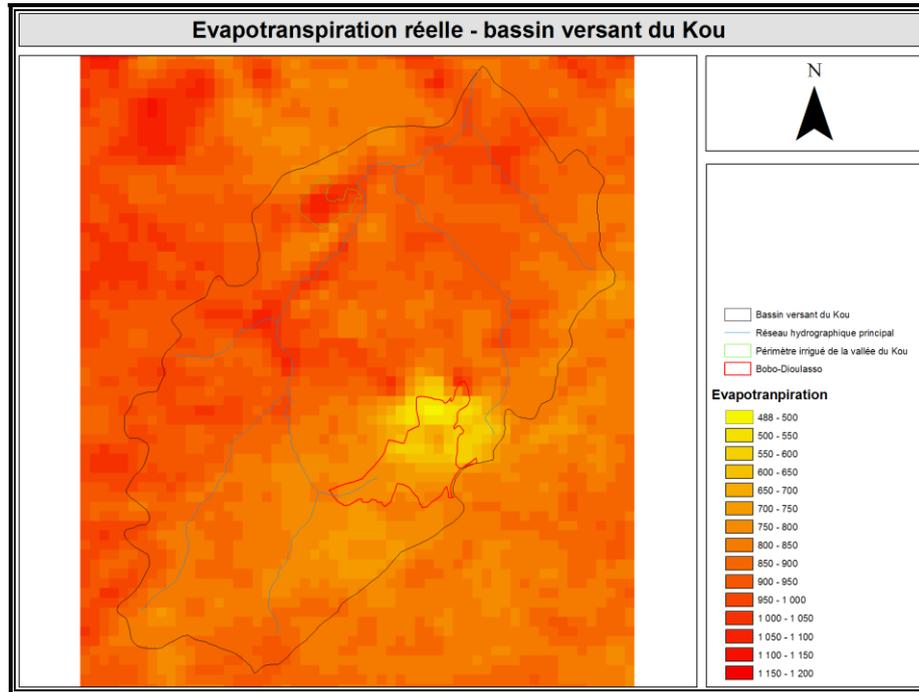
La méthode SEDI est une interpolation qui est basée sur une variable corrélée (positivement ou négativement) avec celle que l'on voudrait interpoler. Dans le cas de l'interpolation de l'évapotranspiration, comme paramètre de fond, c'est l'indice de végétation normalisé, NDVI (Normal Difference Vegetation Index), à priori corrélé à l'évapotranspiration, qui a été retenu. Pour ce faire, des images NDVI⁸ Spot Vegetation de l'année 2000, à 1 km de résolution spatiale, ont été utilisées.

L'évapotranspiration moyenne annuelle du bassin versant du Kou pour l'année 2000 et plus précisément pour le sous bassin versant de Badara a été estimée à 860 mm. (Traoré, 2007).

La différence d'environ 4 mm entre ces deux valeurs peut être due à l'incertitude liée au modèle hydrologique. Cependant, vu la faiblesse de cette valeur, nous pouvons dire que l'ETR a été bien restituée par le modèle hydrologique HYSIM.

⁸ Indicateurs numériques, employés pour analyser des mesures de télédétection.

La cartographie de l'évapotranspiration réelle est présentée comme suit :



Carte 5. 1: cartographie de l'évapotranspiration réelle en mm (Traoré, 2007)

La dominance de ce terme sur le bassin versant du Kou (77%) trouve son explication par le fait que le bassin versant est très exploité.

Les prélèvements massifs d'eau pour l'irrigation augmentent l'évapotranspiration au détriment des écoulements. L'inventaire réalisé par le ministère de la question paysanne (HURE, 1998) sur la base des photographies aériennes donne l'ampleur de cette occupation informelle des terres : 3.200 ha pour l'essentiel de périmètres privés formant la ceinture maraîchère et horticole de Bobo-Dioulasso et 1.200 ha pour le grand périmètre rizicole de Bama.

V.1.2- ANALYSE DE L'INFILTRATION ET DE LA LAME D'EAU ECOULEE (LE)

⇒ Au niveau de l'infiltration

Si l'on confronte la valeur de l'infiltration à la valeur de la pluie, nous constatons qu'elle est faible (infiltration=10% de la pluie). Cela peut être dû à la nature de zone d'étude (précisément le sous bassin versant de Badara) qui est dominée par une texture peu perméable (argilo-limoneuse).

Aussi, pendant la saison sèche, l'évapotranspiration ne laisse pas de possibilités pour l'infiltration (au vu du taux élevé du terme ETR) car en zone aride et semi-aride, la demande évaporatoire en saison sèche est suffisamment forte pour permettre la remontée d'eau par capillarité à partir d'une nappe (Jaupin et al., 1991).

⇒ Au niveau de la lame d'eau écoulée

Le coefficient d'écoulement est globalement faible (inférieur à 8%), même s'il est supérieur à 10% pendant la période pluvieuse (de Mai à Septembre) d'après le tableau 4.2. Cela est dû au fait que le terme de l'évapotranspiration dans le bassin versant du Kou est un facteur très important.

⇒ Au vu du coefficient d'écoulement ($K_e = 7.1\%$ de la pluie) et de l'infiltration (infiltration = 10% de la pluie) qui semblent être faibles, nous allons comparer le comportement du bassin versant du Kou à celui d'autres bassins versants de la mare d'Oursi, au Burkina Faso (Chevallier et al., 1985).

Les bassins versants de la mare d'Oursi ont un coefficient d'écoulement plus élevé. Cette différence de comportement s'explique par la nature des bassins car ceux de la mare d'Oursi contiennent de grandes surfaces de glacis très ruisselantes. Aussi, les bassins versants renfermant une plus grande superficie de sols nus sont plus aptes au ruissellement.

Lorup et al. (1998) ont montré sur le bassin versant du Zimbabwe que, l'augmentation des cultures sur les versants a eu pour effet de diminuer les écoulements.

A cela, il faut ajouter les stockages dans les micro-dépressions. Le bassin versant du Kou n'est pas très urbanisé et compte de ce fait un certain nombre de micro-dépression où l'eau de ruissellement (et une partie de la pluie qui tombe) est « piégée ». Une partie de cette eau retenue dans les micro-dépressions, s'infiltré et/ou percole, et l'autre partie retourne vers l'atmosphère par évaporation. Le volume d'eau pouvant être retenu dans ces dépressions est appelé capacité de rétention en eau de surface. D'après un rapport de l'OCDE (2001), les terres labourées peuvent présenter des capacités de rétention assez élevées.

V.2. A PROPOS DU BILAN D'EAU GLOBAL

Les données disponibles sur le bassin versant du Kou à l'année 2000, nous ont permis de réaliser un bilan d'eau en quantifiant les processus hydrologiques malgré qu'il s'est posé des difficultés aussi bien au niveau de la disponibilité des données (tel est le cas des données hydrométriques), qu'au niveau de la connaissance des paramètres relatifs à certains termes (tel est le cas de la variation des stocks).

Cela a permis de constater que 5% (55.6 mm) des apports sur le bassin versant du Kou sont dus à la contribution de la nappe.

Comme énoncé précédemment, des études théoriques et expérimentales ont déjà signalées qu'il existe une contribution de la nappe à l'écoulement du Kou (Dakouré., 2003).

Cependant, la quantification des apports provenant de la nappe a fait l'objet de plusieurs études antérieures sur le bassin versant du Kou par différents auteurs dont:

- le CIEH (CIEH-USAID, 1987) qui a avancé une recharge variant entre 0 et 200 mm par an dans les terrains gréseux.
- Dakouré D, 2003 a obtenu une recharge annuelle variant de 0 à 127 mm à l'issue de l'utilisation des modèles hydrologiques à réservoir.
- IWACO (1989) a avancé sur la zone de Bobo-Dioulasso, une valeur de recharge de 166 mm.

Nous notons que la contribution de la nappe (d'une valeur de 55.6 mm) obtenue dans le cadre de cette étude est plus ou moins en accord avec ces études antérieures. Mais, de façon générale la connaissance des mécanismes de la recharge reste encore sommaire sur le bassin versant du Kou dans la mesure où aucune étude n'a pu donner une valeur de référence à cette recharge. En fait :

- le bassin versant du Kou est compris entre les isohyètes 500 et 1200 mm et on note un gradient sud-ouest/nord-est de l'ordre 120 mm/100 km. Ajoutée à la variabilité géologique, géomorphologique et pédologique, il va sans dire qu'il existe une variabilité dans la recharge. (Dakouré, 2003)

- les sources du Kou, qui donnent naissance au Mouhoun (Volta Noire), ont un débit de qui résulte d'apports souterrains d'un bassin versant hydrogéologique dont la superficie à ce jour n'est pas encore connue.

D'après Dakouré (2003), cette superficie atteint quelques milliers de kilomètre carré. Cette esquisse permet de se rendre compte de la difficulté de trouver une valeur de référence aux apports dus à la contribution de la nappe surtout pour une zone d'une telle immensité comme le bassin versant du Kou.

Le constat général que nous avons fait au cours de cette étude est qu'aucun terme du bilan ne semble être sous estimé ou surestimé par rapport à un autre. Le bilan d'eau établi peut être considéré comme bouclé de manière satisfaisante.

Pour être consensuel, les résultats obtenus ont été analysés et se situent dans des proportions acceptables.

Par ailleurs, il faut noter que le modèle hydrologique HYSIM utilisé dans le cas de cette étude se veut le plus complet possible et de ce fait, tente d'intégrer un maximum de paramètres (étant donné la quantité de processus simulés) afin de recréer au mieux les conditions qui prévalent dans un milieu naturel tel qu'un bassin versant. Ce qui a rendu la mise en œuvre très laborieuse.

CONCLUSION GENERALE

Cette étude faite sur le bassin versant du Kou pour l'année 2000, et particulièrement sur le sous bassin versant de Badara, porte sur l'étude des principaux termes du bilan d'eau. Après avoir passé en revue une compilation des facteurs climatiques, géographiques et des données disponibles sur le bassin du Kou, nous avons exposé le cadre général de notre zone d'étude, suivi de l'identification des principaux termes du bilan, puis nous sommes passé à une analyse critique des données.

Cela nous a permis de constater que les processus hydrologiques actifs au sein du bassin versant du Kou sont nombreux : ruissellement de surface, contribution de la nappe aux débits d'écoulement, évapotranspiration, infiltration, prélèvements d'eau par les agriculteurs. Il en résulte donc un fonctionnement hydrologique complexe.

Puisque certains termes ne pouvaient pas être estimés directement, nous avons trouvé nécessaire d'utiliser la modélisation hydrologique par le biais d'un modèle conceptuel à réservoir, à cheval entre les modèles 'physiques' et les modèles empiriques. Il s'agit de HYSIM (Hydrological Simulation Model).

La mise en œuvre de ce modèle à donné des résultats intéressants que nous jugeons acceptables. Ces résultats indiquent que pour un apport d'eau annuel de **1127.7 mm** dont **95%** provient de la pluie et **5%** de la nappe, **77%** (863.8 mm) sont perdu par évapotranspiration, **13%** (151.5 mm) participe au ruissellement de surface et **10%** (151.5mm) sont perdu par infiltration.

Il se dégage une importance de l'évapotranspiration et une faiblesse de l'infiltration dans le cycle hydrologique de ce bassin versant.

Cela traduit le fait que le bassin versant du Kou est un système relativement complexe marqué par une nette surexploitation. Cette situation paraît problématique pour le futur. Il faut donc envisager de diminuer les flux sortants et/ou augmenter les flux entrants.

Les flux sortants sont d'abord les pompages pour l'adduction d'eau potable, l'irrigation,...etc. Il n'existe pas pour l'instant des moyens de limiter ces pompages. Une restriction volontaire des exploitants est difficilement imaginable.

Par ailleurs, la baisse régulière de la nappe interdira son accès à long terme aux seuls paysans qui ne disposeront pas de moyens financiers de surcreuser leurs puits et forages.

Mais la gestion de la ressource peut aussi passer par une amélioration de son utilisation. Une meilleure valorisation sociale et économique de l'eau par l'augmentation des flux entrants pourrait sembler une autre alternative.

Les résultats obtenus restent donc un état des lieux pour les décideurs.

Cependant, il faut noter que l'établissement du bilan d'eau d'un bassin versant est une opération très complexe. Klemes (1988) illustre d'ailleurs cette complexité en disant que pour le scientifique, l'équation du bilan d'eau peut être considéré comme l'un des "Rubic Cubes" les plus difficiles à résoudre de la nature, pour lequel les facettes changent de couleur, de forme, de taille au fur et à mesure qu'elles sont déplacées par différentes forces, et dans lequel même les bases structurales changent au cours du temps.

Pour finir, nous proposons quelques recommandations quant à une éventuelle amélioration à apporter à cette étude :

- ◆ Un suivi plus régulier des débits dans les différentes stations hydrométriques doit être envisagé, afin d'obtenir une meilleure estimation du volume d'eau sortant du bassin. Cela aura pour effet d'établir le bilan d'eau à une échelle plus réduite et de mettre en évidence la spécificité de chaque sous bassin versant.

Aussi, la création d'une nouvelle station limnimétriques, située à l'exutoire du bassin, pourrait également être envisagée.

- ◆ Un meilleur suivi des données de niveaux piézométriques afin de mieux cerner l'interaction entre eaux souterraines et eaux de surface. Cela aura pour effet de procéder à une estimation fiable de certains termes du bilan à savoir la variation des stocks d'eau dans le sol.

- ◆ La valeur de certains termes comme l'infiltration doit être confirmée dans le cadre d'études plus poussées, basées sur des expériences de terrain.

- ◆ La mise en place des dispositifs de mesure des sources.

- ◆ Procéder à la quantification de la contribution de la nappe par d'autres méthodes telles que la décomposition des hydrogrammes de crue par traçage géochimique ou isotopique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Traoré F. (2007), Méthodes d'estimation de l'évapotranspiration réelle à l'échelle du bassin versant du Kou au Burkina Faso. Mémoire de DEA en Sciences de l'environnement, Université de Liège, Belgique.

Manley R. (2003), A guid to using HYSIM Londres, 105 pages.

Chabi-Goni B. (2003), Synthèse hydrologique sur la vallée du Kou : Mise en place d'un système de suivi et d'évaluation de la ressource. Mémoire d'ingénieur de l'EIER de Ouagadougou, 83 pages + annexes.

Mamadou C. (2006), Bilan en eau et étude comparative des écoulements du bassin versant du Kou. Mémoire d'ingénieur. Groupe des Ecoles EIER-ETSHER, GEeau plus, Burkina Faso. 117 p.

GEeau. (2005-2006), Rapport Technique N°1; J. Wellens, M. Diallo, D. Dakouré & N.F. Compaoré

Gineste P ; Guinaudeau M. (1984), Cours d'Hydrométrie et Hydrologie statique, Polycopié de cours EIER, Ouagadougou, 217 pages.

Groupe Sahelconsult. (Avril 1997), Programme RESO, Rapport final, Tome 3, Inventaire des ressources en eau de surface, Ministère de l'Environnement et de l'eau, 61 p.

BUNASOLS. Rapport Technique N°126 (Juillet 2002), Etude Morpho-pédologique des Provinces du Houet et du Tuy

Ernest A; Matthias F; Aïcha N (2007), Problématique des Comités Locaux de l'Eau, Proposition d'une approche méthodologique

Sivakumar M; Wallace J; Renard C. (1991), Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone

Réménieras G. (1965), L'hydrologie de l'Ingénieur, Eyrolles, 2^{ème} partie

Sites internet

<http://80.69.76.153/wiki/index.php?title=Chapter18>

<http://www.watres.com/software/sf-hysim.html>

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1: Polygone de Thiessen

Annexe 2: Mise en évidence de la représentativité de l'année hydrologique: comparaison de la pluie normale à la pluie moyenne de l'année 2000 à chaque station

Annexe 3: Mise en évidence des lacunes observées dans des données hydrométriques

Annexe 4: Données d'évapotranspiration potentielle

Annexe 5: Tableau récapitulatif des débits enregistrés à Badara

Annexe 6: Capture d'image du panneau des paramètres hydrauliques

Annexe 7: Tableau récapitulatif du choix des paramètres hydrologiques d'HYSIM en fonction du type de sol

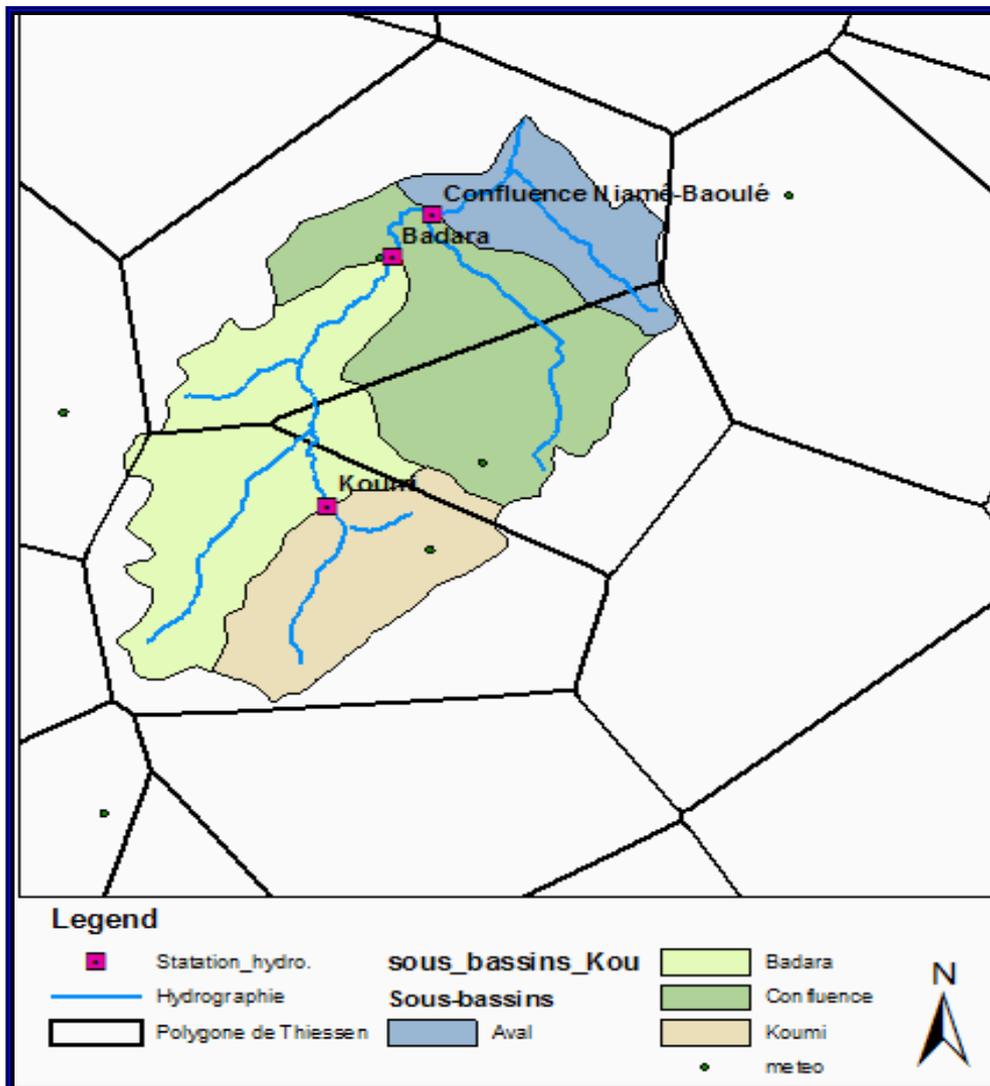
Annexe 8: Présentation des paramètres avancés du modèle hydrologique HYSIM

Annexe 9: Tableau descriptif des types de sols présents sur le bassin versant du Kou

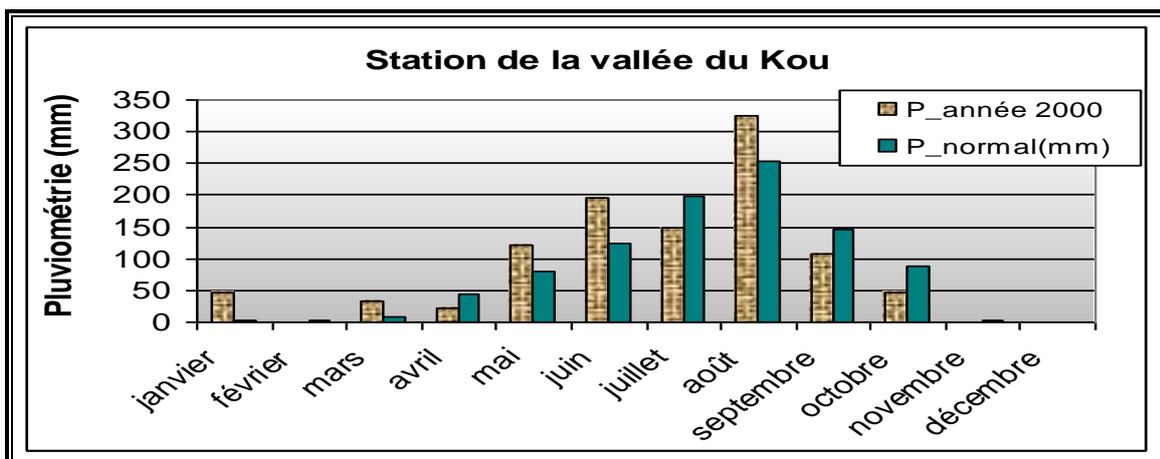
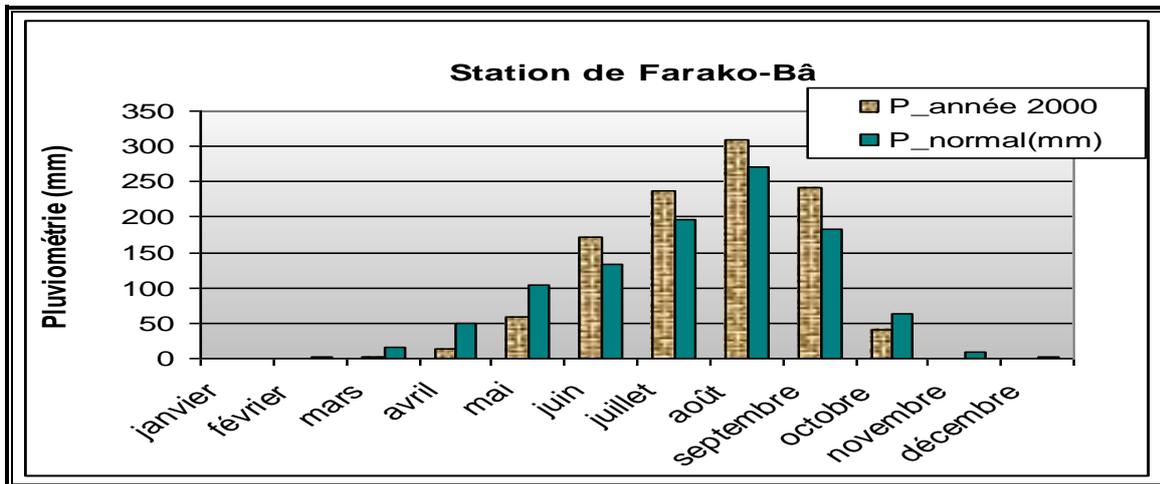
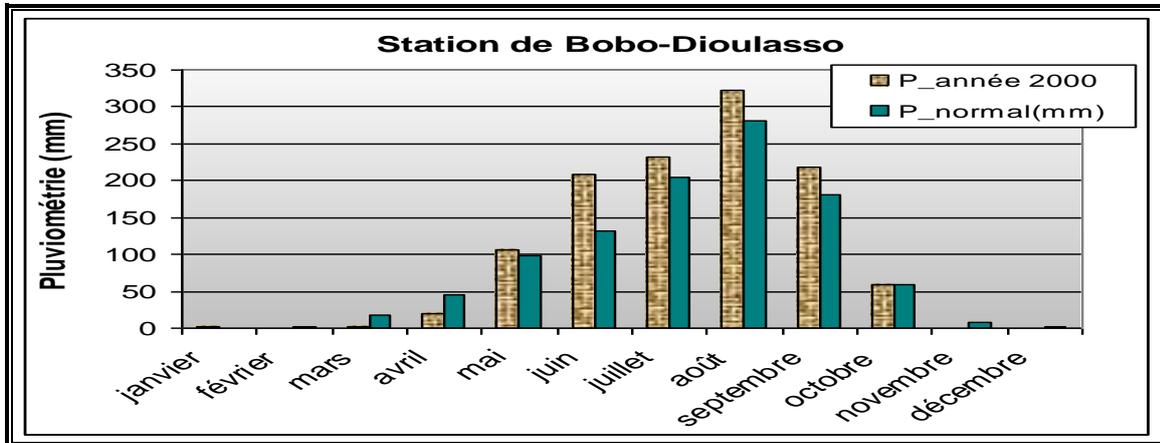
Annexe 10 : Quelques photos du site

Annexe 1: Polygone de Thiessen

Principe de construction : Les stations disponibles sur le bassin versant du Kou étant reportées sur une carte, on trace une série de droites reliant les stations adjacentes. Au milieu de chacune de ces droites, on élève une perpendiculaire. Les intersections de ces médiatrices déterminent un certain nombre de polygones. S'il y a lieu, certains côtés du polygone sont remplacés par les limites du bassin étudié.

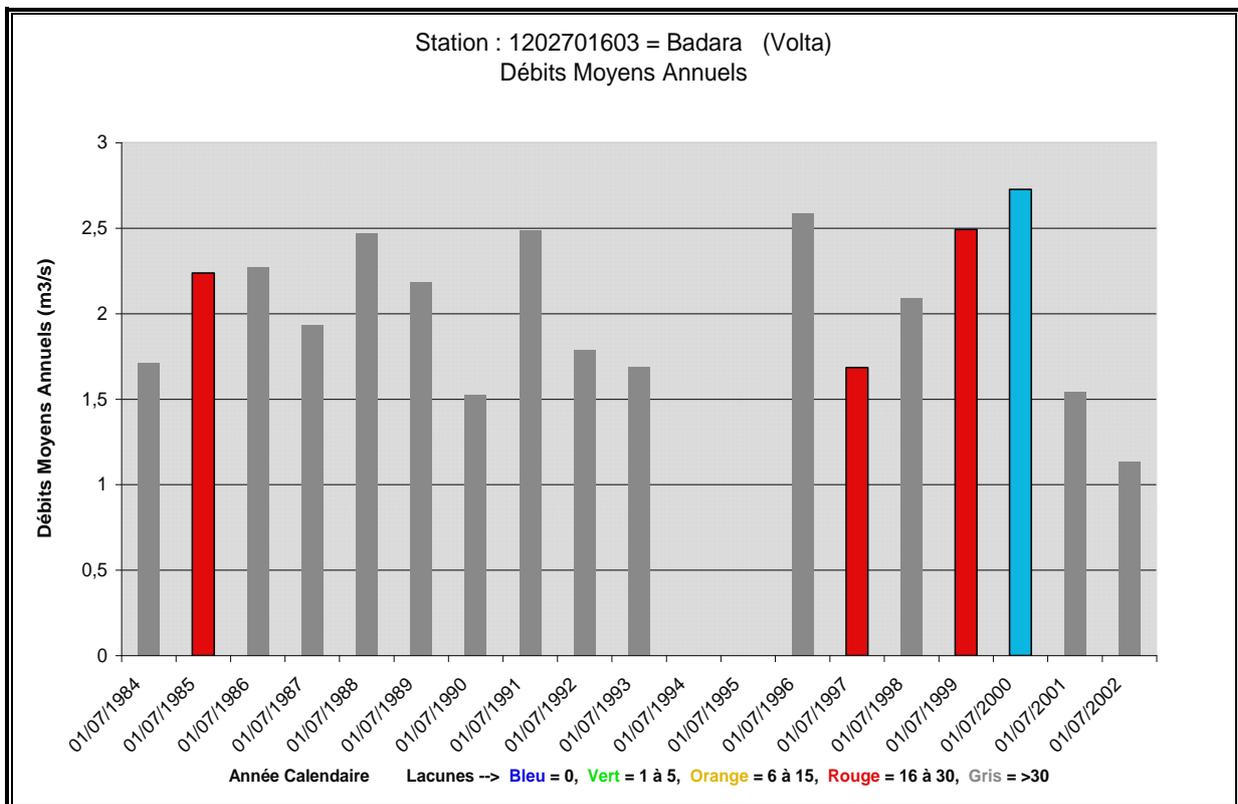
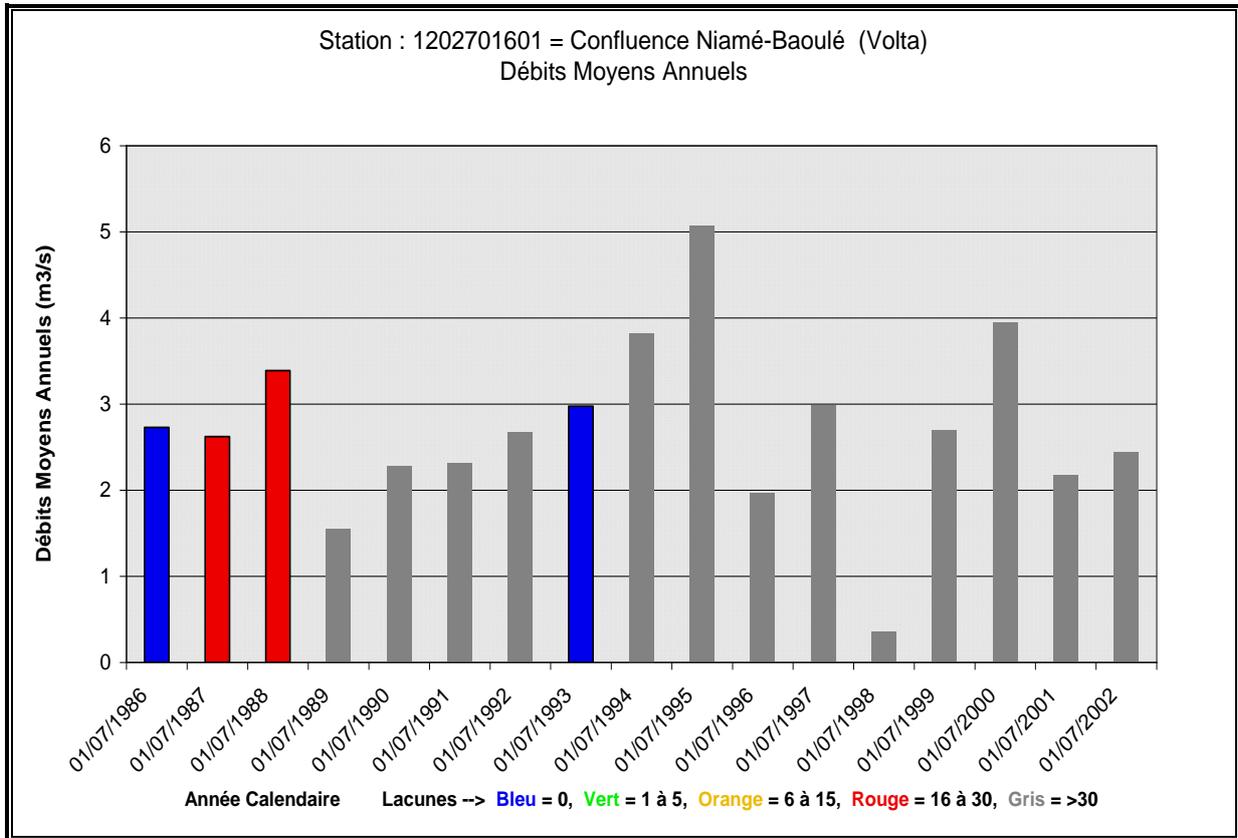


Annexe 2: Mise en évidence de la représentativité de l'année hydrologique: comparaison de la pluie normale à la pluie moyenne de l'année 2000 à chaque station



NB : P_année 2000 = pluie moyenne (calculé avec la méthode de Thiessen) à l'année 2000, P_normal = pluie moyenne normale enregistrée sur une période de 30 ans.

Annexe 3 : Mise en évidence des lacunes observées dans les données hydrométriques



Annexe 4: Données d'évapotranspiration potentielle

PERIODE	ETP décadaire (mm)
Janv.-1	73.47
Janv.-2	79.27
Janv.-3	77.1
Total	229.84
Févr.-1	69.12
Févr.-2	70.57
Févr.-3	71.13
Total	210.82
Mars-1	74.2
Mars-2	58.97
Mars-3	53.89
Total	187.06
Avril-1	49.54
Avril-2	48.09
Avril-3	56.07
Total	153.7

PERIODE	ETP décadaire (mm)
Mai-1	62.6
Mai-2	77.82
Mai-3	58.25
Total	198.67
Juin-1	64.05
Juin-2	59.7
Juin-3	75.65
Total	199.4
Juil.-1	66.95
Juil.-2	54.62
Juil.-3	58.97
Total	180.54
Août-1	82.17
Août-2	88.7
Août-3	93.77
Total	264.64

PERIODE	ETP décadaire (mm)
Sept.-1	106.83
Sept.-2	89.42
Sept.-3	99.58
Total	295.83
Oct.-1	94.5
Oct.-2	82.9
Oct.-3	97.4
Total	274.8
Nov.-1	90.87
Nov.-2	83.62
Nov.-3	88.7
Total	263.19
Déc.-1	90.15
Déc.-2	80.72
Déc.-3	80.72
Total	251.59

Annexe 5: Tableau récapitulatif des débits enregistrés

PERIODE	Débit prélevés (m3/S)	Débit à l'exutoire (m3/s)	Débit total (m3/s)
Janv.-1	16.76	7.02	23.78
Janv.-2	16.45	6.94	23.39
Janv.-3	16.30	8.20	24.51
Total	49.52	22.16	71.67
Févr.-1	16.76	7.97	24.73
Févr.-2	16.52	7.60	24.11
Févr.-3	14.62	7.99	22.62
Total	47.90	23.56	71.46
Mars-1	14.81	9.89	24.70
Mars-2	14.07	10.40	24.47
Mars-3	14.13	12.00	26.13
Total	43.01	32.29	75.30
Avril-1	14.53	11.40	25.93
Avril-2	14.83	11.90	26.73
Avril-3	16.14	12.40	28.54
Total	45.50	35.70	81.20
Mai-1	18.84	12.90	31.74
Mai-2	18.16	13.35	31.51
Mai-3	18.20	19.84	38.04
Total	55.20	46.09	101.29
Juin-1	17.67	23.46	41.13
Juin-2	21.54	24.29	45.83
Juin-3	24.37	24.52	48.89
Total	63.58	72.27	135.85

PERIODE	Débit prélevés (m3/S)	Débit à l'exutoire (m3/s)	Débit total (m3/s)
Juil.-1	25.85	57.12	82.97
Juil.-2	26.54	42.42	68.96
Juil.-3	25.73	74.10	99.83
Total	78.13	173.64	251.77
Août-1	24.77	65.71	90.48
Août-2	26.56	112.98	139.54
Août-3	26.56	95.09	121.65
Total	77.89	273.78	351.67
Sept.-1	26.56	71.21	97.77
Sept.-2	26.56	75.82	102.38
Sept.-3	26.56	76.05	102.61
Total	79.68	223.08	302.76
Oct.-1	26.56	34.67	61.23
Oct.-2	23.33	17.75	41.08
Oct.-3	21.91	5.74	27.66
Total	71.80	58.17	129.97
Nov.-1	23.33	6.86	30.19
Nov.-2	19.19	5.62	24.81
Nov.-3	19.27	11.41	30.69
Total	61.80	23.89	85.69
Déc.-1	15.12	12.83	27.95
Déc.-2	14.11	12.12	26.23
Déc.-3	16.46	3.72	20.18
Total	45.69	28.67	74.36

Annexe 6: Capture d'image du panneau des paramètres hydrauliques

Hydraulics parameters

File Help

Reach number: 1

Reach name: Reach name

Reach number 1

Routed reach Nominal reach Reservoir

Contributing sub-catchment: 1 Proportion of contributing sub-catchment: 1

Number of inflowing reaches: 0

Reach numbers

Channel top width (m): 30 Flood plain width (m): 100

Channel base width (m): 15 Flood plain roughness: .06

Channel depth (m): 2

Channel roughness: .033

Reach gradient: .002 Reach length (m): 40000

Annexe 7: Tableau récapitulatif des paramètres hydrologiques d'HYSIM en fonction des types de sol

	Teneur en argile(%)	Indice granulométrique	Pression (mm)	Perméabilité (mm/h)	Porosité	Humidité résiduelle
Sable	3	0.25	120	630	0.40	0.10
Sable limoneux	6	0.23	90	560	0.41	0.10
Marne sableuse	9	0.20	220	125	0.44	0.15
Limon	19	0.15	500	25	0.45	0.15
Limon sableux	28	0.14	300	23	0.42	0.15
Limon argileux	34	0.12	630	9	0.48	0.20
Argile sableuse	43	0.10	150	8	0.43	0.20
Argile limoneuse	49	0.10	490	4	0.49	0.20
Argile	63	0.09	410	4	0.48	0.25

***Annexe 8: présentation des paramètres avancés du modèle hydrologique
HYSIM***

Paramètres	Valeurs
Perméabilité à saturation à la surface de l'horizon superficiel	1000
Proportion de stockage d'humidité dans l'horizon supérieur	0.3
Proportion du bassin versant qui soit sans contribution de nappe souterraine	0
Proportion de zone marécageuse	0
Porosité	0.48
Pression de bouillonnement	630
Coefficient de récession de la nappe souterraine intermédiaire	0.5
Proportion d'humidité quittant les nappes intermédiaires en direction des canaux	0
Facteur d'interception	1

- ♦ **Perméabilité à saturation à la surface de l'horizon superficiel** : La valeur par défaut proposée est : 1000 mm/h.
- ♦ **Proportion de stockage d'humidité dans l'horizon supérieur** : C'est un paramètre difficile à ajuster. Mais, la valeur maximale par défaut est de 0,3.
- ♦ **Proportion du bassin versant qui soit sans contribution de nappe souterraine** : Ce ratio tient compte du fait que les deux bassins pourraient ne pas coïncider.
- ♦ **Porosité** : Le tableau 7 donne une valeur de 0.48
- ♦ **Pression de bouillonnement** : Cette valeur représente la succion capillaire à partir de laquelle, des bulles apparaissent quand le sol est soumis à un assèchement. Le tableau 7 donne une valeur de 630.
- ♦ **Facteur d'interception** : Il correspond à un coefficient de pondération de l'évapotranspiration qui se produit au droit du réservoir d'interception. Valeur par défaut : 1

Annexe 9: Tableau descriptif des types de sol du bassin versant du Kou

CPCS		BRM	Prof. [cm]	Argile [%]	Limons [%]	Sables [%]
FLC	Lixisols	Ferric Lixisols	0-15	9,80	35,30	54,90
			15-35	25,49	23,53	50,98
			35-64	29,41	29,41	41,18
			64-105	27,45	25,49	47,06
FLIMP	Lixisols	Plinthic Lixisols	0-15	10,78	48,05	41,18
			15-45	25,49	47,06	27,45
FLIP	Lixisols	Profondic Lixisols	0-15	13,73	33,33	52,95
			15-40	38,24	22,55	39,22
			40-80	43,14	29,41	27,45
			80-100	37,25	25,50	37,25
FLIPP	Lixisols	Leptic Lixisols	0-13	13,73	39,21	47,06
			13-32	27,45	50,98	21,57
FLIS	Lixisols	Abruptic Lixisols	0-20	5,88	17,65	76,47
FLM	Lixisols	Profondic Lixisols	sol non-analysé, se référer au sol FRI			
FLTC	Lixisols	Gleyic Ferric Lixisols	0-19	12,745	57,845	29,41
			19-50	31,37	42,16	26,47
			50-77	32,35	34,315	33,335
			77-114	33,33	41,18	25,49
			0-8	27,45	15,69	58,86
FRI	Lixisols	Chromic Bathiplinthic Lixisols	8-40	45,1	17,65	37,25
			40-82	45,1	19,61	35,29
			0-15	7,84	17,65	74,51
FTM	Lixisols	Rhodic Lixisols	15-35	28,43	15,685	55,885
			35-110	39,165	13,725	47,06
			sol non-analysé, se référer au sol FRI			
FTH	Lixisols	Gleyic Lixisols	sol non-analysé, se référer au sol FRI			
FRM	Ferralsols	Ferralsols	0-20	12,745	15,685	71,57
			20-45	39,22	15,68	45,1
			45-90	35,29	21,575	43,135
			90-125	39,215	13,725	47,06
			0-15	47,06	39,21	13,73
HPGE	Gleysols	Gleyic Gleysols	15-41	45,1	27,45	27,45
			41-77	50,98	37,26	11,76
			77-107	50,98	33,33	15,69
			trop gravillonnaire, pas d'analyse possible			
LITH	Arenasols	Petroplinthic Arenasols	trop gravillonnaire, pas d'analyse possible			
PEAAH	Fluvisols	Gleyic Fluvisols	0-19	9,80	39,22	50,98
			19-34	11,76	35,30	52,94
			34-87	45,10	45,10	9,80
			87-125	31,37	50,98	17,65
PEEL	Leptosols	Lithic Leptosols	0-8	5,88	27,45	66,67
			8-11	7,84	19,61	72,55

Annexe 10: quelques photos du site

Kou à



Badara



Nasso



Diaradougou



Canal d'aménée du périmètre rizicole



Prise d'eau du Kou à Diaradougou

RESUME

Situé au Sud de la ville de Bobo Dioulasso, capitale économique du Burkina Faso, d'une superficie de 1823 km², le bassin versant du Kou, du fait de ses ressources en eau, est largement exploité pour diverses raisons (alimentation en eau potable, irrigation de zones agricoles,... etc.). Face à la croissance démographique, la mise en place future d'un outil de gestion des ressources en eau de ce dit bassin s'avère indispensable.

L'objectif global de cette étude est la réalisation du bilan d'eau du bassin versant du Kou et s'inscrit dans le cadre d'un travail de recherche contribuant à l'amélioration de la connaissance, de la gestion et de la protection des ressources en eau pour l'agriculture dans la région des Hauts-Bassins.

Cela a nécessité l'utilisation du modèle hydrologique HYSIM. La mise en œuvre de ce modèle, réalisée sur une année hydrologique (année 2000), et particulièrement sur le sous bassin versant de Badara a révélé la relative complexité de ce bassin versant due à la présence de nombreux processus hydrologiques actifs en son sein : ruissellement de surface, contribution de la nappe aux débits d'écoulement, évapotranspiration, infiltration.

Les résultats obtenus sont satisfaisants et indiquent que pour un apport d'eau annuel de 1127.7 mm dont 95% provient de la pluie et 5% provient de la nappe, **77%** (863.8 mm) sont perdu par évapotranspiration, **13%** (151.5 mm) participe au ruissellement de surface et **10%** (112.4 mm) sont perdu par infiltration.

Ces résultats restent un état des lieux pour les décideurs.

Mots clés : modélisation hydrologique, bassin versant, HYSIM, infiltration, ruissellement, évapotranspiration.

SUMMARY

Located southern Bobo-Dioulasso, the economic capital of Burkina Faso, Kou basin, which surface ranges 1823 km² is exploited for many reasons such as irrigation and potable water because of its abundant water resources. Facing the demographic growth, setting up a tool for the management of these water resources proves to be very necessary for water resources managers.

This study which is a research topic for the improvement of knowledge on Bobo water resources has final goal to realize water check on this basin for the management and protection of agricultural water in the region.

HYSIM (hydrologic modeling) base on the year of 2000 was used in this study and was applied on sub basin of Badara. It revealed the complexity of this basin in term of its functioning due to presence of many hydrologic active processes occurring in the basin (surface streaming, infiltration, evapotranspiration and water table's contribution to water flow).

The results of this study are fulfilling and indicate that for an input of 1127.7 mm with 95% coming rainfall and 5% from water table, **77%** are lost by evapotranspiration, **13 %** participate to surface streaming and **10%** are lost by infiltration.

These results should be taken into account by deciders in their water management politics.

Key words: hydrologic modeling, basin, HYSIM, infiltration, streaming, evapotranspiration.