



**DIRECTION DES ETUDES ET DES SERVICES
ACADEMIQUES**

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE D'INGENIEUR
DE L'EQUIPEMENT RURAL**

Présenté par :

Idrissa MAMADOU CHERIF

Thème :

**BILAN EN EAU ET ETUDE COMPARATIVE DES
ECOULEMENTS DU BASSIN VERSANT
DU KOU**

MEMBRES DU JURY

M. Babacar DIENG	Président
M. Harouna KARAMBIRI	Encadreur
M. Amadou Lamine MAR	Membre
M. Alain KENOUCHE	Membre

UTER : GVEA

Soutenu le 22 - 06 - 2006

TABLE DES MATIERES

RESUME	
REMERCIEMENTS	
DEDICACE	
TABLE DES MATIERES	1
LISTE DES FIGURES	4
LISTE DES TABLEAUX	9
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS.....	10
INTRODUCTION GENERALE.....	11
I.1. CADRE DE L'ETUDE.....	11
I.2. PROBLEMATIQUE	11
I.3. OBJECTIFS DE L'ETUDE	13
I.4. METHODOLOGIE.....	13
II. GENERALITES	15
II.1. PRESENTATION DE LA REGION DES HAUTS-BASSINS	15
II.2. PRESENTATION DU PROJET	18
II.2.1. Cadre	18
II.2.2. Généralités.....	18
II.2.3. Objectifs du projet	19
II.2.4. Stratégie.....	19
II.2.5. Résultats attendus.....	19
II.3. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.....	20
II.3.1. Situation géographique	20
II.3.2. Géomorphologie.....	20
II.3.3. Caractéristiques morphométriques.....	22
II.3.4. Climatologie	24
II.3.5. Géologie.....	25
II.3.6. Pédologie	26
II.3.7. Végétation.....	29
II.3.8. Hydrographie.....	30
II.3.9. Occupation des sols	30
III. CONSTITUTION DES DONNEES DE L'ETUDE.....	32
III.1. DONNEES PLUVIOMETRIQUES	32
III.1.1. Choix des stations et des périodes d'observation	32
III.1.2. Contrôle de la qualité des données	34
III.1.3. Etude de la variabilité interannuelle et saisonnière	39
III.1.4. Etude de la variabilité spatiale et calcul de la pluie moyenne sur le bassin	44
III.2. DONNEES HYDROMETRIQUES	47
III.2.1. Inventaire des stations hydrométriques	47
III.2.2. Critique des données	49
III.3. DONNEES D'EVAPOTRANSPIRATION	54
III.4. CONCLUSION	55
IV. MODELISATION.....	57
IV.1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU MODELE	58
IV.1.1. Bases théoriques du modèle	58
IV.1.2. Les variables d'entrée et de sortie du modèle	62
IV.1.3. Les paramètres du modèle.....	63
IV.2. MISE EN ŒUVRE DU MODELE SUR LE BASSIN DU KOU	64
IV.2.1. Choix des échelles de modélisation	64
IV.2.2. Choix des événements à modéliser.....	65
IV.2.3. Choix des périodes et des fonctions critères de calage et de validation	65
IV.2.4. Détermination des paramètres du modèle.....	67

IV.3.	RESULTATS ET DISCUSSIONS	75
IV.3.1.	Analyse de la qualité des résultats du modèle	75
IV.3.2.	Analyse des résultats du calage	76
IV.3.3.	Analyse des résultats de la validation	80
IV.3.4.	Reconstitution des données hydrométriques manquantes	84
IV.3.5.	Conclusion	86
V.	BILAN EN EAU DU BASSIN	87
V.1.	APPROCHE METHODOLOGIQUE	87
V.2.	LES DIFFERENTS TERMES DU BILAN	88
V.2.1.	Les apports pluviométriques	88
V.2.2.	Les écoulements	88
V.2.3.	L'évapotranspiration réelle	89
V.2.4.	La variation du stock des différents réservoirs	89
V.2.5.	Bilan en eau du bassin versant	90
V.3.	LES UTILISATIONS D'EAU	90
V.3.1.	L'AEP de Bobo-Dioulasso	91
V.3.2.	Le périmètre rizicole	91
V.3.3.	L'irrigation informelle	91
V.3.4.	Les utilisateurs pastoraux	92
V.3.5.	Retentions en surfaces et recharge de la nappe	93
V.3.6.	Synthèse des utilisations d'eau	93
V.4.	CONCLUSION	94
VI.	CONCLUSION GENERALE	95
	BIBLIOGRAPHIE	96
	ANNEXES	

AUTEUR : MAMADOU CHERIF Idrissa

Professeur responsable : KARAMBIRI Harouna

Organisme encadreur : GEeau

THEME

Bilan en eau et étude comparative des écoulements du bassin versant du Kou

RESUME

Cette étude entre dans le cadre de la mise au point d'outils techniques destinés à améliorer les connaissances sur les ressources en eau du bassin versant du Kou. Elle porte sur la mise en œuvre d'un modèle hydrologique et le calcul du bilan en eau du bassin versant. Pour ce faire, une base de données hydrométéorologiques a été constituée. Les données pluviométriques et d'évapotranspiration disponibles sont de qualité acceptable, par contre il a fallu trier et corriger les données hydrométriques. La mise en œuvre du modèle a montré des restitutions des principales caractéristiques hydrologiques (débits, volumes...) acceptables tant dans le processus de calage qu'en validation. Il a ensuite été procédé à la reconstitution d'une chronique de débits journaliers sur la période allant de 1986 à 2005. Enfin, le bilan a été calculé, pour une année moyenne, une année décennale sèche et une année décennale humide.

Mots clefs : Bassin versant, pluie, évapotranspiration, sol, nappe, écoulement, modélisation, Kou.

ABSTRACT

This study is a contribution to the development of technical tools intended to improve knowledge on the water resources of the Kou catchment area. It deals with a hydrological modelling approach and the calculation of the water balance of the catchment. For this purpose, a hydrometeorological data base was made up. The rainfall and evapotranspiration recorded data available are of acceptable quality, where as it was necessary to sort and correct the discharge data. The implementation of the model showed acceptable restitutions of the main hydrological characteristics (flows, volume...) as well in the process of calibration as in validation. Then, the reconstitution of daily outflows over the period going from 1986 to 2005 was carried out. Lastly, the water balance was calculated, for an average year, a dry decennial year and a wet decennial year.

Keywords : Catchment, rainfall, evapotranspiration, soil, groundwater, runoff, modelling, Kou.

REMERCIEMENTS

Toutes les louanges sont à Dieu le très miséricordieux, le tout miséricordieux qui nous permet de clore par ce travail, trois longues années d'études. Tes bienfaits sont innombrables mon Seigneur, malgré nos faiblesses et nos manquements ! Guide nos pas vers ce que Tu agrée et ne dévie pas nos cœurs après les avoir guidé.

Qu'il me soit ensuite permis de remercier Messieurs Babacar DIENG, Harouna Karambiri et Amadou Lamine MAR, mes encadreurs dans le cadre de ce mémoire. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma très profonde gratitude pour la disponibilité sans faille consacrée à l'encadrement de ce travail.

Mes sincères remerciements vont de même à M Joost WELLENS pour les moyens mis à notre disposition ainsi que pour sa participation très estimable pour l'encadrement de ce mémoire.

Je tiens à remercier également tout le corps enseignant, le personnel technique et administratif du groupe EIER-ETSHER pour les inestimables efforts qu'ils déploient quotidiennement dans le cadre de notre formation.

Ma pensée va également à l'endroit de tous les membres de la Oumma islamique, la communauté nigérienne et les compagnons et amis de la 35^{ème} promotion grâce à qui nous avons joui au sein d'une ambiance fraternelle et amicale pendant tout le cycle.

Enfin the last but not the least, ma profondeur gratitude va aux organismes du Nord et aux états membres du Groupe EIER-ETSHER qui financent les différentes activités du Groupe.

Que tous et toute trouvent ici l'expression de ma sympathie et de ma profonde reconnaissance.

Dédicace

Dédicace

A mon fils Mouhamad Moujahid que le seigneur a rappelé à lui pendant que je poursuivais ces études, puisse-t-il pardonner mon absence à son chevet...

A ma femme Nahissatou Hassan

A mes enfants Abdallah et Ahmad

A mon père Elhadji Mamadou Cheroumi et mes mères Hadjia Fandi Mahaman Lawal et Kaltoum Mamane

A mon beau père Elhadji Hassan Issa et sa famille

A tonton Ibrahim Abdou

A mon pays

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte de situation du bassin du Kou -----	20
Figure 2 : Carte du modelé de terrain du bassin versant du Kou-----	21
Figure 3 : Découpage en sous-bassins-----	21
Figure 5 : Courbe Hypsométrique du sous bassin de Badara-----	23
Figure 6 : Courbe Hypsométrique du sous bassin de la confluence Niamé-Baoulé -----	23
Figure 7 : Carte géologique du bassin versant du Kou -----	26
Figure 8 : Carte des sols du bassin versant du Kou -----	27
Figure 9 : Carte de végétation de la vallée du Kou -----	29
Figure 10 : Carte d'occupation des terres du bassin versant du Kou-----	31
Figure 11 : Situation géographique des stations pluviométriques -----	34
Figure 12 : Application de la méthode de la moyenne mobile à la station Bobo-Dioulasso--	35
Figure 13 : Application de la méthode de la moyenne mobile à la station de Farako-ba -----	35
Figure 14 : Application de la méthode de la moyenne mobile à la station de Bama -----	35
Figure 15 : Application de la méthode de la moyenne mobile à la station de Nasso -----	36
Figure 16 : Test de la méthode des doubles masses appliquée à la station de Farakoba ---	36
Figure 17 : Test de la méthode des doubles masse à la station de Bama (vallée du Kou) --	37
Figure 18 : Test de la méthode des doubles masse à la station de Nasso -----	37
Figure 19 : Variabilité saisonnière et spatiale de la pluviométrie (moyenne calculée de 1976 à 2005) -----	41
Figure 20 : Polygone de Thiessen des stations pluviométriques (NB : la station de Nasso n'est pas prise en compte) -----	45
Figure 21 : Réseau hydrographique du bassin du Kou et emplacement des stations hydrométriques-----	48
Figure 22 : Chronogramme des débits mesurés aux stations hydrométriques-----	49
Figure 23 : Débits moyens annuels à la station de la confluence et lacunes -----	50
Figure 24 : Débits moyens annuels à la station de Koumi et lacunes -----	50
Figure 25 : Débits moyens annuels à la station de Badara et lacunes-----	51
Figure 26 : « Des débits qui fluctuent sans rapport avec la pluviométrie » : exemple de la Confluence Niamé-Baoulé (1993) -----	52
Figure 27: « Des débits qui fluctuent sans rapport avec la pluviométrie » : exemple de Badara (1997) -----	52
Figure 28 : Variation saisonnière de l'évapotranspiration potentielle -----	54
Figure 29 : Variation interannuelle de L'ETP (de 1976 à 2003)-----	55
Figure 30 : Comparaison de la pluviométrie avec l'évapotranspiration potentielle -----	55
Figure 31 : Schéma de fonctionnement du modèle -----	60
Figure 32 : Paramètres hydrauliques du modèle -----	63

Figure 33 : Valeurs d'entrée des paramètres hydrauliques -----	67
Figure 34 : Comparaison des débits simulés et observés 1997 -----	78
Figure 35 : Comparaison des débits simulés et observés 1997 -----	78
Figure 36 : Comparaison des débits simulés et observés 1998 -----	79
Figure 37 : Comparaison des débits simulés et observés 1999 -----	80
Figure 38 : Comparaison des débits simulés et observés 1999 -----	80
Figure 39 : Comparaison des débits simulés et observés 2000 -----	81
Figure 40 : Comparaison des débits simulés et observés 2000 -----	82
Figure 41 : Comparaison des débits simulés et observés 2001 -----	82
Figure 42 : Comparaison des débits simulés et observés 2001 -----	83
Figure 43 : Comparaison des débits simulés et observés 2002 -----	83
Figure 44 : Comparaison des débits simulés et observés 2002 -----	84
Figure 45 : Variation saisonnière du débit du Kou -----	85
Figure 46 : Variabilité du débit moyen annuel -----	85
Figure 47: Application de la moyenne mobile aux débits simulés -----	86

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1:Caractéristiques morphométriques des bassins versants	24
Tableau 2 : Classification des sols du bassin du Kou	28
Tableau 3 : Inventaire des stations de la base PLUVIOM.....	32
Tableau 4: Inventaire des stations de l'aéroport de Bobo-Dioulasso et de L'INERA	32
Tableau 5 : Inventaire des stations pluviométriques de la DPAH/RH du Houet	33
Tableau 6 : Comblement des lacunes des pluies annuelles	39
Tableau 7 : Pluies journalières maximales annuelles des stations du bassin du Kou	40
Tableau 8 : Station de Bobo-Dioulasso : Quelques quantiles (mm) issus de l'étude.....	42
Tableau 9 : Station de Farakoba : Quelques quantiles (mm) issus de l'étude statistique	42
Tableau 10: Station de Bama Quelques quantiles (mm) issus de l'étude statistique.....	42
Tableau 11 : Station de Nasso : Quelques quantiles (mm) issus de l'étude statistique	43
Tableau 12 : Quelques quantiles (mm) issus de l'étude statistique.....	43
Tableau 13: Coefficients de Thiessen.....	44
Tableau 14 : Pluviométries moyennes (en mm) sur les bassins versants	46
Tableau 15 : Inventaire des stations de la base « Bassin du Kou ».	47
Tableau 16 : Inventaire des débits mesurés	48
Tableau 17 : Synthèse des données hydrométriques et pluviométriques	56
Tableau 18 : Paramètres hydrologiques en fonction de la texture du sol	70
Tableau 19 : Valeurs des paramètres de base issues du calage	75
Tableau 20 : Coefficient de perméabilité en fonction de la texture du sol. (Tiré du cours d'Hydrogéologie de M. DIENG (EIER)).....	76
Tableau 21 : Critère de Nash au calage	77
Tableau 22 : Critère de Nash et erreur relative sur le volume en validation	81
Tableau 23 : Volumes des apports pluviométrique pour des cas de pluies en année moyenne, décennale sèche et décennale humide	88
Tableau 24 : Volumes écoulés correspondant à des exemples de pluies moyenne décennale sèche et humide	88
Tableau 25: Valeurs de l'ETR de 1996, 2001 et 1998	89
Tableau 26 : Variation du stock au cours d'une année moyenne, une année décennale sèche et décennale humide	89
Tableau 27: Bilan en eau du bassin versant du Kou.....	90
Tableau 28 : Composition du cheptel de la zone pastorale de Bobo-Dioulasso.....	92
Tableau 29: Consommation en eau du cheptel	93
Tableau 30: Consommation d'eau du bassin versant du Kou	93

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

A.E.P :	Alimentation en Eau Potable.
APEFE :	association belge d'appui au développement ;
C.I.E.H :	Comité Inter africain d'Etudes Hydrauliques.
DRAHRH/HB :	Direction Régionale de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques des Hauts Bassins.
E.I.E.R-ETSHER :	Groupe des Ecoles Inter-Etats d'Ingénieurs de l'Equipement Rural et des Techniciens Supérieurs de l'Hydraulique et l'Equipement Rural
E.T.P :	Evapotranspiration Potentielle.
F.I.T ::	Front Inter Tropical
GEeau :	Projet Gestion des Ressources en eau du Sud-Ouest du Burkina.
GIRE :	Gestion Intégrée des Ressources en Eau
M.A.H.R.H :	Ministère de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources halieutiques
V.R.E.O :	Projet de Valorisation des Ressources en Eau du Ouest.
S.I.G :	Systèmes d'Informations Géographiques.
PAGIRE :	Plan d'Action pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau

INTRODUCTION GENERALE

I.1. CADRE DE L'ETUDE

La présente étude entre dans le cadre des mémoires de fin d'études d'ingénieur du génie rural du GROUPE EIER-ETSHER de Ouagadougou. Le Groupe EIER-ETSHER est un Institut inter Etats d'enseignement supérieur et de recherche dans les domaines de l'eau, l'énergie, l'environnement et les infrastructures basé à Ouagadougou la capitale du Burkina Faso. Créé en 1968 et émanant de 14 Etats africains francophones, l'école forme des ingénieurs, des techniciens supérieurs et des titulaires de DESS.

Il mène, en collaboration avec des établissements du Nord et du Sud, comme Katholieke Universiteit Leuven (KUL) des travaux de recherche, principalement dans les domaines de l'eau, de l'énergie et de l'environnement.

C'est dans le cadre de cette collaboration que le sujet du présent mémoire a été défini entre le projet « *GEeau* » de Bobo-Dioulasso et « *l'Unité Thématique d'Enseignement et de recherche en gestion et valorisation de l'eau et de l'assainissement* » du Groupe EIER-ETSHER. Ce sujet est intitulé « ***Bilan en eau et étude comparative des écoulements du bassin versant du Kou*** ».

Le rapport est subdivisé en six parties :

- Partie I : Introduction générale où nous exposons le cadre, la problématique et les objectifs de l'étude d'une part et d'autre part la méthodologie adoptée pour répondre aux questions soulevées ;
- Partie II : On y présente les généralités sur la région des Hauts-Bassins, Le promoteur du thème de cette étude ainsi que sur le site de l'étude ;
- Partie III : C'est l'étape de la constitution de la base des données de l'étude ;
- Partie IV : Cette partie est consacrée à la modélisation ;
- Partie V : Etude du bilan ;
- Partie VI : Conclusion générale.

I.2. PROBLEMATIQUE

Le bassin versant du Kou avec une superficie de 1821 km² comprenant le système hydraulique de la rivière du Kou, ses affluents et les sources de Nasso, constitue une importante ressource en eau.

Cette ressource assure d'une part, l'alimentation en eau d'une population estimée en 2003, à 600 000 habitants dont celle de Bobo-Dioulasso la 2^{ème} ville du pays. Une population appelée à franchir le cap du million en 2025 ! Elle permet d'autre part l'irrigation de vastes périmètres agricoles dont la superficie totale qui avoisine 3200 ha est en constante augmentation notamment du fait du développement d'une filière « fruits et légumes » sous

l'impulsion de l'initiative privée. Cette production irriguée est à l'origine du développement d'activités économiques de transports, transformations et commerce qui font l'essor de la ville de Bobo-Dioulasso.

Dans le contexte climatique actuel du Burkina, marqué par une baisse de la pluviométrie, une telle tendance à la hausse des différentes utilisations de cette ressource, n'a pas manqué d'entraîner un déséquilibre au niveau de la satisfaction des besoins en eau. Citons à titre d'exemple, le cas du principal périmètre rizicole de la vallée du Kou (1200ha), qui est confronté à des déficits hydriques pendant les mois de janvier à mai.

Le développement industriel consécutif au développement de la production agricole constitue également, avec ses rejets incontrôlés d'effluents divers, une autre menace sérieuse cette fois-ci, sur la qualité de ces eaux.

Pour faire face à cette nouvelle donne et dans la perspective de créer les conditions d'un développement durable, l'Etat burkinabé a mis en place une politique de gestion intégrée des ressources en eau. Cette politique se traduit dans les faits, par les objectifs assignés aux différents projets intervenant dans la zone parmi lesquels se trouve le projet GEeau initiateur de la présente étude.

Toute gestion des ressources en eau pour être efficace, doit en effet partir de leur bonne connaissance. A cet effet, il peut être utile de rappeler que "la mesure quantitative et qualitative des éléments du cycle hydrologique et la mesure des autres caractéristiques de l'environnement qui influent sur l'eau constituent une base essentielle pour une gestion efficace de l'eau" (Déclaration de Dublin, 1992). Au Burkina Faso, pays où les eaux de surface jouent un rôle primordial, la compréhension et l'analyse du bilan hydrologique est de fait, la base de toute étude et réflexion au sujet de la gestion des eaux.

Atteindre un tel objectif suppose la disponibilité de données hydrométéorologiques portant sur une longue période et couvrant d'une manière adéquate la zone d'étude. Si aujourd'hui une telle exigence est relativement satisfaite pour la pluviométrie dans le cas de la vallée du Kou, on ne peut pas en dire autant des débits dont les stations de mesures sont récentes. En pareille situation, la solution couramment adoptée est de faire recours aux modèles mathématiques qui permettent alors de transformer les pluies en débits et de fournir une série de longueur comparable à celle de la pluviométrie.

C'est dans cette optique, que le thème de cette étude a été mis au point par le projet GEeau et l'unité thématique d'enseignement et de recherche en gestion et valorisation de l'eau et de l'assainissement du Groupe EIER-ETSHER.

I.3. OBJECTIFS DE L'ETUDE

Cette étude a pour objectif général de contribuer à la connaissance des ressources en eau du bassin versant du Kou en vue d'une gestion efficace et durable. Ses objectifs spécifiques sont :

- La mise en place d'une base de données assainies par une synthèse et la valorisation des données hydrométéorologiques et de sol disponibles ;
- Mise en œuvre à l'échelle du bassin versant d'une démarche de modélisation, à l'aide d'un logiciel (HYSIM) ;
- Le calcul du bilan en eau pour quelques scénarii de saisons des pluies.

I.4. METHODOLOGIE

La méthodologie adoptée pour cette étude s'articule en trois points :

1) Recherche documentaire

Elle comprend

- Une revue des connaissances bibliographiques relatives à la zone d'étude et à la modélisation hydrologique en général. Il s'est agit dans un premier temps de faire le point des différentes études ayant porté sur la zone d'étude et ayant trait au thème. Notre regard s'est également porté sur des études similaires effectuées dans d'autres régions du monde. En deuxième lieu, nous avons approfondi nos connaissances en modélisation hydrologique.
- La prise en main de l'outil de modélisation : Ceci inclut les techniques d'importation et d'exportation des données, le test de sensibilité des paramètres, et les stratégies de calage.
- La collecte des données relatives au site : Il s'agit de cartes diverses, de données numériques hydrométéorologiques, de données sur le sol et de données générales sur le site.

2) Visite de terrain

Elle a eu pour but de faire:

- des observations sur les caractéristiques générales du site : nature du terrain, relief, végétation ;
- une appréciation in situ de la configuration actuelle du réseau hydrographique ;
- une appréciation visuelle de l'occupation de l'espace, les positions relatives des différents utilisateurs vis-à-vis du cours d'eau, etc. ;
- des observations de la manifestation des menaces sur la qualité des eaux.

3) Travaux de bureaux

Les travaux de bureau ont porté sur les points suivants :

- Constitution des séries de données pluviométriques : le protocole adopté à cette fin est le suivant :
 - a) Choix des stations suivant des critères comme la position géographique, la longueur de la série, absence de lacunes...
 - b) Contrôle de la qualité des données par l'emploi des méthodes classiques de doubles masses et de la moyenne mobile.
 - c) Remplissage des « lacunes » éventuelles et passage des pluies ponctuelles aux pluies moyennes sur le bassin versant suivant la méthode des polygones de Thiessen.
 - d) Analyse de la variabilité interannuelle et saisonnière à l'aide d'ajustement à des lois statistiques ;
- Constitution des séries de données hydrométriques :

A ce niveau, nous avons fait l'inventaire des données disponibles, leur critique et leur correction quand cela est nécessaire et faisable.
- Modélisation : c'est la plus laborieuse de toutes les étapes. Elle comporte les points suivants :
 - a) Préparation et transfert des données vers le modèle ;
 - b) Nous procédons ensuite au calage ou calibration du modèle c'est-à-dire le choix du jeu de paramètres optimaux pour la transformation pluie-débit.
 - c) La validation consistera à vérifier la pertinence et le réalisme du choix des paramètres sur une période autre que celle ayant servi au calage.
 - d) La simulation va consister à déterminer à l'aide du modèle calé les débits des années sans observations hydrométriques.
- Calcul du bilan hydrologique : Les résultats des simulations ci-dessus évoquées vont nous permettre de faire le bilan sur des années caractéristiques comme la moyenne, la décennale sèche....

II. GENERALITES

Le thème de ce mémoire a été défini par « *l'Unité Thématique d'Enseignement et de Recherche en Gestion et Valorisation de l'Eau et de l'Assainissement* » du Groupe EIER-ETSHER, en collaboration avec « *le projet de renforcement structurel de la capacité de gestion des ressources en eau pour l'agriculture dans le bassin du Kou* » basé à la Direction Régionale de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques des Hauts-Bassins (DRAHRH/HB). Nous commençons de ce fait, ce rapport par une présentation de la région, du projet et de la zone d'étude.

II.1. PRESENTATION DE LA REGION DES HAUTS-BASSINS

La région des Hauts-Bassins est située à l'ouest du Burkina. Elle s'étend sur une superficie de 26606 km² (9,4 % du territoire national). Elle est limitrophe à l'est des régions du Sud-Ouest et de la Boucle du Mouhoun, à l'ouest de la République du Mali, au nord de la région de la Boucle du Mouhoun et la République du Mali et au sud de la région des Cascades.

Sur le plan administratif, elle est subdivisée en trois (3) provinces : Le Houet, le Kéné Dougou et le Tuy. Il faut également citer une sous-subdivision en 33 départements, 3 communes urbaines, 30 communes rurales et 449 villages. Bobo-Dioulasso est le chef-lieu de cette région.

La population de la région des Hauts-Bassins était estimée, en 2002 à 1232 891 habitants (10,4 % de la population du Burkina), soit une densité d'environ 48 habitants/km². Il s'agit d'une population cosmopolite, on y rencontre toutes les ethnies du pays ; les populations dominantes en nombre sont les Bobos, autochtones du terroir, les Mossis et les peulhs, allogènes venus du Nord du pays.

A l'instar de tout le Burkina Faso, les principales activités économiques y demeurent l'agriculture et l'élevage.

L'agriculture hivernale est dominée par la production de coton et de céréales (maïs, sorgho, mil, sésame, fonio...). La riziculture et la maraîcher-culture se pratiquent sur les périmètres irrigués. On note également la présence d'exploitations fruitières dont le nombre est actuellement en pleine croissance. La production agricole est excédentaire.

Bilan en eau et étude comparative des écoulements du bassin versant du Kou GENERALITES

Dans la région des Hauts-Bassins, la province du Houet est la zone par excellence de l'élevage. Les ressources halieutiques ne sont pas négligeables non plus, mais la pêche est de type artisanal.

La région des Hauts-Bassins est une des principales zones industrielles du Burkina Faso. La province du Houet est celle qui possède le plus grand nombre d'unités industrielles d'une certaine importance, après celles du Kadiogo. Les plus importantes interviennent dans la fabrication d'ouvrages en métaux, de produits alimentaires, de boissons, de tabac et de textile.

Du fait de la position de carrefour international de Bobo-Dioulasso, le commerce y occupe une place de choix. Un grand nombre de maisons de commerce nationales et étrangères ont leur siège à Bobo-Dioulasso.

La région est bien desservie pour ce qui est des infrastructures socioéconomiques : sans être exhaustif, on pourra citer :

les infrastructures de communication : dix radios dont un d'Etat, six privés et trois communautaires.

la couverture en infrastructures de santé est globalement satisfaisante : 193 formations sanitaires en 2002.

en matière de transport, le réseau routier représente 10% du réseau national soit 1517 km. Il est constitué de 22% de routes bitumées du Burkina, 3% de routes en terre ordinaire et 7% de routes en terre moderne. La région est traversée par plus de 100 km de chemin de fer et dispose d'un aéroport de classe internationale.

La problématique de développement de la région se fonde sur les atouts économiques. En effet, elle dispose d'un potentiel naturel à même d'assurer et de soutenir les objectifs de développement. Ce potentiel naturel constituée d'eau, de sols etc., est surtout favorable aux activités de production agricole, d'élevage et de production minière. Ce qui en fait une des régions les plus favorisées du Burkina Faso.

Le relief de la région est marqué par la présence de plateaux et de plaines auxquels s'ajoutent quelques buttes, collines et vallées.

Le climat est tropical, de type nord-soudanien et sud-soudanien. Il est marqué par 2 grandes saisons : une saison humide qui dure 6 à 7 mois (mai à octobre/novembre) et une saison sèche qui s'étend sur 5 à 6 mois (novembre/décembre à avril). La région bénéficie d'une pluviométrie moyenne annuelle comprise entre 800 et 1 100 mm.

Bilan en eau et étude comparative des écoulements du bassin versant du Kou
GENERALITES

La particularité de la topographie et du climat de la région des Hauts-Bassins, en fait un véritable "château d'eau". C'est dans cette région que les principaux fleuves du Burkina prennent leur source : Le Mouhoun, le Banifing et le Tuy (Grand Balé).

La végétation d'ensemble de la région est essentiellement une végétation de savane comportant tous les sous-types depuis la savane boisée jusqu'à la savane herbeuse.

La faune est assez riche et variée du fait de l'existence de nombreuses forêts classées (16 au total).

II.2. PRESENTATION DU PROJET

II.2.1. Cadre

Le « projet de renforcement structurel de la capacité de gestion des ressources en eau pour l'agriculture dans le bassin du Kou » est un des fruits de la coopération entre la région Wallonne du royaume de Belgique et le Burkina Faso. Il entre dans le cadre de la mise en oeuvre des actions du « Plan d'Action pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau » PAGIRE. La « Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) » est, en effet, la stratégie adoptée par l'état burkinabé pour atteindre ses objectifs en matière d'eau qui se résumant en les points suivants :

- satisfaction durable des besoins en eau ;
- protection contre l'action agressive de l'eau ;
- amélioration des finances publiques par le partage de charges ;
- prévention des conflits dans la gestion des ressources en eau.

Ce projet s'inscrit également dans le cadre de la mise en oeuvre du programme « Valorisation des ressources en eau de l'Ouest » (VREO), qui est un programme national relatif aux ressources en eaux couvrant la moitié Ouest du pays.

Enfin, il s'inscrit en continuité du projet de recherche « GEeau », initié par la DRAHRH/HB, le groupe EIER/ETSHER et la Katholieke Universiteit Leuven (KUL), et cherche à lui assurer un environnement institutionnel et organisationnel adapté au développement, à la pérennisation de ses résultats et à sa duplication dans la région Ouest du pays.

II.2.2. Généralités

Nous présentons dans l'encadré ci-dessous la fiche donnant les renseignements généraux sur le projet.

Fiche de projet

Intitulé : Projet de renforcement structurel de la capacité de gestion des ressources en eau pour l'agriculture dans le bassin du Kou ;

Zone d'intervention : Bassin versant du Kou (Région des Hauts-Bassins) ;

Thème : Préservation de l'environnement ;

Secteurs et sous secteurs : Politique agricole et gestion administrative des ressources en eau à usage agricole ;

Durée de mise en oeuvre : 48 mois ;

Sources de financement : Région Wallonne (Belgique) ;

Maître d'oeuvre : APEFE ;

Maître d'ouvrage : Ministère de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des ressources Halieutiques

II.2.3. Objectifs du projet

Le principal objectif général du projet est de contribuer à la mise en œuvre de la GIRE. Son objectif spécifique est le renforcement des connaissances, de la gestion, la valorisation et la protection des ressources en eau pour l'agriculture dans la région des Hauts-Bassins.

II.2.4. Stratégie

- La stratégie retenue est basée sur le renforcement des capacités institutionnelles et de gestion de l'eau pour l'agriculture au niveau local :

Intégration de l'intervention dans les perspectives d'action du Comité de Gestion du Bassin du Kou ;

- Amélioration de la productivité de l'eau en agriculture vivrière ;
- Appui à la pérennisation des actions.

II.2.5. Résultats attendus

Les résultats attendus de ce projet sont :

- ❖ Mise au point d'outils techniques destinés à améliorer les connaissances sur les ressources en eau du bassin (bilan hydrique) et à servir au suivi/évaluation de la situation dans le bassin quasiment en temps réel, afin de servir à la gestion et à la planification des ressources en eau.
- ❖ Transfert de connaissances vers les autres acteurs locaux qui se seront ainsi appropriés, les outils de gestion élaborés au cours du projet pour leurs propres intérêts.
- ❖ Valorisation de la démarche sur un autre bassin après une étude de transposabilité.
- ❖ Créer les conditions d'une capitalisation de l'acquis de ce projet et des études antérieures déjà effectuées ou des expertises locales reconnues sur la zone par la mise en place d'une structure capable de conserver ces informations, mais aussi et surtout de les exploiter à des fins de recherche pour des activités liées à la GIRE.

II.3. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

II.3.1. Situation géographique

Le bassin versant du Kou est l'espace géographique situé à l'ouest du Burkina Faso dans la région des Hauts-Bassins, entre les longitudes 4°40'O et 4°10'O et les latitudes 11°N et 11°30N et drainé par la rivière du même nom. Cette rivière qui est un affluent du Mouhoun (ex Volta noire) draine ainsi une superficie de 1821km².

La **figure 1** présente la carte de situation du bassin versant.

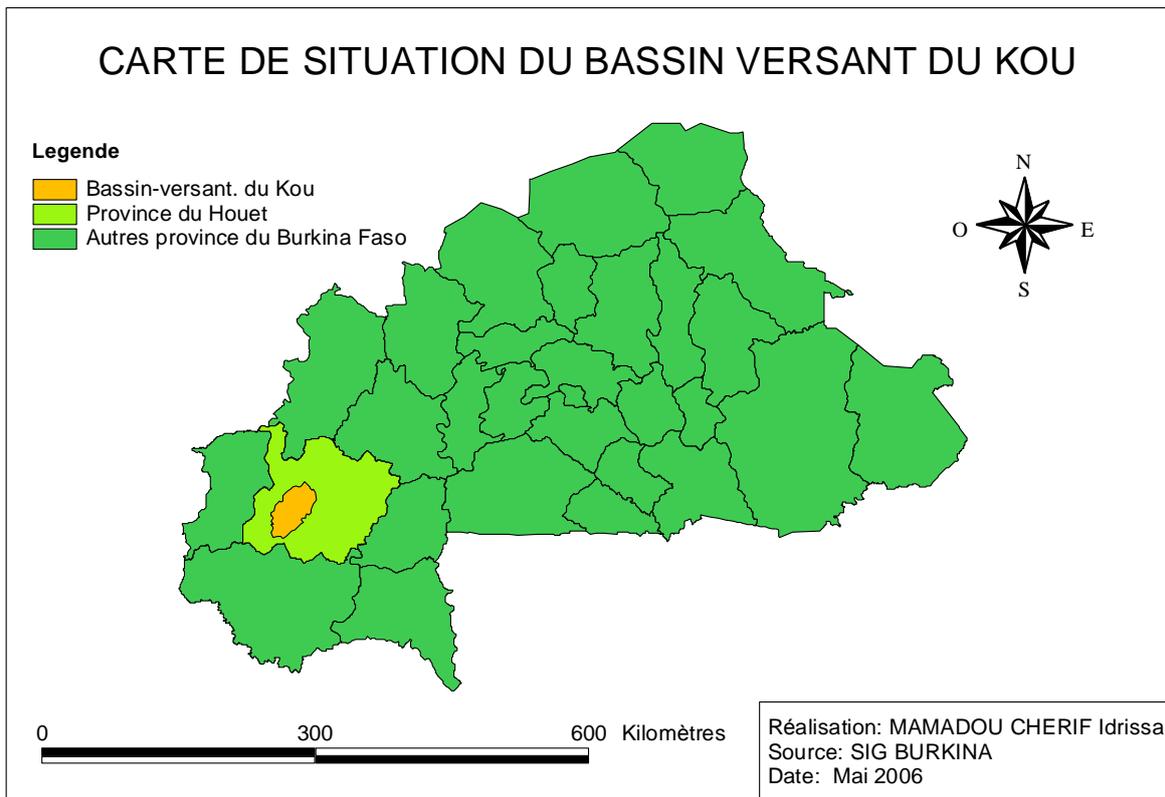


Figure 1 : Carte de situation du bassin du Kou

II.3.2. Géomorphologie

Le bassin du Kou a une forme allongée. Il est orienté Nord-est /Sud-ouest avec, une longueur de 51 km et une largeur de 33 km. Il est constitué essentiellement d'un plateau gréseux culminant aux environs de 500 m d'altitude au sud et s'abaissant progressivement jusqu'à 300 m à l'aval de la plaine, vers Baoulé, le point de confluence avec le Mouhoun. L'altitude moyenne est de 407 m (**figure 2**).

On peut le subdiviser en trois sous bassins emboîtés qui sont (**figure 3**) :

- Sous-bassin de Koumi : 347 km² ;
- Sous-bassin de Badara : 989 km² ;
- Sous-bassin de la confluence Niamé-Baoulé : 1605 km².

Bilan en eau et étude comparative des écoulements du bassin versant du Kou
GENERALITES

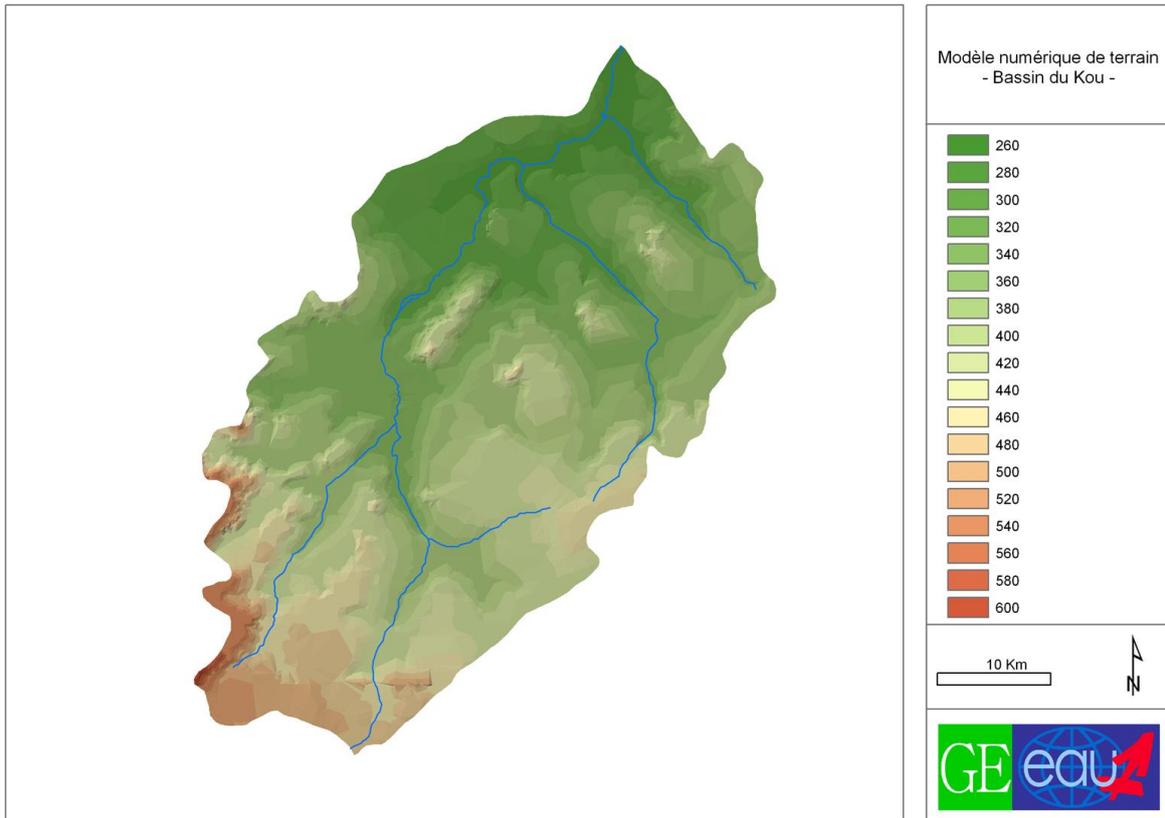


Figure 2 : Carte du modelé de terrain du bassin versant du Kou

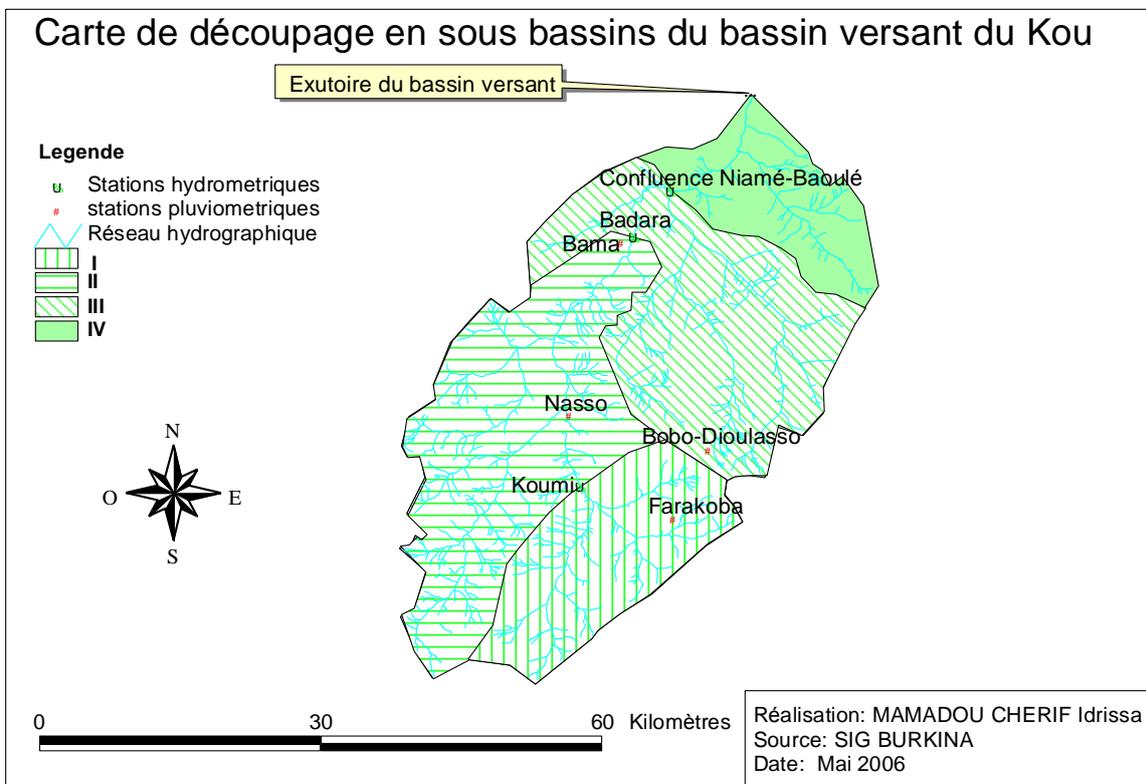


Figure 3 : Découpage en sous-bassins

(NB. I= sous-bassin de Koumi ; I+II= sous-bassin de Badara ; I+II+III=sous bassin de Confluence ; I+II+III+IV= bassin versant du Kou)

II.3.3. Caractéristiques morphométriques

Les caractéristiques de forme et de relief des sous-bassins résumées au **tableau 1** ont été déterminées par BICABA (1991).

- **Superficie du bassin versant (S)**

La délimitation du bassin versant a été faite sur une carte IGB au 1/200 000.

La mesure de la superficie a été effectuée à l'aide d'un planimètre.

- **Périmètre (P)**

Il a été mesuré sur la carte au 1/200 000.

- **Rectangle équivalent**

Le rectangle équivalent est un rectangle ayant la même superficie, le même indice de compacité et la même distribution hypsométrique que le bassin versant. Sa longueur (L) est donnée par l'expression :

$$L = S^{1/2} * (I_{comp} / 1,128) * [1 + (1 - (1,128 / I_{comp})^2)^{1/2}]$$

avec S, surface du bassin versant et I_{comp} , indice de compacité.

- **Indice de compacité (I_{comp})**

Il correspond au rapport du périmètre du bassin versant à celui d'un cercle de même superficie et s'exprime par la relation suivante :

$$I_{comp} = 0.282 * P * S^{-1/2} \text{ avec,}$$

P : périmètre stylisé du bassin versant en km ;

S : superficie du bassin versant, en km².

- **Indice global de pente (I_g)**

Cet indice caractérise le relief d'un bassin et il est défini par la formule suivante :

$$I_g = \Delta H / L$$

Où, ΔH est lu sur la courbe hypsométrique¹ (**figure 4 à 6**) et représente la dénivelée exprimée en mètres, entre les altitudes ayant approximativement 5% et 95% de la superficie du bassin versant au dessus d'elles.

L est la longueur du rectangle équivalent, exprimée en km.

Relief fort pour $100 < D_s$

D_s est donnée par la relation suivante : $D_s = I_g * \sqrt{S}$

¹ Courbe représentant le pourcentage de la superficie du bassin versant située au-delà d'une altitude H donnée en fonction de cette altitude.

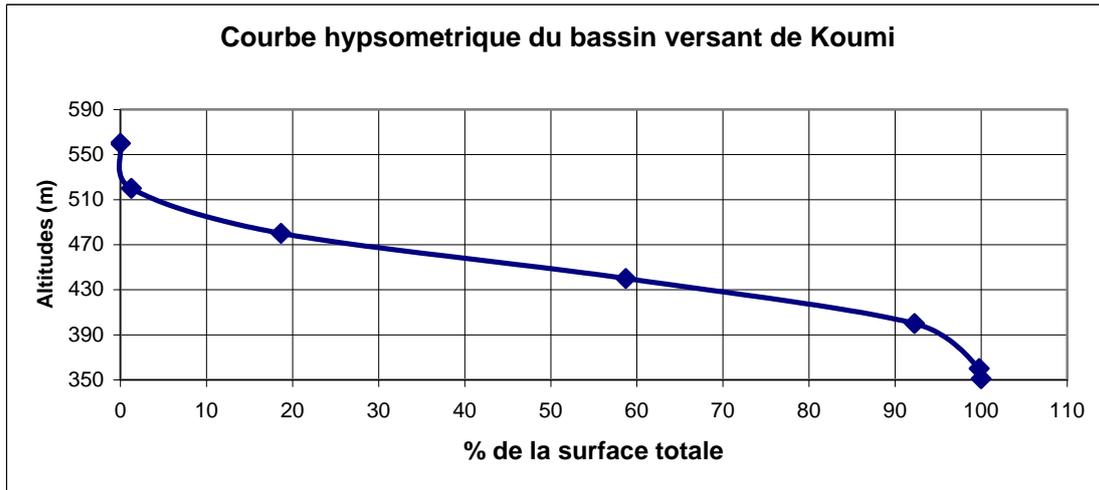


Figure 4 : Courbe Hypsométrique du sous bassin de Koumi

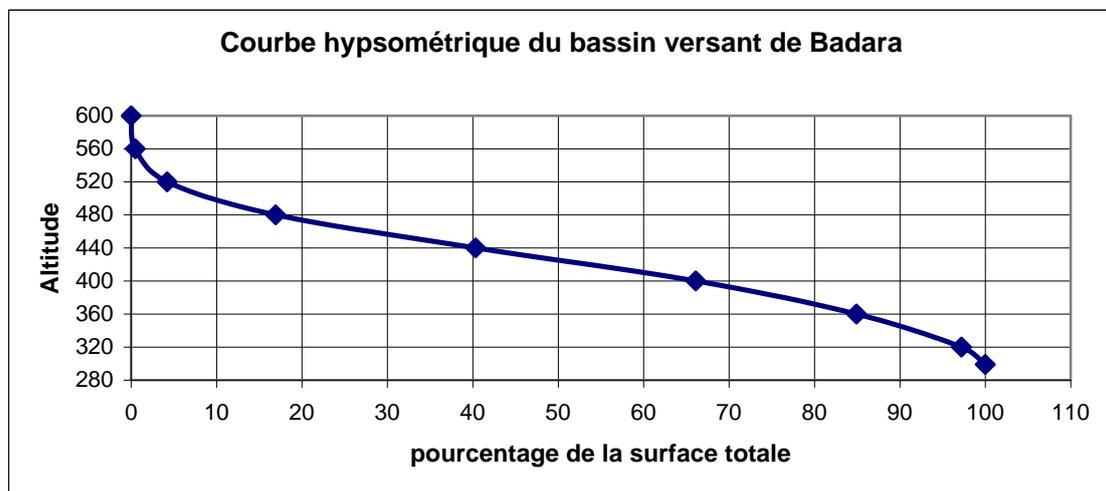


Figure 5 : Courbe Hypsométrique du sous bassin de Badara

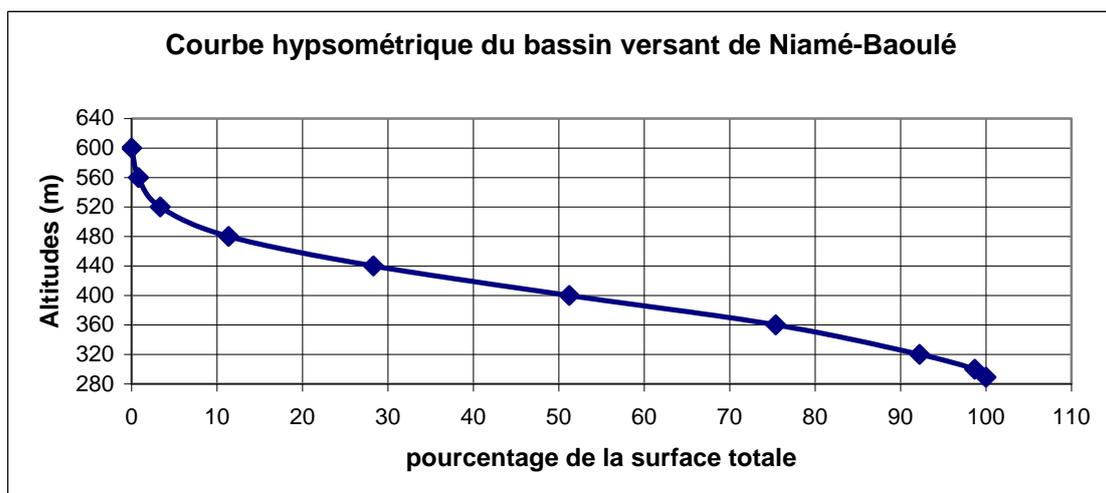


Figure 6 : Courbe Hypsométrique du sous bassin de la confluence Niamé-Baoulé

▪ **Dénivelée spécifique (Ds)**

Elle permet de classer le relief du bassin en :

Relief faible pour $Ds < 50$ m ;

Relief modéré pour $50 \text{ m} < Ds < 100$ m ;

Tableau 1:Caractéristiques morphométriques des bassins versants

Sous-Bassins Versants	Koumi	Badara	Confluence
Caractéristiques			Niame-Baoulé
Superficie (km ²)	347	989	1605
Périmètre stylisé (m)	77	151	175
Coefficient de Gravelius	1,15	1,37	1,26
Longueur du rectangle équivalent (km ²)	24,2	59,30	64.03
Largeur du rectangle équivalent (km ²)	14,20	16,00	23,80
Indice global de pente (m/km)	4,80	3,17	3,17
Densité de drainage	0,65	0,68	0,58
Dénivelée spécifique (m)	89,4	97,5	127
(nature du relief)	(Modéré)	(Modéré)	(Fort)

II.3.4. Climatologie

Le bassin versant du Kou se situe à la limite sud de la zone climatique tropicale soudano-sahélienne. Ses caractéristiques climatiques sont :

▪ **Températures**

L'amplitude thermique annuelle est faible : La température moyenne mensuelle minimale varie toute l'année de 17 à 22°C tandis que la température moyenne maximale varie de 33 à 37°C en saison sèche et de 29 à 34°C en saison des pluies.

▪ **Les vents**

On note l'influence de deux vents dominants :

L'harmattan ou alizé, vent chaud et sec des anticyclones du Sahara, de secteur Nord-Est à Est et soufflant pendant la saison sèche ;

la mousson, vent de secteur Sud-ouest chargé d'humidité et provenant de la zone équatoriale.

La limite de séparation entre ces deux masses d'air ou Front Inter Tropical (FIT) connaît au cours de l'année, un déplacement du Sud au Nord, ce qui se traduit par l'alternance de deux saisons bien distinctes:

- une saison humide qui dure 6 à 7 mois (mai à octobre) ;
- une saison sèche qui s'étend sur 5 à 6 mois (de novembre à avril).

▪ **Insolation**

La durée moyenne pour l'ensoleillement est de 7 h 42'. L'insolation varie de 7.5 mm/j à 8.7 mm/j. Elle est à son minimum en juillet-août et maximale en avril-mai.

▪ **Humidité de l'air**

L'humidité de l'air est très faible en saison sèche (20 – 40 %) tandis qu' en saison de pluie, elle atteint 70 à 80% voire 90 % au cours des averses.

II.3.5. Géologie

La description de la géologie est basée sur les travaux de IWACO cité par BICABA (1991).

La géologie du bassin du Kou est une superposition de grés encastrés entre un socle essentiellement granito-gneissique de roches orthométamorphiques et éruptives au fond, et une couche de dépôts récents ou de latérite en surface, composée de sables et d'argiles (**figure 7**).

De bas en haut, on distingue :

- Le socle : absolument imperméable, composé de roches plutoniques (migmatites et granites différenciés) et de roches métamorphiques birrimiennes (schistes micacés, schistes gréseux, schistes verts amphiboles).
- Les grés de base qui sont des grés à grains grossiers de silice, ou de feldspaths, très fissurés d'une épaisseur de 200 m environ, très peu latérisés bien que poreux et perméables.
- Les grés de Sotuba, glauconieux, sur une épaisseur de 80 m, d'allure schisteuse, poreux, fissuré et très latérisés.
- Les grés siliceux à ciment argileux de Bobo-Dioulasso, aux faciès nombreux (schistes de Toun, grés de Koutiala et grés de Bandiagara). Ils sont tendres, hétérogènes et très latérisés.
- Des roches éruptives basiques (dolérites et basaltes), imperméables, infiltrées dans les fissures des grés.
- La couverture quaternaire, constituée d'alluvions sablo-ferrugineux de granulométrie disparate, d'une profondeur d'environ 30 m, passablement latérisés.

Les formations superficielles sont constituées de cuirasse latéritique et d'alluvions dans les bas-fonds.

Cette géologie qui constitue une situation favorable au stockage et à la transmission de l'eau souterraine est de ce fait l'un des déterminants principaux du système d'eau du bassin du Kou.

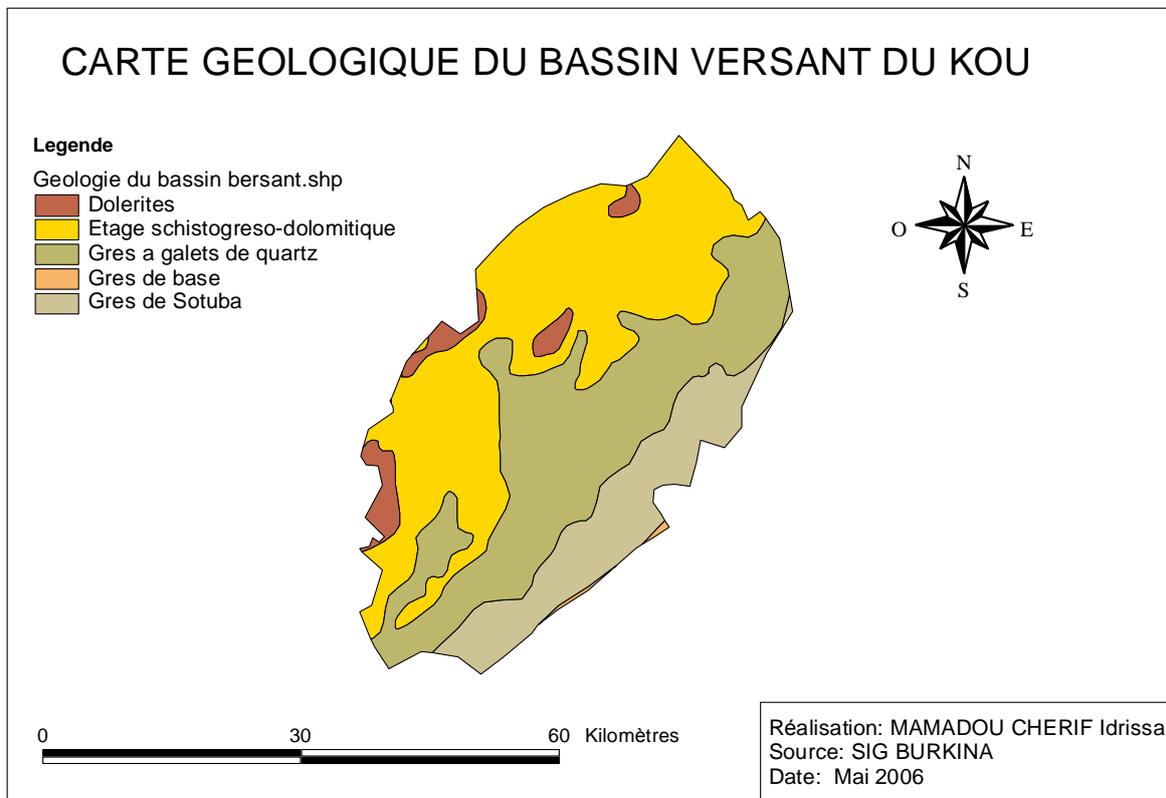


Figure 7 : Carte géologique du bassin versant du Kou

II.3.6. Pédologie

Le **tableau 2** donne les détails des types de sols en présence sur le bassin, ainsi que leurs profondeurs respectives tandis que la **figure 8** donne leur répartition géographique. On remarquera l'omniprésence des sols ferrugineux tropicaux lessivés, des sols ferrallitiques et de sols peu évolués superficiels.

Selon la classification de R. BOULET et R. FAUCK cités par BICABA (1991) on peut distinguer deux catégories de sols dans le bassin :

- Les sols profonds (>100 cm), ce sont :
 - les sols argilo-sableux en surface, argileux en profondeur, riches en base saturées et le plus souvent d'excellente qualité.
 - les sols limono-argileux à argilo-limoneux en surface, argileux en profondeur, caractérisés par un drainage interne et un drainage externe faibles ;
 - les sols sableux en surface, argileux en profondeur (présence de sols mal drainé) ;
les sols sableux en surface et sablo-argileux en profondeur.

Bilan en eau et étude comparative des écoulements du bassin versant du Kou
GENERALITES

- Les sols à profondeurs faibles (<40 cm) : ce sont les sols gravillonnaires de faible valeur agricole.

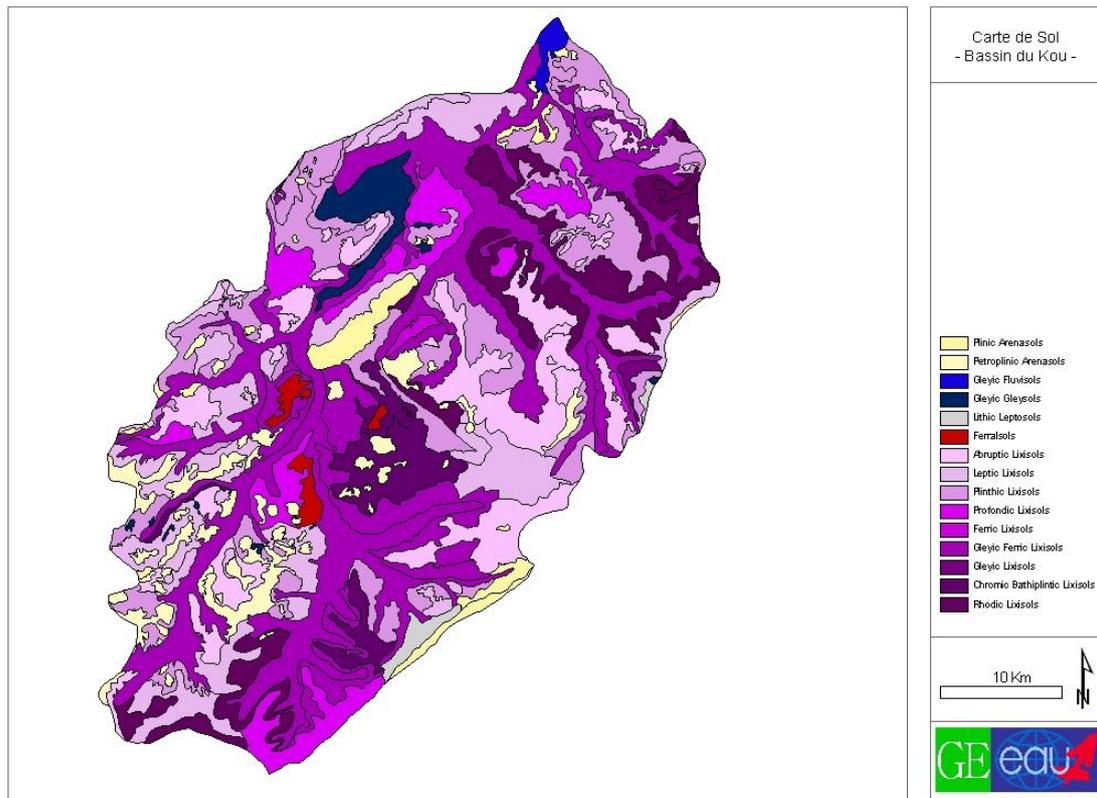


Figure 8 : Carte des sols du bassin versant du Kou

Tableau 2 : Classification des sols du bassin du Kou

Symboles	Classification CPCS 1967		Classification BRM 2001		Profondeur (m)
	Classes de sols	Groupes de sols	Unités de sols de référence	Unités inférieures des sols de référence	
LITH	Sols minéraux bruts d'érosion	Sols minéraux bruts d'érosion lithiques	Leptosols	Leptosols lithiques	0
PEEL	Sols peu évolués	d'érosion lithiques	Leptosols	Leptosols lithiques	<15
PEER		d'érosion Régiques	Régosols	Régosols épi squeletiques	50
PEACM		d'apport colluvio-alluvial modal	Fluvisols	Lixisols ferriques	70
PEAAH		d'apport alluvial hydromorphe	Fluvisols	Fluvisols gleyiques	
BEHV	Bruns eutrophe tropicaux	hydromorphes vertiques	Cambisols	Cambisols vertiques gleyiques	114
VV	Vertisols	Vertisol vertique	Vertisols	Vertisols magiques pelliques	100
FLIS	Sols ferrugineux tropicaux lessivés	superficiels	Lixisols	Plinthosols épi pétriques ferriques	20
FLIPP		indurés peu profonds	Lixisols	Plinthosols épi pétriques	32
FLIMP		indurés moyennement profonds	Lixisols	Plinthosols épi pétriques	42
FLIP		indurés profonds	Lixisols	Lixisols endo petroplithiques	101
FLM		modal	Lixisols	Lixisols chromques	120
FLC		à concrétions	Lixisols	Lixisols ferriques	105
FLTC		à taches et à concrétions	Lixisols	Lixisols gleyiques ferriques	110
FRR		Sols ferrallitiques	faiblement désaturés remaniés faiblement rajeunis	Ferralsols	Lixisols rhodiques
FRI	faiblement désaturés en B remaniés indurés		Ferralsols	Lixisols chromiques bathiplinthiques	82
FRM	désaturés en B remaniés modaux		Ferralsols	Lixisols rhodiques	125
FTM	faiblement désaturés		Ferralsols	Lixisols rhodiques	110

		en B typiques modaux			
FTH		faiblement désaturés	Ferralsols	Lixisols gleyiques rhodiques	120
		en B typiques hydromorphes			
HPGE	Sols hydromorphes humifères	à pseudogley d'ensemble	Gleysols	Gleysols gleyiques	107

II.3.7. Végétation

La végétation du bassin (**figure 9**) est à dominance de type savane arbustive à arborée composée de *Butyrospermum parkii* et de *Detarium microcarpum* ; On trouve également des zones à végétation de savane arborée à boisé et forêt claire (*Isobertia doka*, *Burkea africana*, *Terminalia spp.*) et des zones à végétation de savane arborée à arbustive et boisé (*Burkea africana*, *Butyrospermum parkii*, *Pterocarpus erinaceus*).

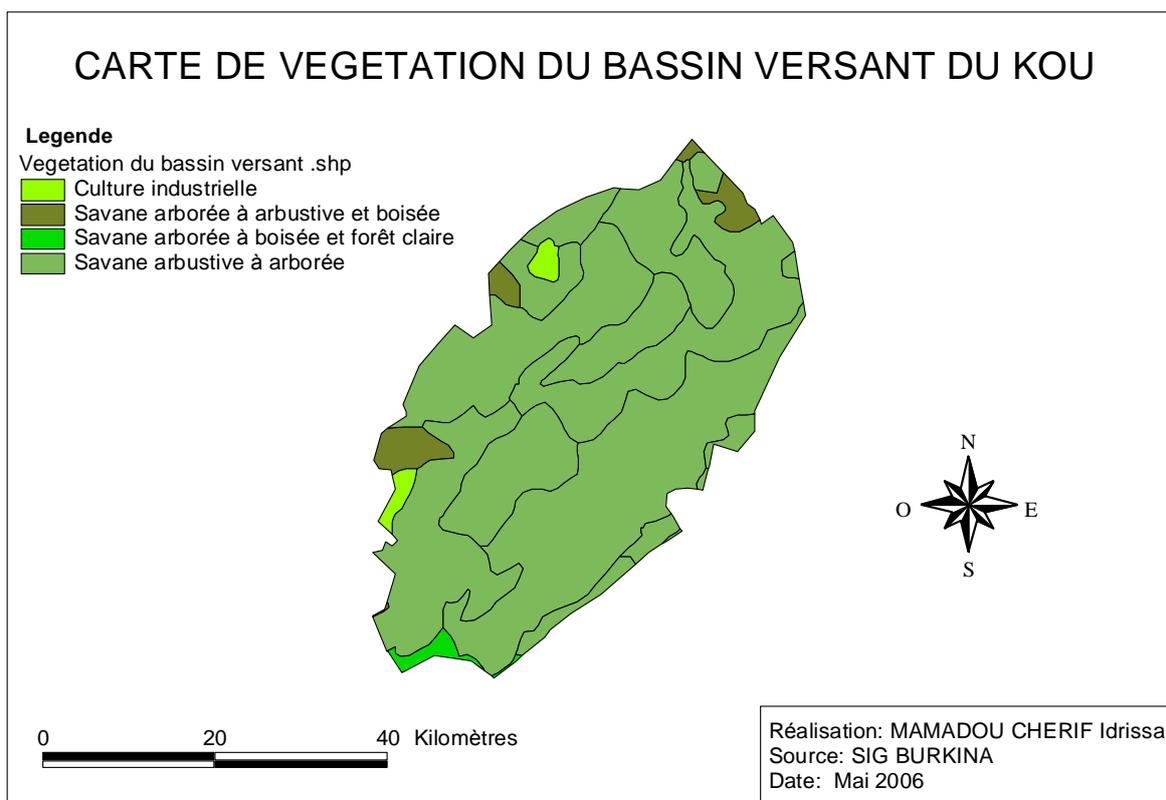


Figure 9 : Carte de végétation de la vallée du Kou

II.3.8. Hydrographie

Le réseau hydrographique est dense et est constitué d'un ensemble de rivières, sources et mares.

II.3.8.1. Les rivières

Le Kou est une rivière pérenne qui prend sa source aux environs de Kodala à une trentaine de kilomètres au sud-ouest de Bobo-Dioulasso. L'altitude est de 440 m dans ces régions. Il est formé par la jonction de deux marigots Kiéné et Farakoba et coule vers le Nord recevant successivement les eaux des sources de Nasso, celles du marigot de Yengué en rive gauche et en rive droite celles des marigots Niamé et Wé.

Les principaux affluents sont :

à l'Ouest les rivières suivantes : Farakoba, Kiéné, Yengué, SO, Suo et Bango
à l'Est : le Houet, le Bingbélé et le Niamé.

II.3.8.2. Les sources, mares et lacs

Les principales sources sont :

- Les sources de la Guinguette situées en rive gauche ;
- Les sources de Kokoroué situées également en rive gauche ;
- Les sources captées par l'O.N.E.A. en rive droite en aval desquelles existent d'autres sources non captées mais alimentant également la rivière du Kou.

Pour ce qui est des mares, on peut en citer deux :

- La mare de Bama située dans le lit du marigot Bongo qui l'alimente. Cette rivière a un bassin versant de 30 km² ;
- La mare de Tumbagama, moins importante que la précédente, est située dans le lit d'un petit affluent du Kou avec un bassin versant de 15 km².

II.3.9. Occupation des sols

Dans la vallée du Kou à partir de la Guinguette, on trouve de zones morphologiques différentes, avec des occupations des sols adaptées aux conditions de terrain.

Au sud de Nasso, la vallée est étroite dans un terrain ondulé et peu occupé par l'agriculture. Au Nord de Nasso, la vallée s'ouvre et continue dans une plaine alluviale d'une largeur de 200 à 700 m. La plaine est d'abord occupée par une forêt dense, puis après quelques kilomètres, par des petites parcelles de cultures, irriguées ou non. A partir du village de Sosongona, situé à 8 km de la source, les terrains cultivés occupent la vallée. On remarquera notamment le périmètre rizicole de 1100 ha réalisé au début des années 1970, grâce à la coopération avec la chine, ainsi que le périmètre maraîcher, réalisé beaucoup plus tard pour diversifier la production agricole.

L'occupation agricole de la vallée connaît actuellement une certaine accélération avec l'aménagement informel et spontané de parcelles le long du canal d'amenée du périmètre rizicole. Ceci est actuellement l'une des cause du conflit qui subsiste dans la vallée autour de la question de l'eau. Il y a également la création de plantations d'arbres fruitiers, par de nouveaux investisseurs galvanisés par l'ouverture du marché, à cause de la difficile situation de la production en Cote d'Ivoire.

L'occupation des sols dans le bassin du Kou est également marquée par l'expansion de la ville de Bobo-Dioulasso, poussée par l'accroissement de la population et le développement des activités industrielles.

La **figure 10** donne un aperçu de l'occupation des terres.

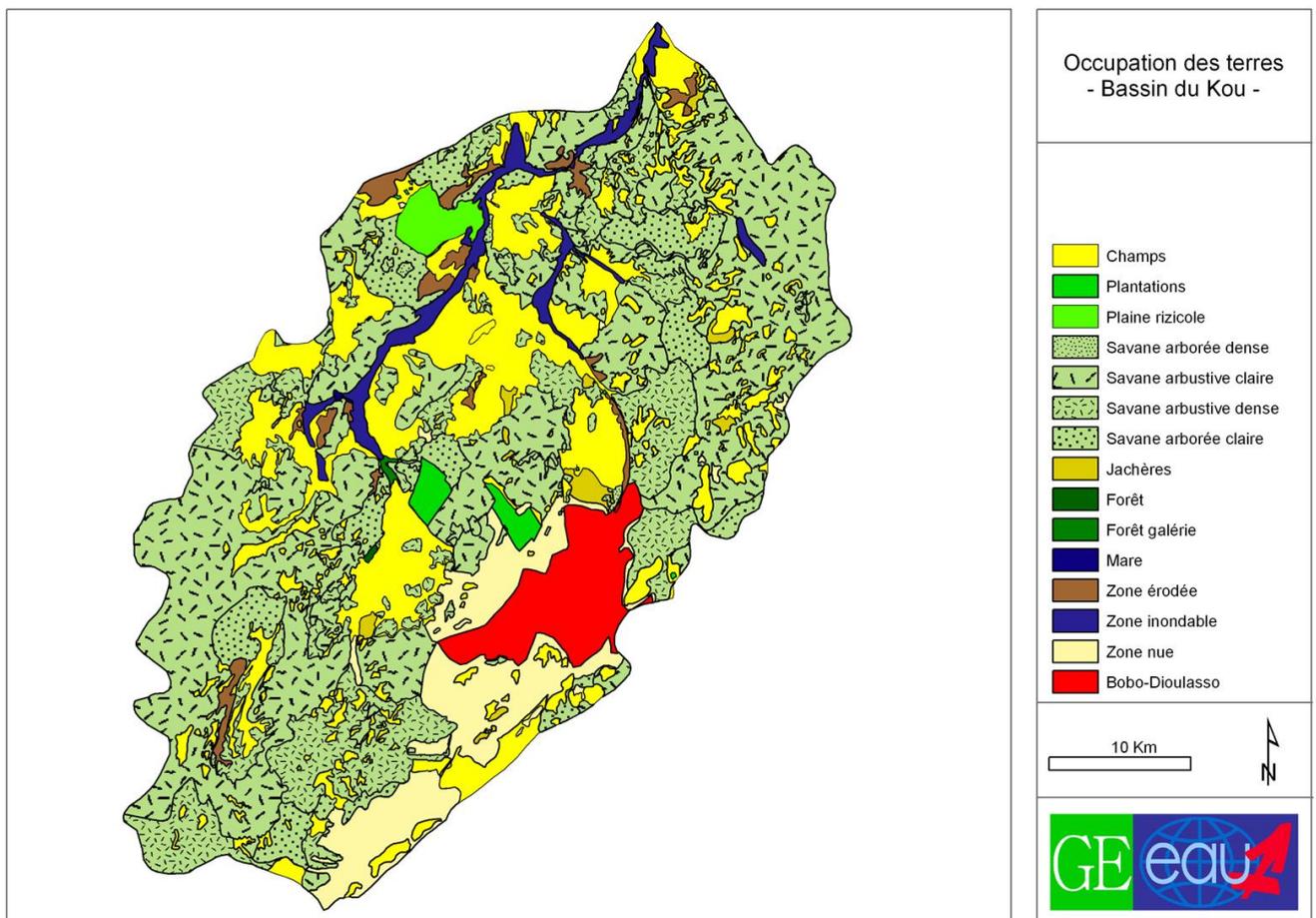


Figure 10 : Carte d'occupation des terres du bassin versant du Kou

III. CONSTITUTION DES DONNEES DE L'ETUDE

III.1. DONNEES PLUVIOMETRIQUES

III.1.1. Choix des stations et des périodes d'observation

Avant d'envisager l'étude hydrologique il importe de définir une période et des stations de référence à partir desquelles les différentes investigations s'articuleront.

Le bassin versant du Kou est bien desservi pour ce qui est des observations de la pluviométrie. Les données disponibles sont des données journalières et elles ont plusieurs sources :

- Des anciennes données de la base de données PLUVIOM de la Direction Régionale de l'Hydraulique des Hauts-Bassins (**tableau 3**) :

Tableau 3 : Inventaire des stations de la base PLUVIOM

Stations	Période d'observation		Longueur des chroniques (ans)	Lacunes (%)
	Début	Fin		
Beregadougou	1974	2000	27	0
Bondoukuy	1963	1998	36	5,7
Koumbia	1964	2000	37	0
Moussoudougou	1992	1996	5	0
Nasso	1960	1996	37	8,3
Orodara	1955	2000	46	0
Samorogouan	1964	1998	35	5,8

- Des données de l'aéroport de Bobo-Dioulasso et des stations de l'INERA (**tableau 4**) :

Tableau 4: Inventaire des stations de l'aéroport de Bobo-Dioulasso et de L'INERA

Stations	Période d'observation		Longueur des chroniques (ans)	Lacunes (%)
	Début	Fin		
Bama	1986	2005	20	10
Farakoba	1960	2005	46	6,7
Bobo-Dioulasso	1959	2005	47	0

- Les nouvelles stations pluviométriques de la Direction Provinciale de l'Agriculture, de l'Hydrauliques et des Ressources Halieutiques du Houet (**tableau 5**) :

Tableau 5 : Inventaire des stations pluviométriques de la DPAH/RH du Houet

Stations	Période d'observation		Longueur des chroniques (ans)	Lacunes (%)
	Début	Fin		
Karankasso-Sambla	2003	2005	3	0
Badema	2003	2005	3	0
Satiri	2003	2005	3	0
Toussiana	2003	2005	3	0

Nota : Les données dont la disponibilité est indiquée dans les **tableaux 13 à 15** sont des hauteurs de pluies journalières. Les lacunes représentent les taux d'années dont les données ne sont pas disponibles. Les années prises en compte sont donc des années sans lacune quant à la pluie journalière.

La **figure 11** donne la situation géographique des différentes stations ; on remarquera que quatre d'entre elles sont situées sur le bassin versant. On peut en conclure que le bassin est bien desservi en stations pluviométriques même si l'on doit noter également leur concentration au centre. Ces stations à savoir Nasso, Farakoba, Bobo-Dioulasso et Bama, ont des chroniques assez longues et des taux de lacunes acceptables. Nous nous baserons de ce fait, sur elles, pour l'étude de notre bassin versant.

Bilan en eau et étude comparative des écoulements du bassin versant du Kou
CONSTITUTION DES DONNEES DE L'ETUDE

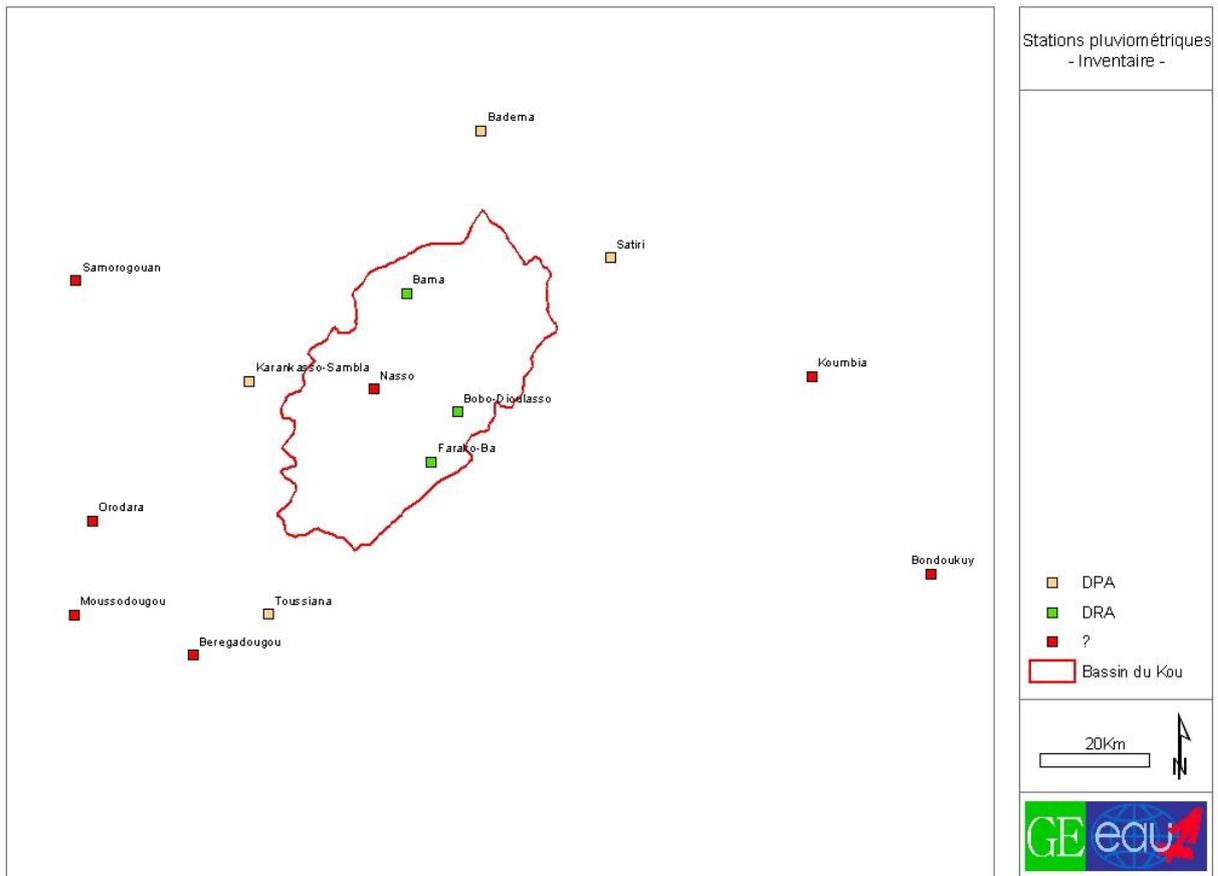


Figure 11 : Situation géographique des stations pluviométriques

Pour ce qui est de la période d'observation pour cette étude, nous retiendrons une période de trente ans, de 1976 à 2005. Nous nous limitons en arrière à 1976, pour être sûr de dépasser la rupture climatique intervenue en 1970 (Albergel, 1987 ; Mahé, 2001), ce qui devrait conférer une certaine homogénéité à nos données.

III.1.2. Contrôle de la qualité des données

L'homogénéité des données de pluies ainsi que leur qualité ont été vérifiées par les méthodes de la moyenne mobile et l'étude des corrélations entre stations.

III.1.2.1. Vérification de l'homogénéité intrinsèque des séries

L'homogénéité d'une série traduit le fait que les propriétés de la loi statistique qui régit le phénomène (moyenne, variance ou moments d'ordre supérieur), sont invariantes au cours du temps. L'échantillon ne doit présenter ni tendance (à la hausse ou à la baisse) ni phénomène cyclique, ni rupture. La méthode de la moyenne mobile permet d'effectuer une telle vérification. Nous l'avons appliquée aux différentes stations avec un pas de temps de 3 et 5 ans. Pour ce faire, nous avons dressé les graphiques des pluies annuelles (p_{an}), des

Bilan en eau et étude comparative des écoulements du bassin versant du Kou
CONSTITUTION DES DONNEES DE L'ETUDE

pluies moyennes annuelles (Pmoy), des moyennes mobiles sur trois ans (mob_3) et sur cinq ans (mob_5) pour les quatre stations pluviométriques retenues.

Le détail de ces calculs est résumé dans l' **annexe I** et les **figures 12 à 15** ci-dessous nous montrent les résultats des différents contrôles effectués.

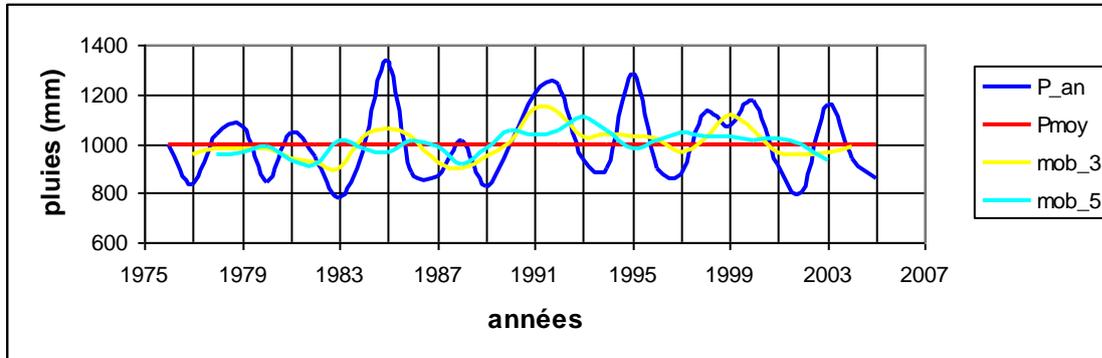


Figure 12 : Application de la méthode de la moyenne mobile à la station Bobo-Dioulasso

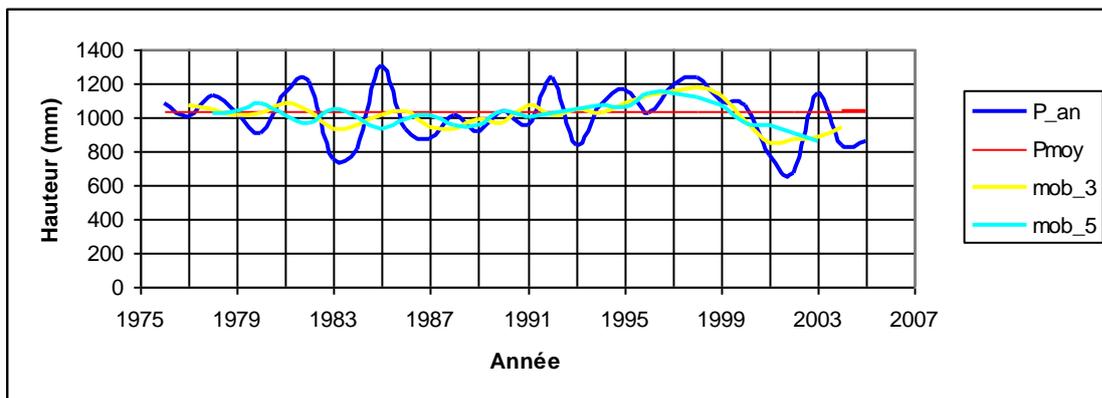


Figure 13 : Application de la méthode de la moyenne mobile à la station de Farako-ba

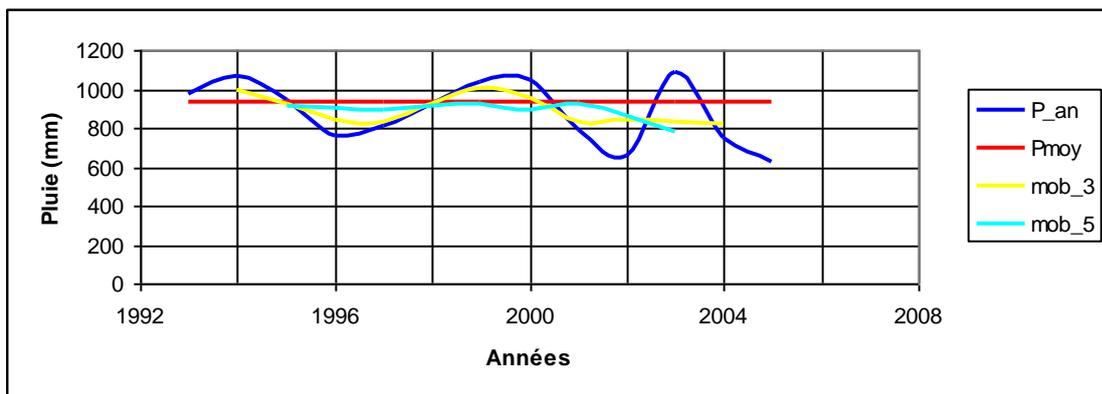


Figure 14 : Application de la méthode de la moyenne mobile à la station de Bama

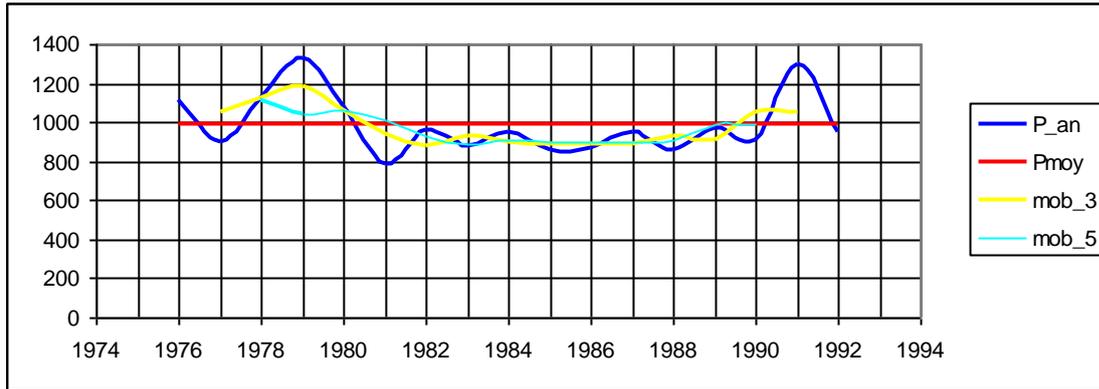


Figure 15 : Application de la méthode de la moyenne mobile à la station de Nasso

Conclusion : D'une manière générale, on constate que les séries sont homogènes.

III.1.2.2. Etude des corrélations entre stations

La méthode utilisée est celle du double cumul sur les pluviométries annuelles des quatre stations.

Cette méthode consiste à faire pour la station étudiée (A) et la station de comparaison (B), le calcul de la pluviométrie cumulée jusqu'à l'année i soit $Ta(i)$ et $Tb(i)$, et à porter sur un graphique les différents points M_i de coordonnées respectives $Ta(i)$ et $Tb(i)$. Le principe est qu'en l'absence d'anomalie, ces deux stations mesurent chaque année une pluviométrie annuelle dans un rapport sensiblement constant, et en conséquence les points M_i sont pratiquement alignés ; par contre, si une erreur systématique a pu s'introduire, la droite des M_i présentera alors, une cassure.

L'application de cette méthode aux stations pluviométriques de Bama, Koumi et « la confluence » (stations étudiées) d'une part et celle de Bobo-Dioulasso (station de référence) d'autre part, est représentée par les **figures 16 à 18**. L'homogénéité des données de Bobo-Dioulasso a en effet, déjà été établie par des études antérieures BICABA (1991).

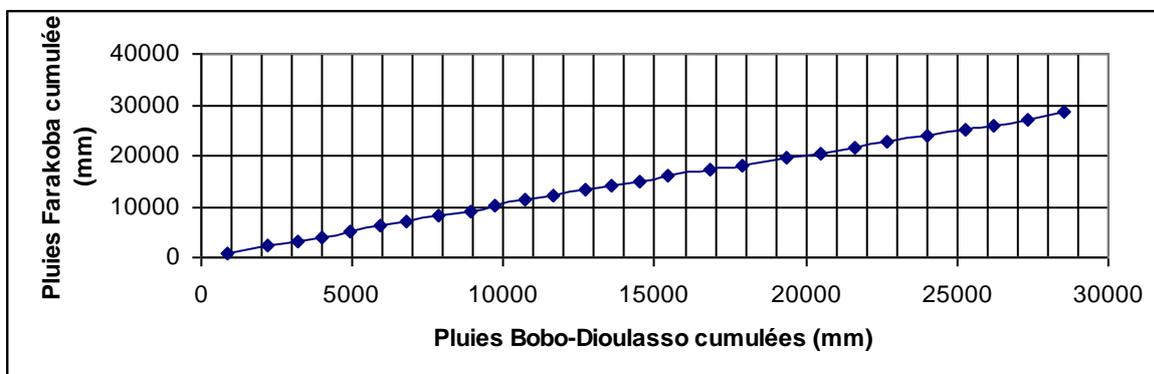


Figure 16 : Test de la méthode des doubles masses appliquée à la station de Farakoba

Bilan en eau et étude comparative des écoulements du bassin versant du Kou
CONSTITUTION DES DONNEES DE L'ETUDE

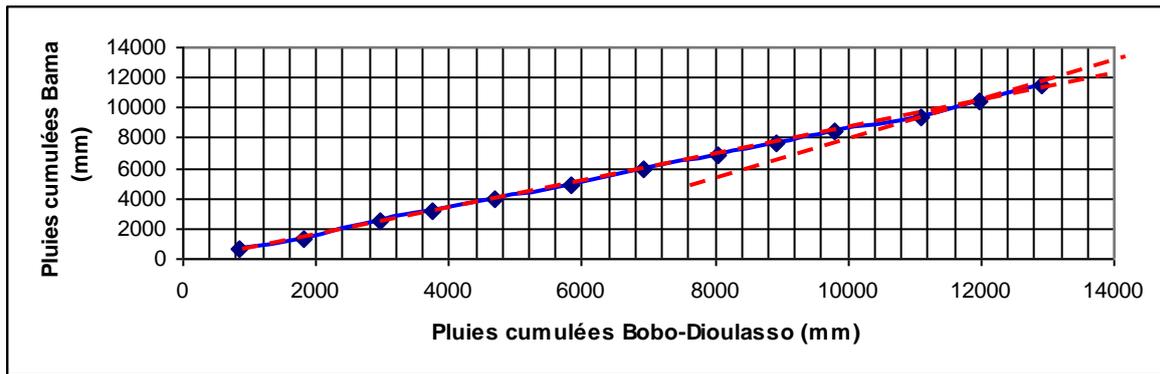


Figure 17 : Test de la méthode des doubles masse à la station de Bama (vallée du Kou)

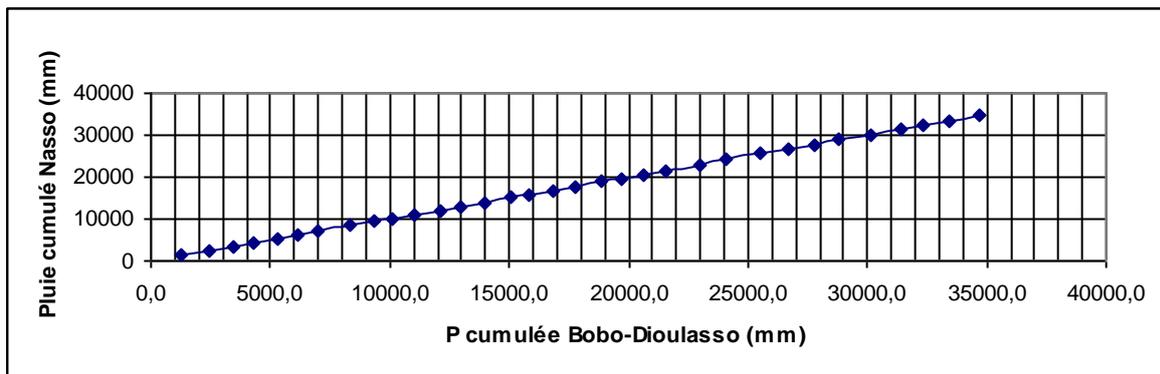


Figure 18 : Test de la méthode des doubles masse à la station de Nasso

On ne constate pas de rupture pour les stations de Nasso et Farakoba ; ceci n'est pas le cas de la station de Bama où l'on observe une cassure qui intervient entre 1990 et 1995. Ceci est certainement une anomalie car elle n'apparaît pas au niveau des autres stations pourtant voisines.

Nous procédons au prochain paragraphe à la correction de cette anomalie et au comblement des lacunes.

Plusieurs méthodes de correction sont proposées dans la littérature, nous utilisons ici celles préconisées par André MUSY de l'EPFL dans son "*cours d'Hydrologie générale en ligne*". Deux techniques sont employées :

- Remplacement de la valeur manquante par la moyenne de la station de référence. Cette méthode a été utilisée lorsque les précipitations moyennes annuelles de la station à compléter ne diffèrent pas de plus de 10% des précipitations moyennes annuelles de la station de référence.
- Remplacement de la valeur manquante par une moyenne pondérée par la tendance annuelle des stations pluviométriques, soit :

Bilan en eau et étude comparative des écoulements du bassin versant du Kou
CONSTITUTION DES DONNEES DE L'ETUDE

$$P_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\bar{P}_x}{\bar{P}_i} P_i \right)$$

Où :

P_x : donnée manquante de précipitation (par exemple), estimée

n : nombre de stations de référence,

P_i : précipitation à la station de référence i ,

\bar{P}_x : Précipitation moyenne à long terme de la station x ,

\bar{P}_i : Précipitation moyenne à long terme de la station de référence i .

Les résultats sont consignés dans le **tableau 6** :

Tableau 6 : Comblement des lacunes des pluies annuelles

Année	Bobo-Dioulasso	Farakoba	Bama	Nasso
2005	861,1	858,2	627,4	801,1
2004	942,0	833,3	745,5	864,2
2003	1155,9	1145,6	1088,5	1165,7
2002	802,7	674,7	654,3	732,0
2001	914,0	776,1	788,4	852,3
2000	1171,4	1073,6	1042,1	1130,0
1999	1065,2	1091,5	1039,1	1099,5
1998	1121,4	1232,3	928,0	1122,3
1997	872,9	1193,9	809,6	982,9
1996	900,5	1023,6	757,7	917,0
1995	1277,7	1160,4	941,4	1155,8
1994	895,7	1075,8	857,2	969,8
1993	943,0	834	773,6	875,3
1992	1238,2	1238,2	1077,5	950,6
1991	1198,1	952	1152,1	1293,6
1990	994,7	1030,8	917,0	910,2
1989	827,5	921,2	828,0	966,1
1988	1014,5	1014,5	882,8	857,0
1987	866,3	866,3	836,1	952,2
1986	879,8	928,1	789,4	871,7
1985	1331,5	1305,6	1147,5	856,5
1984	971,6	815,6	778,2	949,6
1983	778,1	752,8	666,2	883,0
1982	945,6	1212,3	938,0	963,4
1981	1042,3	1145,1	951,4	786,9
1980	841,4	904,3	759,4	1081,7
1979	1065,7	1018,9	907,2	1332,3
1978	1036,7	1128,4	941,7	1128,3
1977	835,4	996	796,3	901,8
1976	996,1	1083,6	904,6	1112,5
lacunes (%)	0,0	10	46,7	43,3
Moyenne	960,9	1009,6	850,7	982,2

NB. Les cases en gris contiennent les valeurs complétées ou corrigées.

III.1.3. Etude de la variabilité interannuelle et saisonnière

III.1.3.1. Pluviométrie journalière

L'analyse des pluies journalières sur la période de 1976 à 2006 fait ressortir que le nombre de jour de pluie dans l'année varie d'une station à l'autre de 50 jours (au nord) à 70 jours (au sud). Le mois d'août est le mois le plus pluvieux avec 13 jours en moyenne sur les quatre stations. Les hauteurs maximales de pluies journalières (**tableau 7**) sont souvent très élevées, et peuvent atteindre 100 mm soient 10% de la pluviométrie totale annuelle.

Bilan en eau et étude comparative des écoulements du bassin versant du Kou
CONSTITUTION DES DONNEES DE L'ETUDE

Tableau 7 : Pluies journalières maximales annuelles des stations du bassin du Kou

	Bobo- Dioulasso	Farakoba	Bama	Nasso
1976	48	71.1		65.4
1977	61.8	78		72.8
1978	65.7	71.4		64.1
1979	69.9	89.7		102.9
1980	76	58.2		68.7
1981	77	58		71.1
1982	45	78.2		74.4
1983	66.1	48.4		69.8
1984	73	46.5		53.7
1985	81.3	83.7		68
1986	86.8	81.4	64	78
1987	46.9		122.6	67.3
1988	71.1			48
1989	55.4	60.9	99.9	86
1990	65.2	67.6	74.7	96.6
1991	55	53.7	73.2	119
1992	77.2			38.4
1993	67.5	44	58.1	
1994	49	62.2	93.1	
1995	80.6	65.1	107.1	
1996	55.6	71.3	47.8	
1997	43.6	94	65.2	
1998	94.3	87	87	
1999	58.3	80.4	98.2	
2000	67.8	46.5	46.8	
2001	45.9	40.4	60.8	
2002	66.6	57.8	45	
2003	80.3	80.3	75.3	
2004	43.4	53.8	82	
2005	63.6	105.9	67.2	

NB : Les cases en gris représentent les lacunes.

III.1.3.2. Variabilité saisonnière

La **figure 19** montre pour les quatre stations, que les pluies se concentrent sur la période de mai à mi-octobre (saison des pluies) qui représente plus de 90% de la pluie

annuelle. Les pics sont uniques sur l'année (saison monomodale) et ils se situent en août à chaque station et atteignent 250 mm, ce qui correspond à 27% de la pluie annuelle.

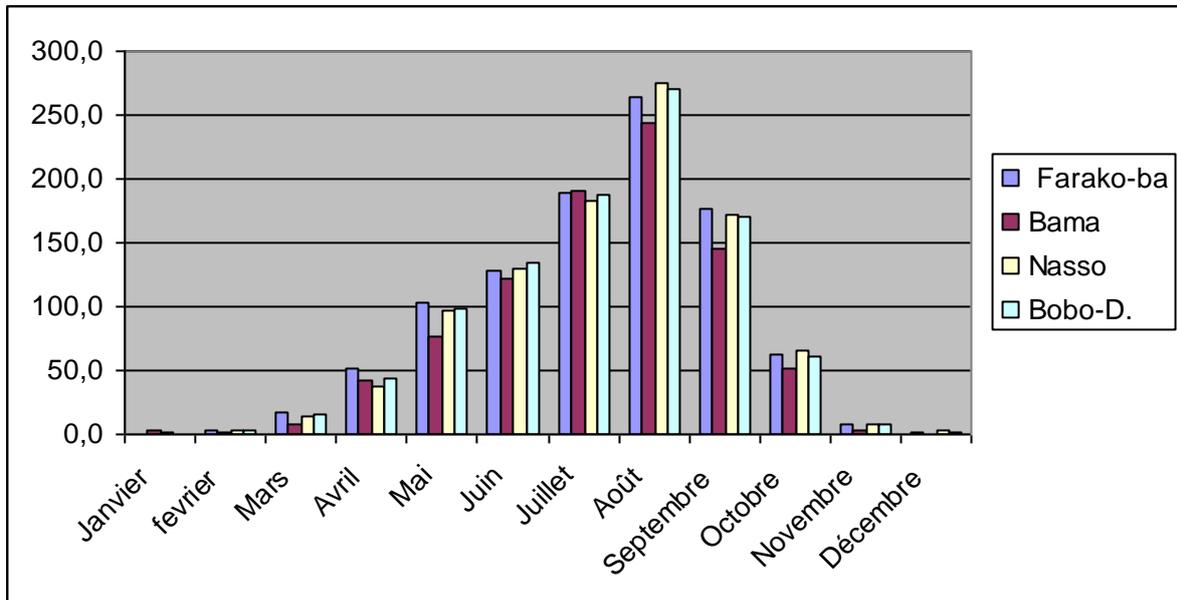


Figure 19 : Variabilité saisonnière et spatiale de la pluviométrie (moyenne calculée de 1976 à 2005)

III.1.3.3. Etude statistique des pluies annuelles

Les pluies annuelles ont été ajustées à la loi normale.

On sait que la loi normale a pour fonction de répartition :

$$F(x) = \text{Prob}\{X \leq x\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} dt \text{ avec } -\infty < x < +\infty$$

Les paramètres de la loi normale sont la moyenne m et l'écart type s .

L'équation de la droite d'ajustement est : $X = m + s \cdot U$,

Où :

- X est la valeur de la pluviométrie qui correspond à une probabilité au non dépassement donnée ;
- U est la valeur de la variable centrée réduite qui correspond à cette probabilité au non dépassement. U est donné par la table de Gauss.

Les résultats de l'ajustement sont résumés dans les **tableaux 8 à 12**. Les quantiles sont calculés avec un intervalle de confiance à 90%. Rappelons que les intervalles de confiance sont donnés par la relation suivante :

$$\text{Prob}\left\{ \left| \bar{x}(F) - x(F) \right| \leq \alpha \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{n}} \sqrt{1 + [u(F)]^2 / 2} \right\} = 90\% \text{ avec } \alpha = 1,64$$

Bilan en eau et étude comparative des écoulements du bassin versant du Kou
 CONSTITUTION DES DONNEES DE L'ETUDE

Tableau 8 : Station de Bobo-Dioulasso : Quelques quantiles (mm) issus de l'étude statistique des séries annuelles de pluies sur les stations du bassin du Kou.

Quantile		Valeur du Quantile	Borne inférieure	Borne supérieure
Moyenne		992,9	1037,3	948,5
Quinquennale	Sèche	868,3	919,9	816,6
	Humide	1117,5	1169,2	1065,9
Décennale	Sèche	803,0	862,9	743,1
	Humide	1182,8	1242,7	1122,9
Centennale	Sèche	647,2	732,8	561,6
	Humide	1338,6	1424,2	1253,0

Tableau 9 : Station de Farakoba : Quelques quantiles (mm) issus de l'étude statistique des séries annuelles de pluies sur les stations du bassin du Kou.

Quantile		Valeur du Quantile	Borne inférieure	Borne supérieure
Moyenne		1009,6	1058,2	960,9
Quinquennale	Sèche	873,2	929,7	816,6
	Humide	1145,9	1202,5	1089,4
Décennale	Sèche	801,8	867,3	736,2
	Humide	1217,4	1282,9	1151,8
Centennale	Sèche	631,3	725,0	537,6
	Humide	1387,8	1481,5	1294,1

Tableau 10: Station de Bama Quelques quantiles (mm) issus de l'étude statistique des séries annuelles de pluies sur les stations du bassin du Kou.

Quantile		Valeur du Quantile	Borne inférieure	Borne supérieure
Moyenne		877,5	919,3	835,7
Quinquennale	Sèche	760,3	808,9	711,7
	Humide	994,7	1043,3	946,1
Décennale	Sèche	698,9	755,3	642,6
	Humide	1056,1	1112,4	999,7
Centennale	Sèche	552,5	633,0	472,0
	Humide	1202,5	1283,0	1122,0

**Tableau 11 : Station de Nasso : Quelques quantiles (mm) issus de l'étude statistique
 des séries annuelles de pluies sur les stations du bassin du Kou.**

Quantile		Valeur du Quantile	Borne inférieure	Borne supérieure
Moyenne		982,2	937,8	1026,5
Quinquennale	Sèche	857,8	806,2	909,4
	Humide	1106,5	1055,0	1158,1
Décennale	Sèche	792,7	732,9	852,5
	Humide	1171,7	1111,9	1231,5
Centennale	Sèche	637,2	551,8	722,6
	Humide	1327,2	1241,7	1412,6

**Tableau 12 : Quelques quantiles (mm) issus de l'étude statistique
 des séries annuelles de pluies sur les stations du bassin du Kou.**

Quantile		Valeur du Quantile	borne inférieure	Borne supérieure	Années correspondantes
Moyenne		956,5	915,4	997,7	1977; 1979 ; 1988; 1990; 1991; 1996
Quinquennale	Sèche	841,1	793,2	889,0	1980,1984; 1987; 1989; 1993; 2004
	Humide	1072,0	1024,1	1119,8	1978; 1981; 1982 ; 1994 ; 1995; 1997; 1999; 2000
Décennale	Sèche	780,6	725,1	836,1	1983; 2001
	Humide	1132,5	1077,0	1188,0	1992; 1998; 2003
centennale	Sèche	636,3	557,0	715,6	2002
	Humide	1276,8	1197,4	1356,1	1985

On note l'extrême variabilité interannuelle de la pluie au niveau de chacune des stations. On note également que les valeurs des différents quantiles sur les quatre stations sont sensiblement les mêmes. Hormis les stations de Bama et Nasso dont les données ont été reconstituées à respectivement à 46,7 et 43,3 % à partir de la station de Bobo, on peut utiliser indifféremment les stations de Farakoba et de Bobo pour la prédétermination des grandeurs pluviométriques sur le bassin du Kou....

III.1.4. Etude de la variabilité spatiale et calcul de la pluie moyenne sur le bassin versant

La **figure 19** (déjà vue) montre que la pluviométrie annuelle ne varie pas beaucoup d'une station à l'autre. On note cependant une légère baisse du sud au nord.

Pour la détermination de la pluie moyenne interannuelle sur le bassin nous utilisons la méthode des polygones de Thiessen qui procède comme suit : A chaque station on affecte la surface du polygone obtenu en traçant les médiatrices des segments reliant la station concernée aux stations voisines. La pluie moyenne H_m sera obtenue en faisant la somme pondérée des pluies aux différentes stations, le coefficient de pondération étant la surface du polygone concerné intérieur à S, rapportée à la surface S.

$$H_m = \frac{1}{S} (H_B S_B + H_C S_C + \dots + H_N S_N)$$

La **figure 20** donne une représentation des polygones de Thiessen tracé en ne considérant que les trois stations de Farakoba, Bobo-Dioulasso et Bama ; La station de Nasso n'a pas été prise en compte pour les raisons que nous expliciterons au **paragraphe III.4**. Les coefficients correspondants sont consignés au **tableau 13**.

Tableau 13: Coefficients de Thiessen

bassin versant du Kou			Station hydrométrique de Koumi		
Stations pluviométriques	Superficies en km ²	coefficients	Stations pluviométriques	Superficies en km ²	coefficients
Farakoba	378	0.38	Farakoba	318	0.94
Bobo	360	0.25	Bobo	20	0.06
Bama	567	0.37			
Total	1858	1	Total	347	1
Station hydrométrique de Badara			Station hydrométrique de la confluence Niamé_Baoulé		
Stations pluviométriques	Superficies en km ²	coefficients	Stations pluviométriques	Superficies en km ²	coefficients
Farakoba	378	0.71	Farakoba	378	0.45
Bobo	25	0.07	Bobo	335	0.26
Bama	73	0.22	Bama	339	0.29
Total	989	1	Total	1605	1

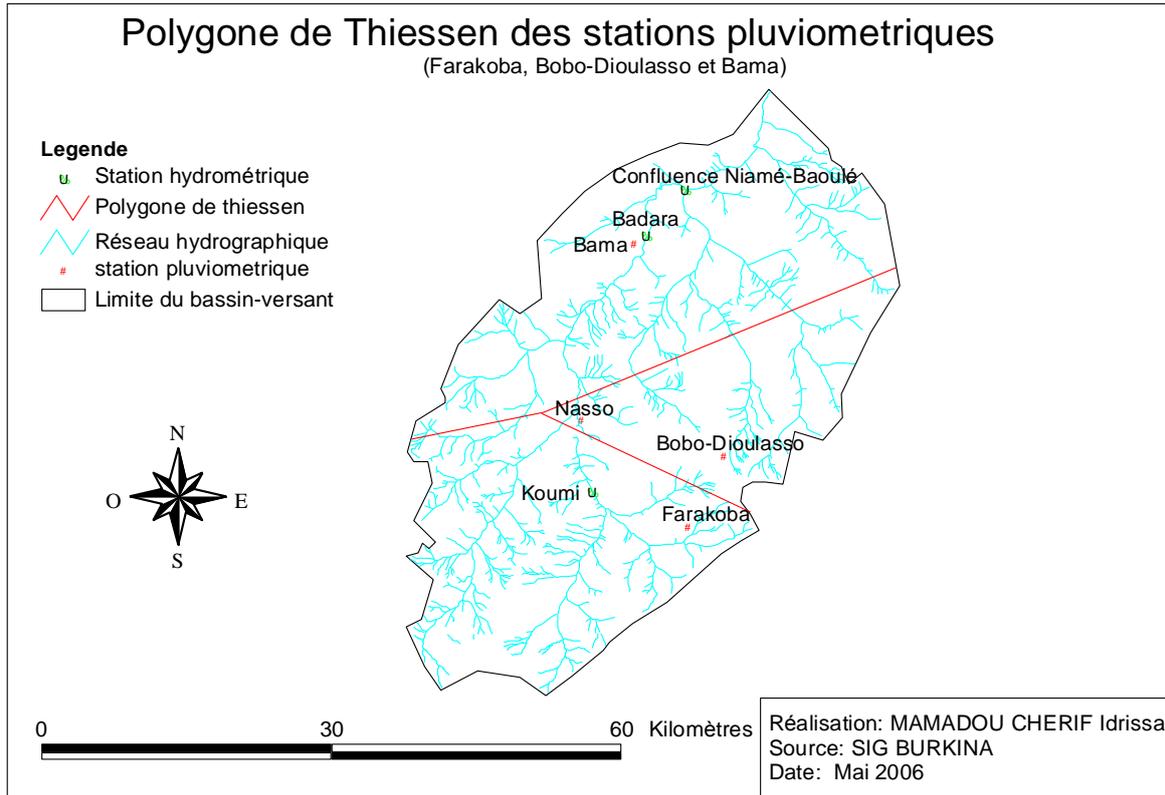


Figure 20 : Polygone de Thiessen des stations pluviométriques (NB : la station de Nasso n'est pas prise en compte)

Les hauteurs des pluies moyennes à considérer pour chaque sous-bassin versant ont été calculées et consignées au **tableau 14**.

Bilan en eau et étude comparative des écoulements du bassin versant du Kou
 CONSTITUTION DES DONNEES DE L'ETUDE

**Tableau 14 : Pluviométries moyennes (en mm) sur les bassins versants
 calculées suivant la méthode des polygones de Thiessen**

Années	Bassins versants			
	Koumi	Badara	Confluence Niame- Baoule	Vallée du Kou
2005	858,4	807,6	792	773,5
2004	839,8	821,6	836,1	828
2003	1146,2	1133,8	1131,7	1127
2002	682,4	679,2	702,1	699,2
2001	784,4	788,8	815,5	815,1
2000	1079,5	1073,5	1089,9	1086,4
1999	1089,9	1078,1	1069,5	1065,5
1998	1225,6	1157,8	1115,2	1092
1997	1174,6	1086,9	999	971,5
1996	1016,2	956,5	914,5	894,4
1995	1167,4	1120,4	1127,4	1108,7
1994	1065,0	1061,9	1027,3	1028,6
1993	840,5	871,7	901,9	911,8
1992	1238,2	1189,8	1174,4	1156,8
1991	966,8	1013,2	1074	1087,6
1990	1028,6	1003,2	988,4	979,7
1989	915,6	894,1	869,8	863,3
1988	1014,5	980	969	956,5
1987	866,3	859,7	857,5	855,1
1986	925,2	894,2	875,3	864,7
1985	1307,2	1248,5	1234,6	1212,9
1984	825,0	826,2	855,7	854
1983	754,3	746,9	749,3	746,2
1982	1196,3	1130,9	1060,3	1040,1
1981	1138,9	1080,3	1042,5	1022,6
1980	900,5	886	869,6	865,1
1979	1021,7	1021,7	1030,4	1029,8
1978	1122,9	1089,1	1061,3	1050,2
1977	986,4	944,3	901	887,9
1976	1078,4	1047,9	1021,8	1011,9
Moyenne	1008,6	983,1	971,9	962,9

III.2. DONNEES HYDROMETRIQUES

III.2.1. Inventaire des stations hydrométriques

Les observations hydrométriques dans la vallée du Kou ont commencé en 1955, par la création de plusieurs stations de mesure. Pour la période de 1955 à 1985, HURE (1998) en a dénombré 13. D'autres stations ont été créées par la suite notamment à l'occasion de la mise en œuvre de projets de développement ou de programmes d'études couvrant la zone. On distingue :

- Les stations du réseau hydrométrique national ;
- Les stations créées dans le cadre du projet « vallée du Kou » ;
- Les stations créées dans le cadre du projet « ressource en eau de Bobo-Dioulasso » ;
- Les stations installées pour 3 ans lors de la mission d'étude néerlandaise IWACO.

Dans le cadre de cette étude nous disposons des données de la base de données, sous Hydracces « GEeauPlus.mdb » de la DRAHRH/HB qui gère les résultats issues des observations effectuées sur un certain nombre de stations. Le **tableau 15** fait l'inventaire des stations de cette base et la **figure 21** montre leur répartition géographique sur le bassin.

Tableau 15 : Inventaire des stations de la base « Bassin du Kou ».

Id_Station	Nom	Latitude	Longitude	Superficie bassin (km ²)	Début_Activité
1202701600	Sources de Pesso	-	-	-	-
1202701601	Confluence Niamé-Baoulé	-	-	1605	-
1202701603	Badara	11°22'7"N	4°22'02"W	989	1955
1202701606	Diaradougou				1960
1202701612	Nasso Amont	11°12'02"N	4°26'04"W	405	1961
1202701613	Nasso Milieu	11°12'00"N	4°26'00"W		1961
1202701614	Nasso Aval	11°13'00"N	4°26'00"W	646	1961
1202701620	Koumi	11°08'00"N	4°25'00"W	343	1985
1202710300	Mare aux Hippopotames	11°34'46"	4°10'07"	-	1997
1202711310	Exutoire de la Mare	11°34'46"	4°25'00"W	-	1997

Bilan en eau et étude comparative des écoulements du bassin versant du Kou
CONSTITUTION DES DONNEES DE L'ETUDE

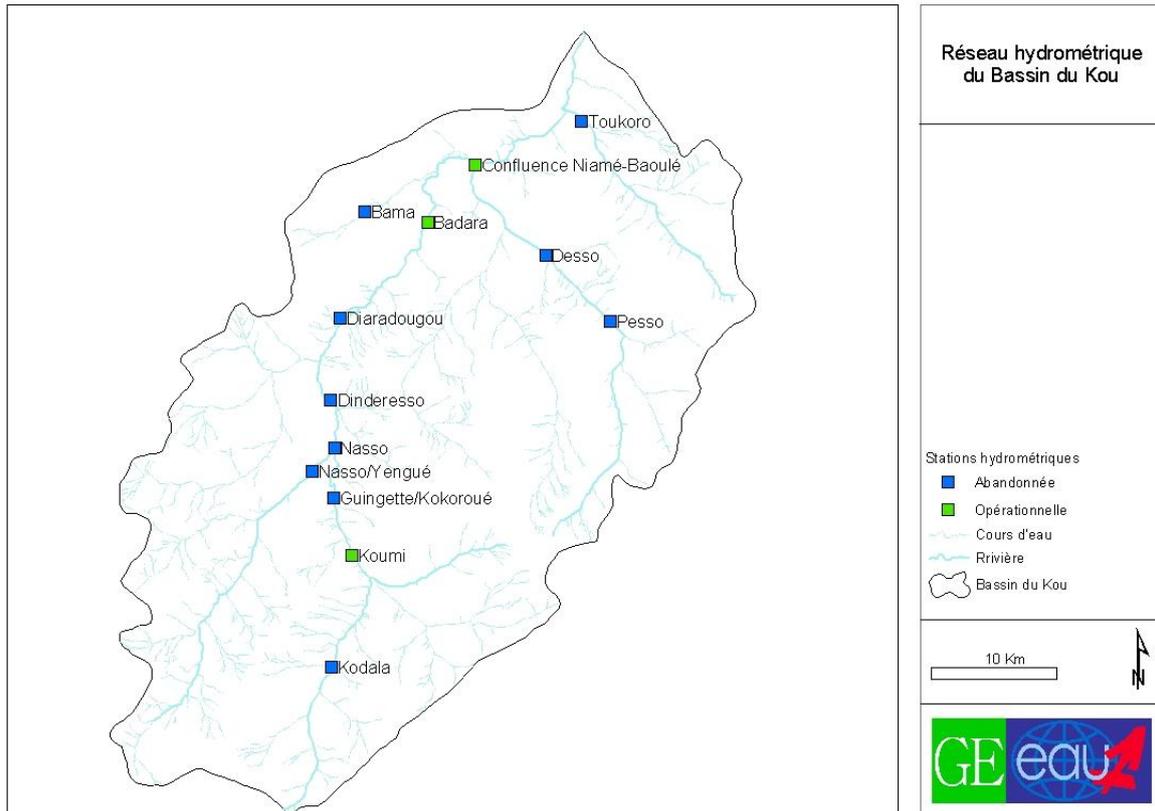


Figure 21 : Réseau hydrographique du bassin du Kou et emplacement des stations hydrométriques

Les données de débits dont nous disposons, sont de pas de temps journalier. Ils sont représentés dans le **tableau 16** et, la **figure 22** en donne le chronogramme des observations. Le propre de ces stations est qu'elles ne sont en général suivies, que pendant la période de mise en œuvre de projets ou programmes qui les ont installées. Actuellement, seules trois d'entre elles, à savoir celles de Koumi, de Badara et de la confluence Niamé-Baoulé qui appartiennent au réseau national, sont encore opérationnelles. C'est fondamentalement sur elles que nous nous appuyerons pour cette étude.

Tableau 16 : Inventaire des débits mesurés

Id_Station	Nom	Date Début	Date Fin	Lacunes (%)	Nombre Valeurs
1202701601	Confluence Niamé-Baoulé	02/01/1986	08/12/2002	4,66	4805
1202701603	Badara	07/01/1984	08/12/2002	14,33	4593
1202701606	Diaradougou	03/01/2004	31/12/2004	3,03	301
1202701612	Nasso Amont	09/01/1961	08/12/1974	30,05	1557
1202701613	Nasso Milieu	06/01/1961	31/12/1991	4,27	8823
1202701614	Nasso Aval	06/01/1961	10/12/1997	8,56	4731

Bilan en eau et étude comparative des écoulements du bassin versant du Kou
 CONSTITUTION DES DONNEES DE L'ETUDE

1202701620	Koumi	02/01/1987	04/12/1999	7,12	4109
------------	-------	------------	------------	------	------

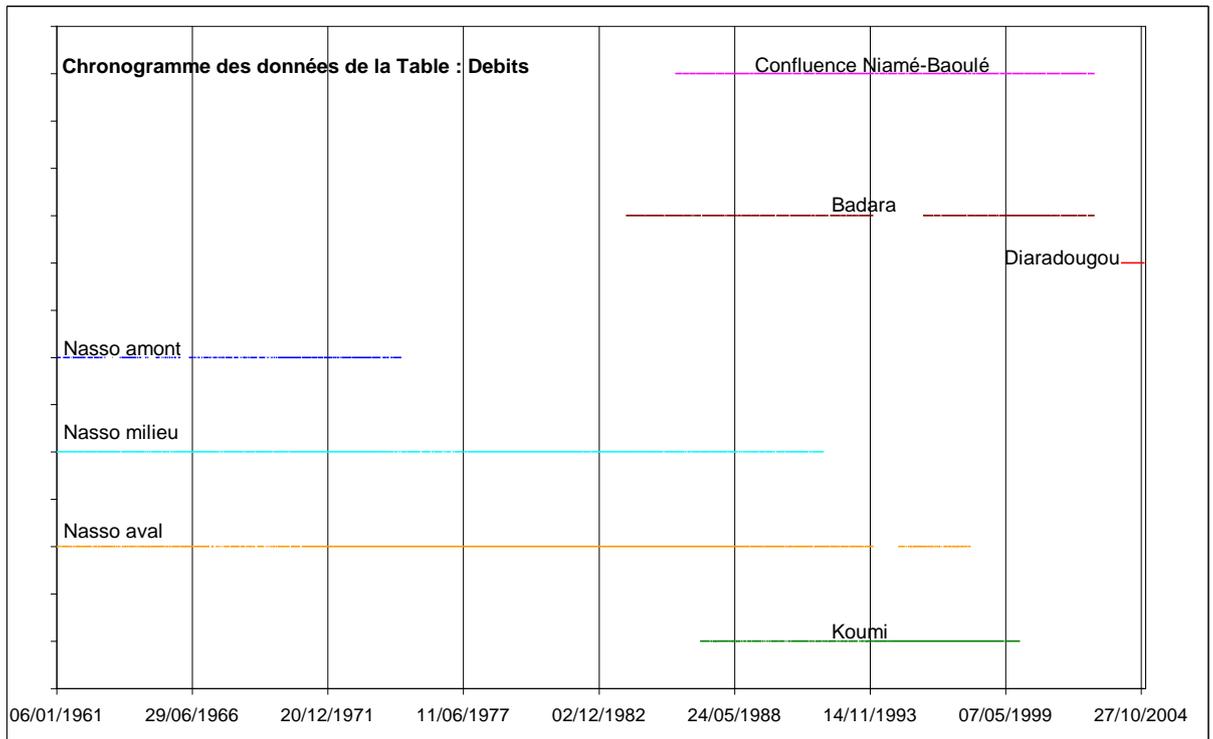


Figure 22 : Chronogramme des débits mesurés aux stations hydrométriques

III.2.2. Critique des données

Malgré ses cinquante ans d'existence, le réseau des stations hydrographiques est incapable de fournir des données fiables.

- Les séries chronologiques des débits observés sont de très mauvaise qualité. Elles sont parsemées de lacunes (**figures 23 à 25**) pouvant aller jusqu'à l'absence de données sur toute une année, voire plusieurs années !

Bilan en eau et étude comparative des écoulements du bassin versant du Kou
 CONSTITUTION DES DONNEES DE L'ETUDE

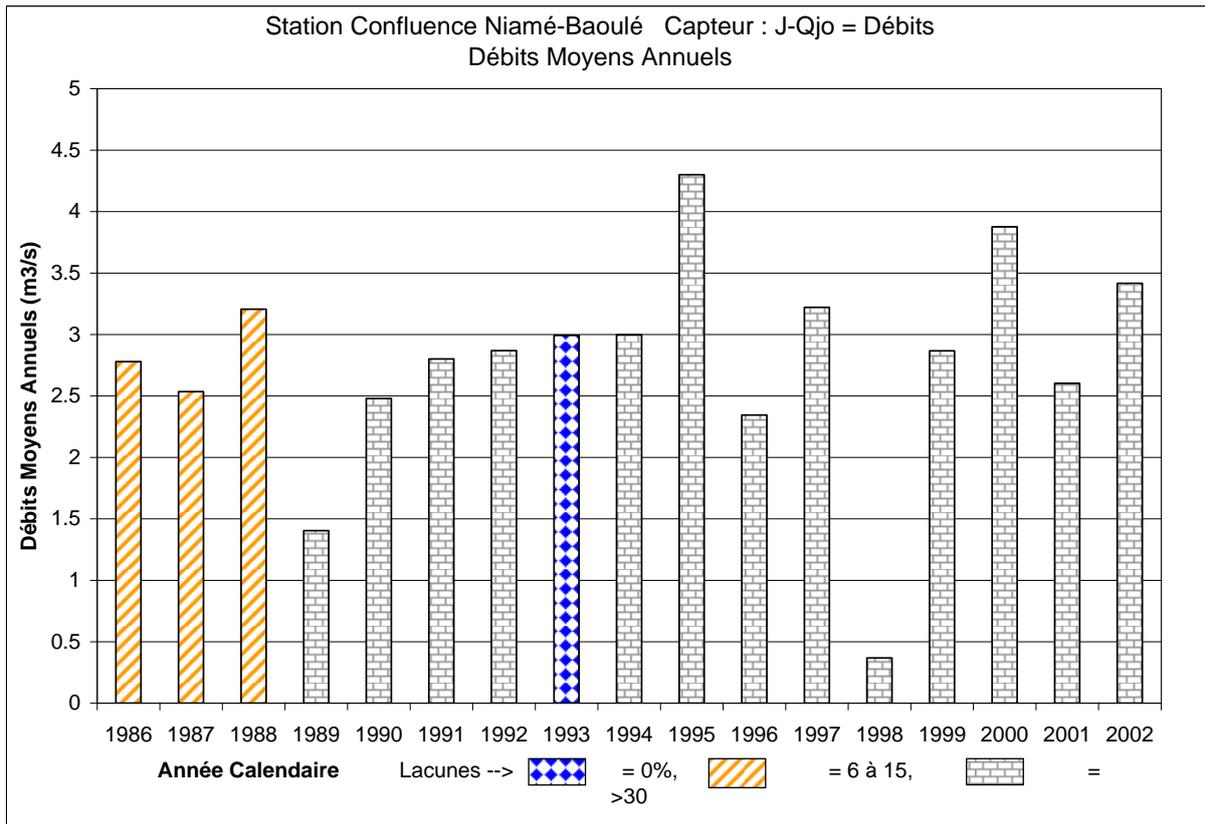


Figure 23 : Débits moyens annuels à la station de la confluence et lacunes

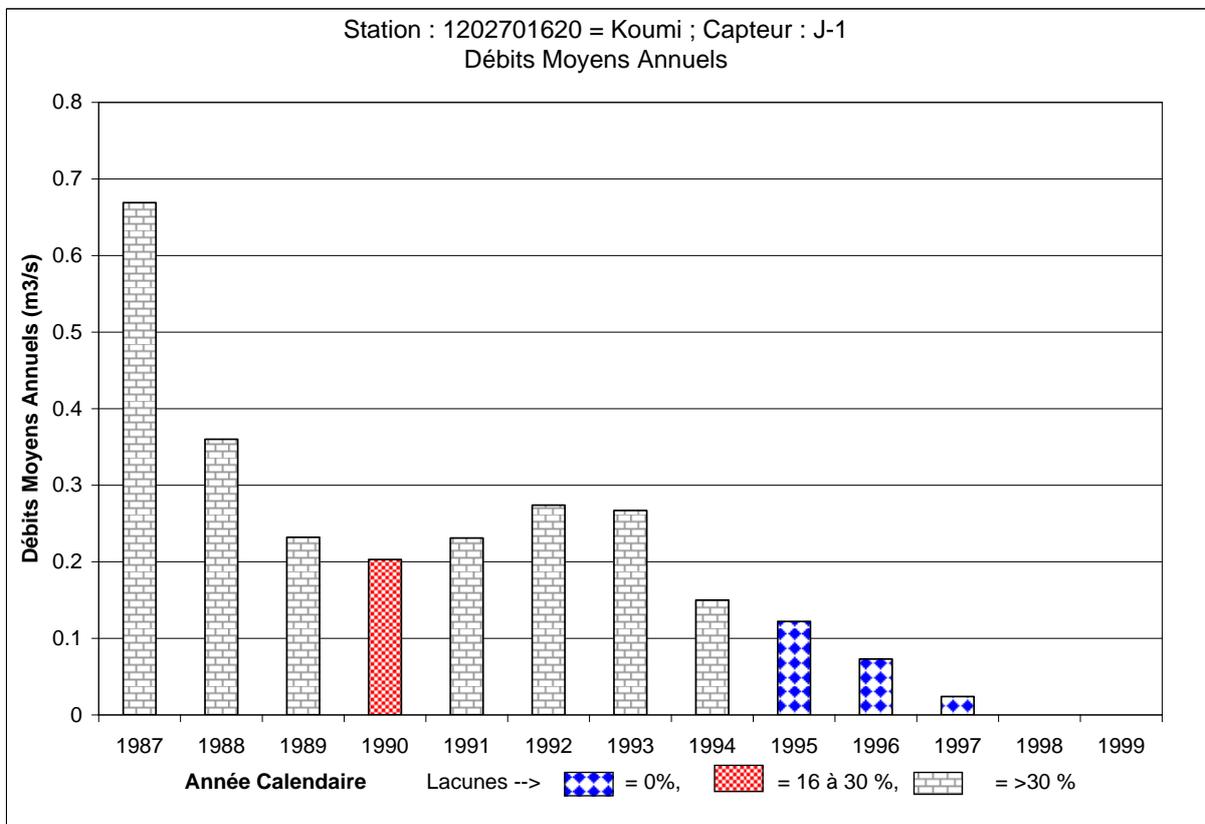


Figure 24 : Débits moyens annuels à la station de Koumi et lacunes

Bilan en eau et étude comparative des écoulements du bassin versant du Kou
 CONSTITUTION DES DONNEES DE L'ETUDE

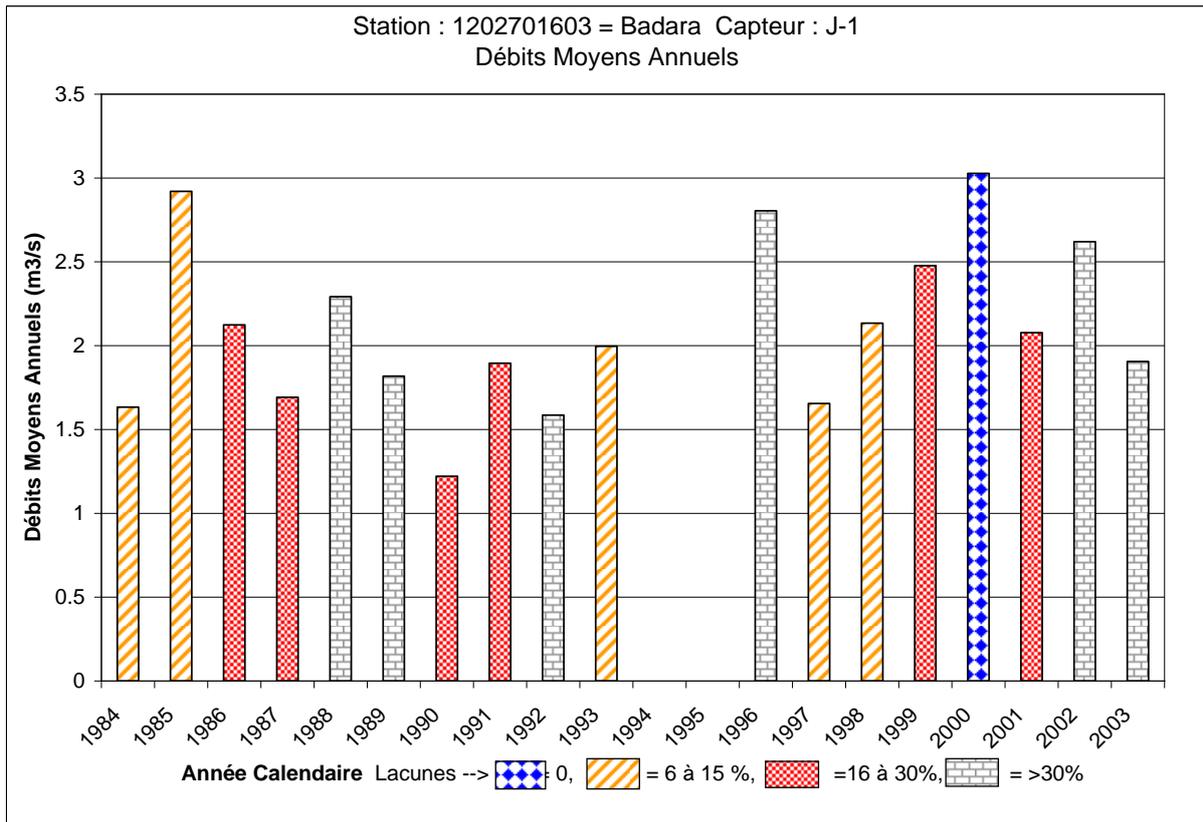


Figure 25 : Débits moyens annuels à la station de Badara et lacunes

- De plus, une analyse plus détaillée des données brutes nous a permis de mettre en évidence des incohérences dans ces données :
 - Plusieurs jours consécutifs avec exactement le même débit moyen journalier (Koumi, confluence...).
 - Des débits qui fluctuent sans rapport avec la pluviométrie, particulièrement pour la station de Koumi où, on assiste à une inversion des valeurs.
 - Absence de corrélation entre des stations cependant voisines (BICABA, 1991).

Cette imprécision des données s'explique par les problèmes d'étalonnage liés à l'instabilité des seuils de jaugeage, c'est le cas de Koumi et de la confluence Niamé-Badara (HURE, 1998). D'autre part, du fait de la violence des débits du cours d'eau durant la saison des pluies, il serait pratiquement impossible d'obtenir des jaugeages précis.

Bilan en eau et étude comparative des écoulements du bassin versant du Kou
 CONSTITUTION DES DONNEES DE L'ETUDE

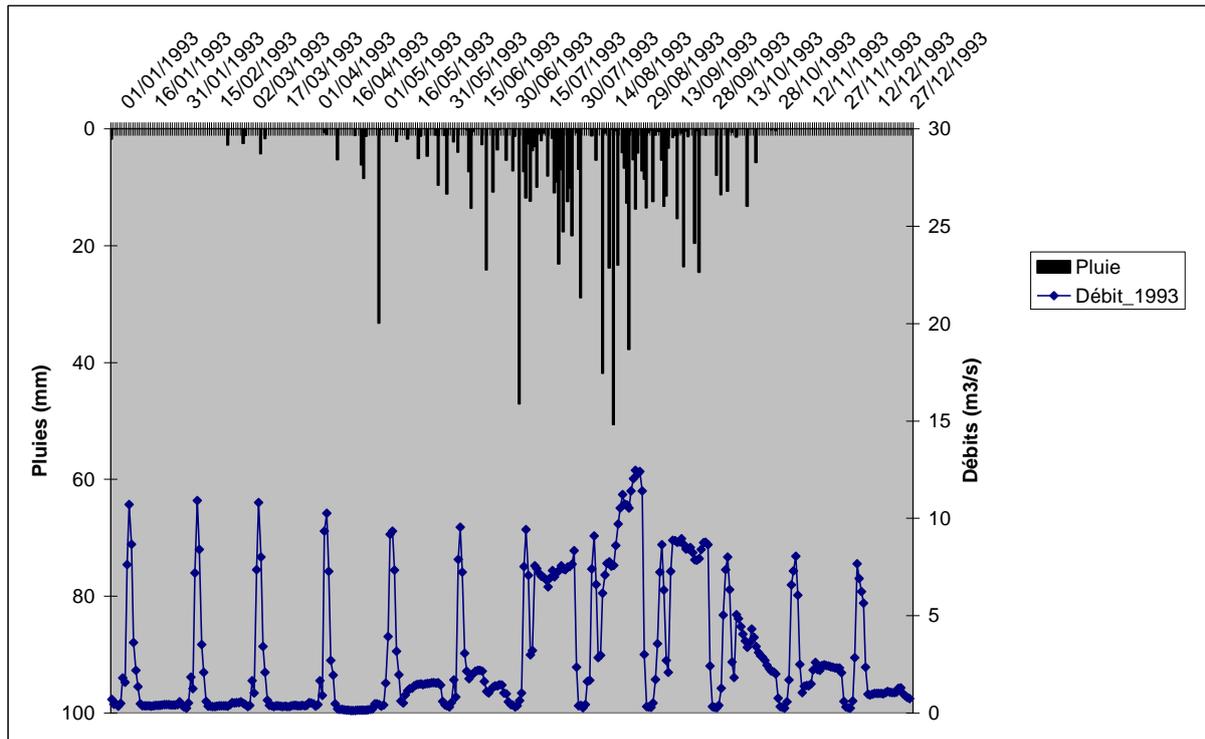


Figure 26 : « Des débits qui fluctuent sans rapport avec la pluviométrie » : exemple de la Confluence Niamey-Baoulé (1993)

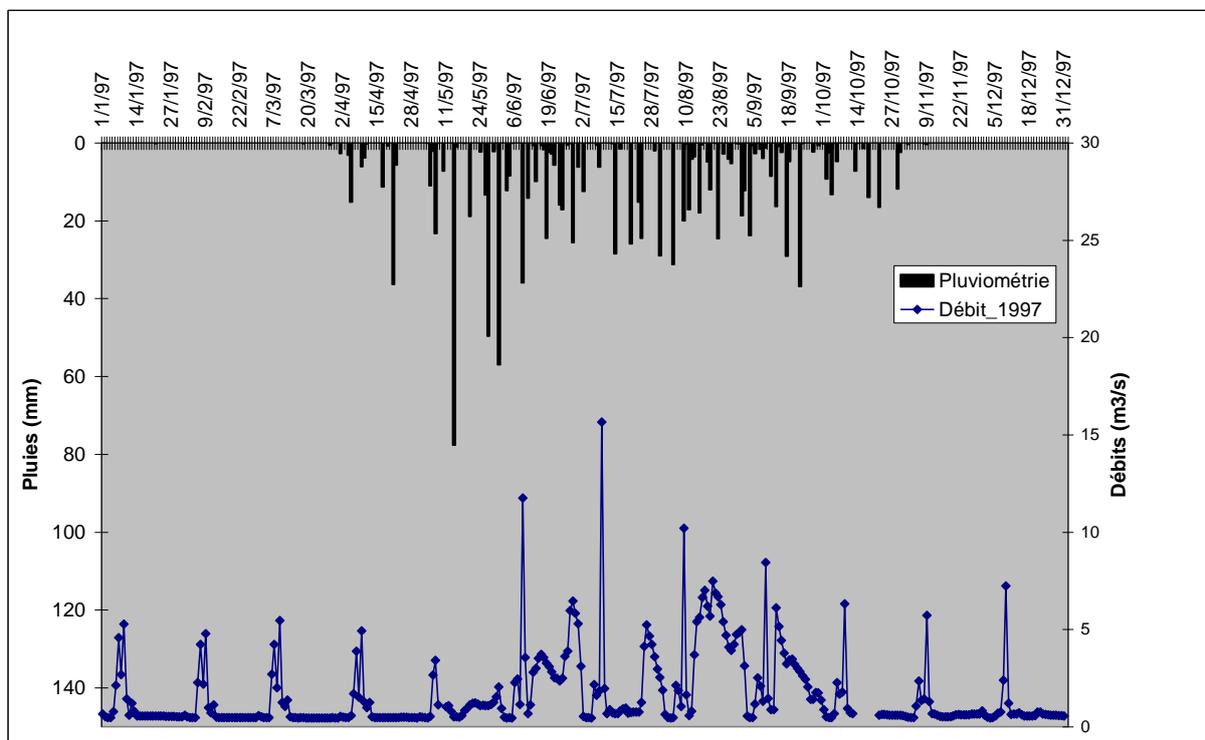


Figure 27: « Des débits qui fluctuent sans rapport avec la pluviométrie » : exemple de Badara (1997)

- Le débit du Kou semble ne plus être très « naturel » ; Il faut déjà noter les prélèvements effectués par l'ONEA et les périmètres irrigués ; mais on note également,

Bilan en eau et étude comparative des écoulements du bassin versant du Kou
CONSTITUTION DES DONNEES DE L'ETUDE

une augmentation subite et a priori injustifiée des débits (chroniques de Badara et de la Confluence) qui, intervient du 6 au 13 de chaque mois, avec un pic le 8 et ce, même en saison sèche. Nous n'avons pas encore eu d'explication de ce phénomène jusqu'à la rédaction de ce rapport malgré une petite enquête menée auprès de l'ONEA. Ce phénomène a certainement son explication dans les prélèvements divers opérés en amont, l'augmentation traduisant une lâchée d'eau ou un arrêt de pompage.

En somme, seules les données de Badara sont vraiment exploitables à condition là aussi de les nettoyer des incohérences qui y subsistent.

III.3. DONNEES D'EVAPOTRANSPIRATION

Pour l'analyse de l'évapotranspiration, nous disposons d'une chronique à la station météorologique de Bobo-dioulasso, calculée suivant la formule de Penman et couvrant la période allant de 1961 à 2003, soient 43 ans.

Une moyenne mensuelle a été calculée sur la période de 1976 à 2003, la **figure 28** illustre les variations saisonnières de l'ETP que nous en avons déduites : Cette variation est assez bien marquée au cours de l'année. Les valeurs maximales (autour de 180 mm) sont observées en saison sèche de décembre à mai avec un pic en mars (196 mm) ; Les valeurs minimales sont observées en saison des pluies (à cause essentiellement de la couverture nuageuse plus fréquente du ciel et de l'humidité élevée de l'air) de juin à novembre, avec un minimum en août (120 mm).

La variation interannuelle de l'évapotranspiration (**figure 29**) est par contre moins marquée. Pour la période de 1976 à 2003, la moyenne se situe à 1977mm. On note cependant une légère tendance à la hausse.

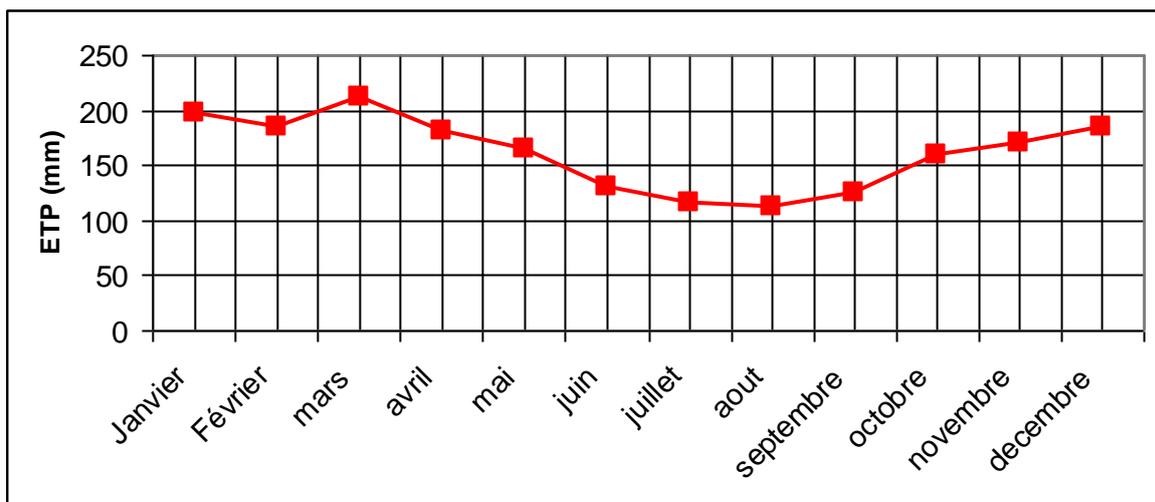


Figure 28 : Variation saisonnière de l'évapotranspiration potentielle

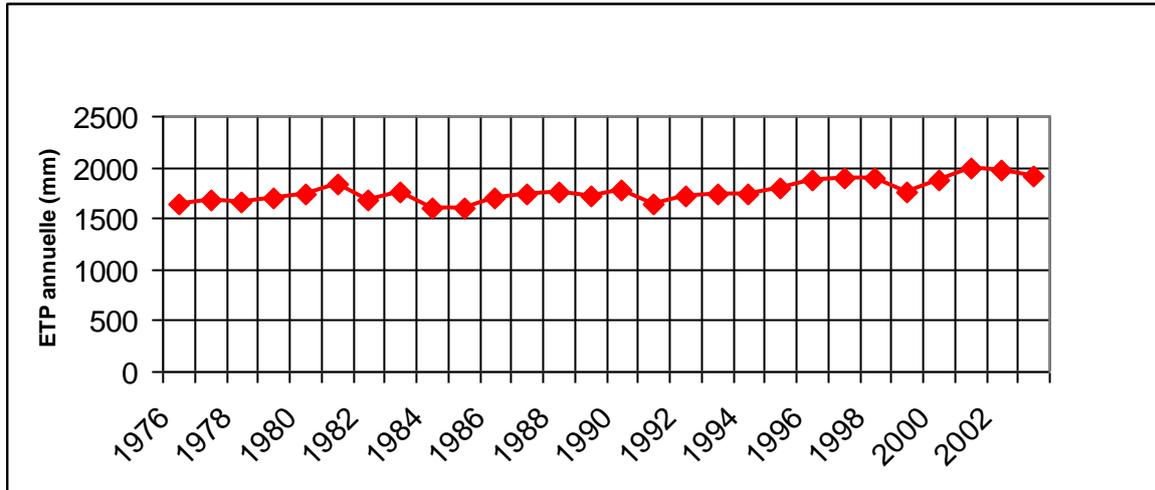


Figure 29 : Variation interannuelle de L'ETP (de 1976 à 2003)

La comparaison des variations saisonnières de l'évapotranspiration et de la pluie (**figure 30**), montre que seuls les mois de juillet, août et septembre présentent un bilan positif, c'est-à-dire que la pluie est supérieure à l'ETP.

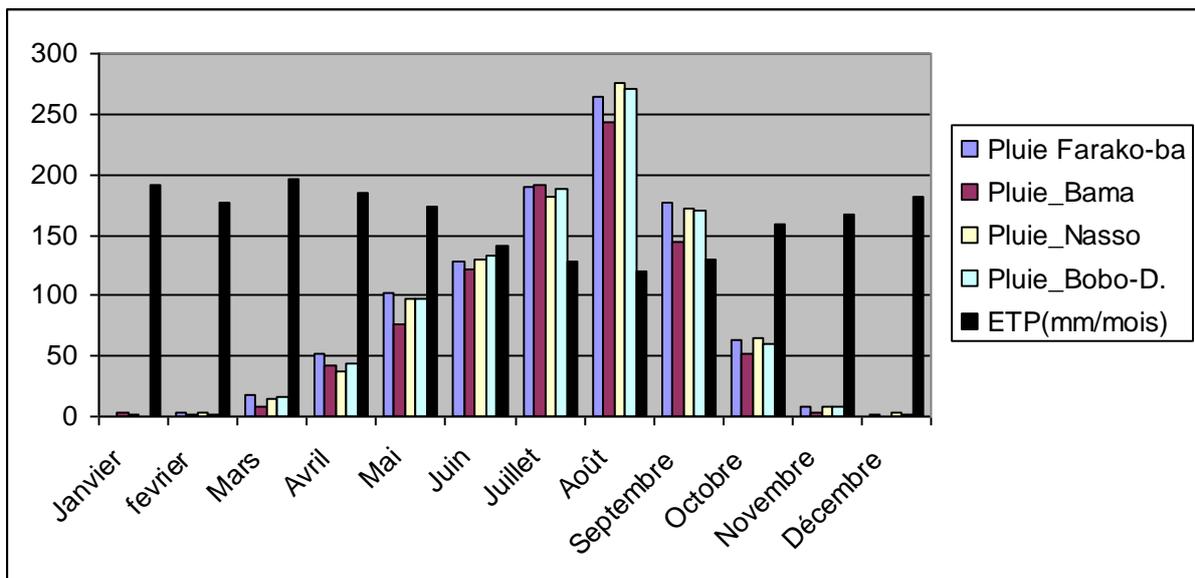


Figure 30 : Comparaison de la pluviométrie avec l'évapotranspiration potentielle

III.4. CONCLUSION

Le **tableau 17** fait la synthèse des données hydrométriques et pluviométriques :

La première ligne représente les années et la couleur grise indique la présence de données hydrométriques de l'année considérée.

Bilan en eau et étude comparative des écoulements du bassin versant du Kou
CONSTITUTION DES DONNEES DE L'ETUDE

Les lignes suivantes renseignent sur la disponibilité des données pluviométriques :
« 1 » signifie que les données de l'année et de la station considérées sont disponibles. Si
les données d'une année manquent rien n'est alors marqué.

Tableau 17 : Synthèse des données hydrométriques et pluviométriques

		84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03
Badara	Nasso		1	1	1	1	1			1	1	1		1							
	Farakoba	1	1	1			1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Bobo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Kou			1	1		1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Koumi	Nasso		1	1	1	1	1			1	1	1		1							
	Farakoba	1	1	1			1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Bobo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Kou			1	1		1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Confuence Niamé-baoulé	Nasso		1	1	1	1	1			1	1	1		1							
	Farakoba	1	1	1			1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Bobo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Kou			1	1		1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

On en tire les conclusions suivantes :

- ❖ Les données de la station pluviométrique de Nasso présentent des lacunes au cours des périodes où l'on dispose des données hydrométriques. Aussi nous nous proposons de ne garder que les trois autres stations restantes (Farakoba, Bobo-Dioulasso, Bama). Rappelons que les autres stations situées hors bassin du Kou n'ont que des observations de trois ans (2003-2005). Les pluies moyennes sur les bassins versants seront calculées uniquement avec les données de ces trois stations.
- ❖ Les données hydrométriques sont de très mauvaise qualité. Cela avait déjà été remarqué par les études antérieures (BICABA, 1991 ; HURE, 1998 ; BERTHIAUD, 2001). Seules les données de Badara sont utilisables ; et en croisant avec les données pluviométriques, on constate que la période constituée d'années consécutives la plus longue est celle de 1996 à 2002 soit sept ans. C'est donc sur cette période que nous essayerons de travailler pour la mise en œuvre de la modélisation.

IV. MODELISATION

La modélisation hydrologique a pour but de donner une représentation simplifiée du système bassin versant qui permette d'expliquer et de prédire la réponse de ce dernier à une série de sollicitations.

Les modèles hydrologiques les plus classiques sont ceux qui permettent de faire la transformation pluie-débit. HYSIM, modèle que nous utiliserons dans le cadre de ce travail est de cette catégorie. Ce modèle a été mis au point par la « water resource associates » de Grande Bretagne et il a d'ailleurs été récemment élu par l'agence de l'environnement du Royaume Uni (*United Kingdom Environment Agency*) comme son principale modèle « pluie-débit ». HYSIM est en effet adapté pour résoudre les problèmes suivants :

- L'extension des chroniques de débits ;
- L'étude des variations climatiques ;
- Reconstitution des écoulements naturels sur des bassins « anthropisés » ;
- L'étude des interactions eaux de surface / eaux souterraines.

Dans la deuxième partie de ce rapport, nous avons vu que les données pluviométriques disponibles de la vallée du Kou sont de bonne qualité et qu'elles couvrent une bonne période – souvent plus de cinquante ans. Par contre cela n'est pas le cas des données hydrométriques. L'emploi de HYSIM pourrait alors aider à surmonter ce handicap en reconstituant les données manquantes de débits, et permettre ainsi, de calculer le bilan hydrologique qui est l'objectif principal de cette étude.

L'utilisation d'un modèle pour simuler des débits sur un bassin versant donné, est conditionnée par l'achèvement de deux opérations importantes que sont : le calage ou calibration du modèle et sa validation. Ce sont là, les deux points importants que nous aborderons dans cette troisième partie, mais après une présentation plus détaillée du modèle.

IV.1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU MODELE

HYSIM est un modèle de simulation hydrologique à réservoirs, faisant intervenir des relations mathématiques pour déterminer les écoulements générés par des précipitations sur un bassin versant. Il se situe à mi-chemin entre un modèle « physique » analysant et quantifiant les phénomènes physiques se produisant dans le bassin versant et un modèle empirique à base de régressions multiples. C'est un modèle conceptuel.

IV.1.1. Bases théoriques du modèle

Les processus hydrologiques au sein du bassin versant sont schématisés par les transferts entre sept réservoirs virtuels en communication. La capacité des réservoirs, le taux maximum de transfert entre eux et les équations qui commandent les processus de transfert sont définis par des paramètres indépendants du temps. A l'opposé, les volumes des réservoirs et les taux de transfert varient en fonction du temps.

La représentation schématique à la **figure 31** illustre la façon dont les réservoirs sont raccordés entre eux et permet de mieux comprendre le fonctionnement du modèle.

Ces réservoirs se définissent comme suit :

- **Réservoir de neige :**

Toutes les précipitations tombant sous forme de neige sont retenues dans ce réservoir avant d'être libérées vers le réservoir d'interception. Le taux de transfert entre ces deux réservoirs est égal au taux de fusion potentiel de la neige.

- **Réservoir d'interception :**

La pluie (ou dans certains cas la neige) peut être retenue par la végétation, puis redistribuée en une partie qui parvient au sol et une autre qui s'évapore. La partie n'atteignant jamais le sol forme l'interception. Ce réservoir est la première destination des eaux de pluies de même, il est le premier à être débité par l'évapotranspiration.

- **Stockage dans les dépressions :**

On définit l'eau de *stockage dans les dépressions* comme l'eau retenue dans les creux et les dépressions topographiques du sol pendant et après une averse.

- **Horizon supérieur du sol**

Ce réservoir représente l'humidité retenue dans les couches superficielles du sol. Il a une capacité finie, égale à la profondeur de l'horizon multipliée par sa porosité.

Le taux d'humidification de l'horizon dont la distribution spatiale est considérée triangulaire, est majoré par le taux d'infiltration potentielle. Ce taux d'infiltration potentielle est basé sur l'équation de Philips ci-dessous :

$$x = \phi t^{0.5} + \chi t + \omega t^{1.5} + \dots$$

Avec,

x = distance parcourue par le front d'humectation,

t = temps pour lequel $x = 0$

ϕ, χ et ω sont fonctions du type et des conditions du sol. Manley (1978) démontre que cette relation peut être approchée par l'expression suivante :

$$x = (2kPt)^{0.5} + kt, \text{ avec :}$$

P = succion capillaire

K = perméabilité à saturation du medium d'où l'on tire le taux d'infiltration potentielle.

Brooks et Corey (1964) démontrent que P s'exprime par :

$$P = P_b / S_e^{1/\gamma}$$

Où P_b = Pression de bouillonnement (*bubbling pressure*, en mm de colonne d'eau)

γ = indice de composition granulométrique

S_e = Humidité efficace définie par la relation suivante :

$$S_e = (m - S_r) / (1.0 - S_r)$$

Avec, m = humidité à saturation du sol

S_r = Humidité résiduel correspondant à l'humidité minimale à laquelle on peut emmener le sol en l'asséchant par augmentation de la succion. En simulant la teneur en eau de l'horizon supérieur, on pourra alors simuler les forces qui causent le mouvement de l'eau.

La principale perte d'eau de l'horizon superficiel est due à l'évapotranspiration qui, si la succion capillaire est inférieure à 15 atmosphères, s'établit au taux potentiel (toute perte d'interception ayant été pris en compte). Si la succion capillaire est supérieure à 15 atmosphères, aucune évaporation ne se produit.

Le deuxième transfert d'humidité à considérer est l'écoulement hypodermique ou retardé. Il se produit suivant un taux, qui est une fonction complexe de la perméabilité horizontale efficace, la pente de la couche et la distance au chenal.

Brooks et Corey (1964) cité par Manley (2003), ont démontré que la perméabilité efficace des milieux poreux est donnée par :

$$K_e = K(S_e)^{(2+3\gamma)/\gamma} \text{ où,}$$

K_e est la perméabilité efficace et les autres termes sont tels que définis précédemment.

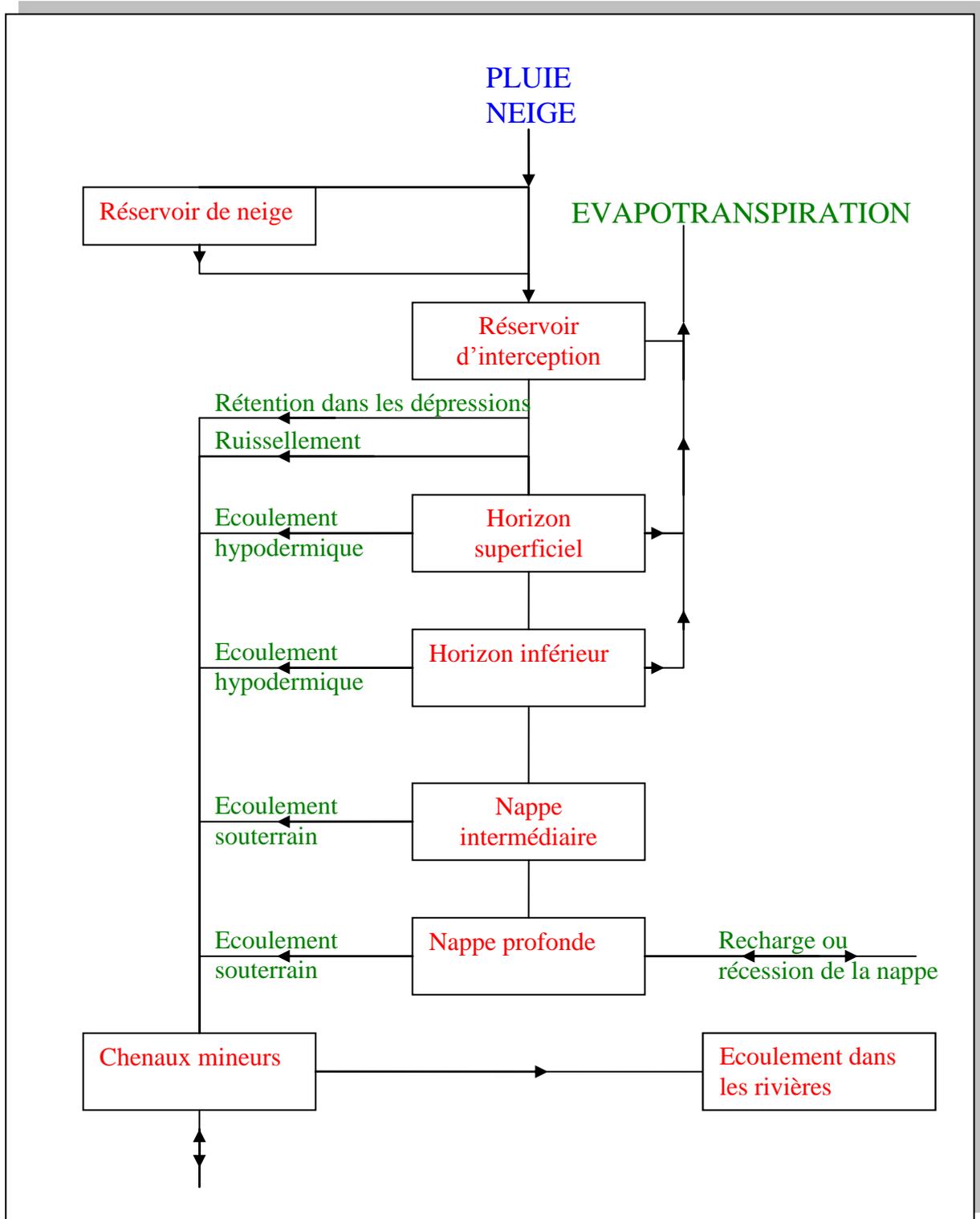


Figure 31 : Schéma de fonctionnement du modèle

L'écoulement hypodermique ou retardé est donné par la relation suivante :

$$\text{Ecoulement hypodermique} = Rfac1(S_e)^{(2+3\gamma)/\gamma}$$

Avec, Rfac1= perméabilité horizontale à saturation mm/h

La percolation est le dernier type de transfert se produisant à partir de cet horizon.

Elle est donnée par :

$$\text{Percolation} = K_b (S_e)^{(2+3\gamma)/\gamma} \text{ où,}$$

K_b = perméabilité à saturation à la limite de l'horizon,

S_e = Humidité efficace de l'horizon superficiel.

En combinant les équations précédentes le taux d'accroissement du stock est donné par :

$$\frac{ds}{dt} = i - (Rfac1 + K_b) S_e^{(2+3\gamma)/\gamma}$$

Où, i = Flux entrant

S = réservoir d'humidité

t = le temps.

Cette équation ne peut malheureusement être résolue de manière explicite ; Mais en faisant l'hypothèse selon laquelle la variation du stock serait négligeable devant le stock initial, cela conduit à une simplification de l'équation et permet alors, d'obtenir une solution approximative. Pour tenir compte des situations extrêmes la variation du stock doit être comprise entre une limite supérieure et une limite inférieure. La limite supérieure est définie par le niveau de stockage à partir duquel, le flux de sortie est égal au flux d'entrée. La limite inférieure se déduit en donnant à i la valeur zéro dans l'équation précédente, cas pour lequel une solution explicite est possible.

- **Horizon inférieur du sol**

Ce réservoir représente l'humidité du sol du situé en dessous de l'horizon supérieur, mais restant encore dans la zone racinaire (horizons B et C). L'excédent de la demande en évapotranspiration n'ayant pas encore été satisfaite est alors soustraite de ce réservoir au taux potentiel avec les mêmes restrictions que dans le cas de l'horizon superficiel.

- **Nappe souterraine intermédiaire**

Il s'agit d'un réservoir linéaire infini représentant le premier niveau de stockage des eaux souterraines. En particulier dans les zones calcaires, la plupart des fissures retenant de l'eau communiquent avec un ruisseau plutôt qu'avec les nappes profondes, ce réservoir représente cet état de fait. Deux paramètres déterminent les opérations qui s'y déroulent : le coefficient de débit et la proportion d'humidité qui sort du réservoir pour entrer dans le canaux. Le réservoir étant linéaire, la relation entre le stockage et le temps se déduit immédiatement.

- **Nappe profonde**

Il s'agit également d'un réservoir linéaire infini, ayant un coefficient de débit constant. C'est de là que les eaux souterraines sont extraites. Comme dans le cas précédent, la détermination du flux (débit de l'écoulement) est immédiate.

- **Chenaux mineurs**

Ce composant représente le dispatching des écoulements à travers des petits ruisseaux et des fossés et dans des canaux éphémères en cas de saturation du bassin versant. L'hydrogramme unitaire est triangulaire avec un temps de base égal à 2.5 fois le temps de montée.

IV.1.2. Les variables d'entrée et de sortie du modèle

Les principales variables d'entrée du modèle sont :

- La pluviométrie. Il s'agit de pluie moyenne sur le bassin ou le sous bassin versant considéré, ou des données brutes des stations pluviométriques. Dans ce dernier cas, HYSIM effectue alors le test de double masse, corrige les lacunes à l'aide de régressions et calcule la pluviométrie moyenne sur le bassin versant.
- L'évapotranspiration (ETP). Là aussi HYSIM peut recevoir directement l'ETP déjà calculée ou faire ce travail lui-même quand, on lui introduit les différents termes de l'évapotranspiration suivant la formule de Penman.

Les autres variables d'entrées sont :

- Taux de fusion potentiel de la neige
- Recharge et tarissement des rivières
- Coefficient de récession de la nappe

Notons cependant que le modèle peut tourner même dans une situation où, les données concernant une ou plusieurs de ces variables ne seraient pas disponibles.

De même, le modèle se présente avec une certaine souplesse quant au pas de temps des données. Ce dernier peut en effet être journalier, hebdomadaire, mensuel ou même d'une fraction entière journalière.

Les variables de sortie sont :

- Les débits simulés
- Les contenances de différents réservoirs au pas de temps choisi.
- L'évapotranspiration réelle
- Les flux d'eau entre les différents réservoirs

IV.1.3. Les paramètres du modèle

La philosophie de développement de HYSIM est fondée sur le souci de donner une signification physique réaliste à tous les paramètres auxquels le modèle fait recours. La plupart des paramètres employés sont familiers aux hydrologues ; c'est le cas du réservoir d'interception ou de la superficie du bassin versant par exemple. Mais bien d'autres paramètres, en particulier ceux relatifs à la physique du sol sont moins bien évidents.

Le bassin versant à modéliser peut être subdivisé en sous bassins qui s'emboîtent. Chaque sous bassin peut à son tour, être subdivisé en plus de trois zones hydrologiques individualisées par leurs caractéristiques climatiques et de sols. Dans ce cas on définira alors, pour chaque sous-bassin la série de paramètres qui lui est propre. Le réseau hydrographique est également schématisé en réseau de chenaux.

La première étape de la modélisation est de ce fait, de décider de la subdivision en sous bassins et de la structuration du réseau hydrographique à adopter.

Ce modèle est prolifique en paramètres. On en distingue deux types : les paramètres hydrauliques et les paramètres hydrologiques.

- Les paramètres hydrauliques concernent les caractéristiques géométriques, la pente et la rugosité des chenaux (**Figure 32**).

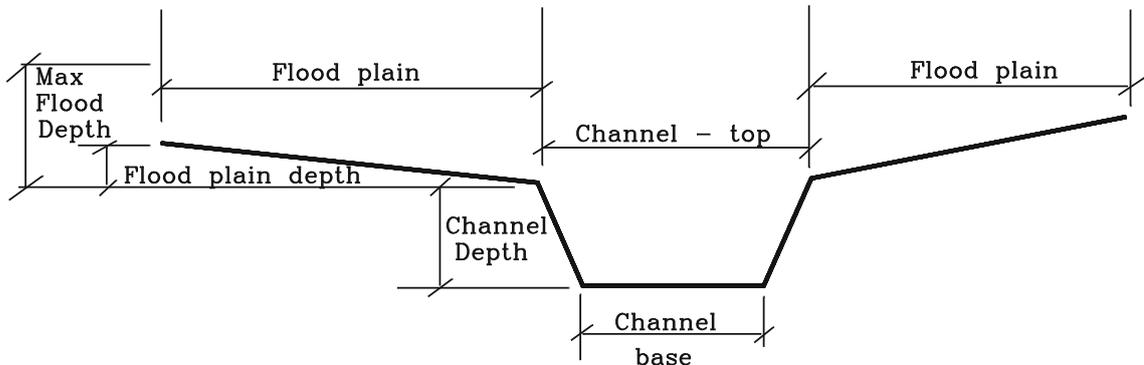


Figure 32 : Paramètres hydrauliques du modèle

- Les paramètres hydrologiques

Ils sont les plus nombreux et on les regroupe en « paramètres de base » et « paramètres avancés ». On les verra plus en détail un peu plus loin.

IV.2. MISE EN ŒUVRE DU MODELE SUR LE BASSIN DU KOU

« Le calage d'un model consiste à trouver le jeu optimal de paramètres, c'est-à-dire celui qui optimise (bien souvent minimise) un critère numérique permettant de juger de l'adéquation du modèle pour des données disponibles. En général ce critère mesure un écart entre la chronique des valeurs de débits produites par le modèle et la chronique des valeurs observées ». Il traduit la performance du modèle. Ce Critère sera pour nous le critère de Nash pour les raisons que nous expliciterons plus loin. La détermination des paramètres se fera en deux étapes :

Une première étape où les paramètres sont déterminés sur la base des caractéristiques notamment physiques du bassin versant et,

Une deuxième étape d'ajustement (d'optimisation) des paramètres.

Mais commençons d'abord par déterminer la période de calage et le pas de temps des données.

IV.2.1. Choix des échelles de modélisation

IV.2.1.1. Echelle spatiale

La modélisation hydrologique s'opère suivant différentes échelles spatiales (KARAMBIRI, 2003). On distinguera entre autres :

- Premièrement, l'échelle du bassin versant. Cela se traduit par le découpage du bassin versant en unités hydrologiques homogènes dotées de paramètres initiaux mesurés ou estimés qui seront ensuite optimisés au cours du calage.
- On peut également conduire la modélisation à l'échelle de la parcelle en déterminant les paramètres spécifiques à chaque état de surface élémentaire qui seront ensuite reportés sur tout le bassin.
- ...

Le modèle HYSIM est dans le premier cas. Le bassin versant est conçu comme un complexe de sous-bassins hydrologiques emboîtés. Le calage du modèle consistera alors, à optimiser des paramètres déterminés ou estimés dans un premier temps, sur la base d'observations et de mesures effectuées sur le terrain.

La version « démo » du modèle que nous utilisons dans le cadre de cette étude, est cependant soumise aux deux limitations suivantes :

- Impossibilité de travailler avec des séries de plus de cinq ans de données ;
- Impossibilité d'utiliser la subdivision en sous-bassins emboîtés, tout le bassin versant devra être conçu comme un ensemble hydrologiquement homogène.

D'autre part, dans la deuxième partie de ce rapport nous étions arrivés à la conclusion qu'au niveau des trois stations hydrométriques sélectionnées, seules les données de Badara étaient utilisables dans le cadre d'une modélisation.

Pour ces deux raisons ci-dessus évoquées, notre unité d'étude sera le sous-bassin de Badara. Sans arriver jusqu'à l'exutoire du bassin versant, le poste hydrométrique de Badara est géographiquement suffisamment bien situé en aval des principaux utilisateurs des ressources en eau du Kou (périmètres irrigués, station de pompage de l'ONEA, etc.). On pourra de ce fait assimiler le sous-bassin dont Badara est l'exutoire, à l'ensemble du bassin versant du Kou sans trop de biais sur les conclusions.

IV.2.1.2. Echelle de temps

Pour ce qui est du pas de temps, nous gardons un pas de temps journalier car d'une part, le modèle l'accepte et d'autre part toutes les données disponibles sont à ce pas de temps.

IV.2.2. Choix des événements à modéliser

L'objectif principal de cette étude est la détermination du bilan hydrologique. La modélisation devrait aider à déterminer un terme important du bilan à savoir les volumes écoulés. Ce volume est déterminé par intégration du débit moyen journalier sur la durée sur laquelle sera effectué le bilan. L'événement à modéliser est de ce fait, le débit moyen journalier. Les données journalières d'ETP et de pluies s'étalent sur la période 1996-2002

IV.2.3. Choix des périodes et des fonctions critères de calage et de validation

IV.2.3.1. Choix des périodes de calage et de validation

Nous avons subdivisé la période totale (1996 à 2002) couverte par nos données en deux séries de trois ans chacune. La première année (1996) devant servir pour la mise en route du modèle, le calage sera fait sur les trois années suivantes (1997 à 1999) dont les données sont les meilleures. La deuxième série (2000 à 2002) va être utilisée pour la validation.

IV.2.3.2. Choix de la fonction critère de calage et de validation

Lorsqu'il s'agit de juger de la qualité d'une simulation, il est fait appel à des fonctions objectives ou fonctions de critères qui permettent d'estimer globalement sous forme d'un seul nombre, l'écart entre les sorties calculées et les débits observés. Plusieurs fonctions critères sont utilisées pour l'appréciation des modèles pluies-débits. Nous pouvons en citer à titre d'exemple : le critère de Fortin (Fortin et al., 1971) ; le critère de Nash (Nash et Sutcliffe, 1970) ; etc....

Pour ce qui est de notre étude, nous utiliserons dans un premier temps, un critère visuel qui consistera à représenter sur un graphique les valeurs observées des débits en fonction des valeurs simulées. Ensuite, ce critère visuel sera quantifié par la fonction critère de Nash. Il est en effet de l'avis de nombreux auteurs que, c'est la fonction qui permet d'obtenir les meilleurs résultats. A preuve, cette conclusion des études comparatives SERVAT ET DEZETTER (1990), puis DEZETTER (1991) : « Au regard des objectifs visés (reconstitution la plus précise possible des volumes de crue en saison des pluies, restitution de la dynamique des hydrogrammes, absence de décalage dans le temps entre les hydrogrammes observés et calculés) et de la nature des données disponibles, quelque soit l'algorithme utilisé, c'est son association avec le critère de Nash qui permet d'accéder au meilleur niveau de résultats ».

La fonction de critère de Nash est donnée par l'expression suivante :

$$\text{Critère de Nash} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{Cal}^i - Q_{obs}^i)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs}^i - Q_{obs-moy})^2} .$$

Avec, Q_{cal} : Débit calculé ;

Q_{obs} : Débit observé ;

$Q_{obs-moy}$: Débit observé moyen.

On sait que $\text{Critere de Nash} \in]-\infty, 1]$; Le modèle sera alors considéré comme performant lorsque la valeur du *Critere de Nash* est proche de 1. Pour mieux apprécier cette performance, nous adoptons l'échelle d'appréciation suivante (PACOME, 2004) :

Si $\text{Critere de Nash} > 0,8$ alors le critère de Nash est bon pour le modèle ;

Si $0,7 < \text{Critere de Nash} \leq 0,8$ alors le critère de Nash est satisfaisant ;

Si $0,6 < \text{Critere de Nash} \leq 0,7$ alors le critère de Nash est acceptable ;

Si $0,5 < \text{Critere de Nash} \leq 0,6$ alors le critère de Nash est peu acceptable ;

Si $\text{Critere de Nash} \leq 0,5$ alors le critère de Nash est mauvais.

hétérogénéité avec une prédominance de zone arbustive (66%) suivi de plantations (19%), champ (13.4%) et plaine rizicole (8%). Nous retenons de ce fait une valeur 10 mm.

- **Proportion de zone imperméable (Impermeable Proportion)**

Il s'agit de la proportion de la partie du bassin versant que l'on peut considérer comme imperméable. Ceci inclus non seulement, les routes et parkings, mais également les aires naturels réputées avoir cette propriété ainsi que la rivière elle-même. Une valeur de 0.02 est typique des zones rurales, pour les zones urbanisées cette valeur pourra dépasser 20%. Ce dernier taux nous semble exagéré pour le contexte africain en générale, et pour celui de la vallée du Kou en particulier ; La ville de Bobo-Dioulasso ne peut pas être en effet, considérée imperméabilisée au même degré que les villes anglaises qui appartiennent au contexte de création et de conception de HYSIM. Nous estimons ce paramètre à 0.02 sur la base de la carte d'occupation des sols du bassin versant.

- **Temps de montée des petits chenaux. (Time to peak - minor channels)**

Ce paramètre contrôle la simulation de la réponse des canaux affluents mineurs qui n'auront pas été pris en compte, dans la schématisation du réseau hydrographique. Ce paramètre s'estime par la formule suivante :

$$T_p = 2.8(L/\sqrt{S})^{0.47}$$

Où, T_p = Temps de montée en heures,

L = longueur de la rivière considérée en km,

S = pente de la rivière considérée m/km.

On retiendra comme valeur du paramètre la moyenne des T_p calculés avec la formule précédente pour 4 à 5 affluents mineurs.

Ce paramètre a été déterminé à l'aide de la carte topographique de la vallée du Kou.

On trouve : $T_p = 43h$

- **Profondeur racinaire (soil rooting depth (mm))**

Sa valeur est normalement comprise entre 500 et 1000 mm, mais cela dépendra surtout des types de végétations et de sols en présence. Ce paramètre détermine la capacité de rétention totale des horizons superficiel et inférieur du sol. Il est cependant difficile à déterminer à l'échelle du bassin versant, c'est donc par itération que nous le déterminerons en partant d'une valeur de 1000 mm.

- **Indice granulométrique (Pore Size Distribution Index (PSDI))**

C'est l'un des plus importants paramètres du modèle car, il contrôle la réponse du sol. Sa valeur se détermine à l'aide du **tableau 18**, avec comme entrée la texture du sol. Dans notre cas sa valeur est de 0,25.

- **Perméabilité verticale à saturation, à la limite entre l'horizon superficiel et l'horizon qui lui est inférieur (Saturated permeability at the horizon boundary)**

Ce paramètre contrôle le taux de transfert de l'humidité entre les deux horizons du sol. Sa valeur varie de 5,0 mm/h pour les sols argileux à plus de 200mm/h pour le sable. Pour commencer les itérations, on prendra comme valeur de départ, soit le double de la valeur donnée par le **tableau 18**, soit la valeur par défaut du modèle qui est de 10 mm/h. Ce paramètre est en effet normalement modulé et ajusté par le modèle.

- **Perméabilité verticale à saturation à la base de l'horizon inférieur (Saturated permeability at the base of the lower horizon)**

Ce paramètre contrôle le taux de transfert de l'humidité du sol vers la nappe souterraine. En l'absence de nappe souterraine, la valeur de ce paramètre est zéro. Dans le cas contraire, sa valeur va de 1.0 mm/h pour les sols lourds à 100 mm/h et plus pour les sols sableux et graveleux. On pourra comme précédemment utiliser les valeurs du **tableau 18** ou garder la valeur par défaut de 10 mm/h donné par le modèle à titre de valeur de démarrage, car ce paramètre est également modulé et ajusté automatiquement.

- **Perméabilité horizontale à saturation de l'horizon superficiel (interflow run-off from the upper horizon at saturation)**

La valeur de ce paramètre est ajustée au cours de la calibration en partant de la valeur par défaut de démarrage de 10 mm/h.

- **Perméabilité horizontale à saturation de l'horizon inférieur (interflow run-off from the lower horizon at saturation)**

La procédure de détermination de ce paramètre est la même que celle du paramètre précédent.

- **Coefficient de récession de la nappe (groundwater recession)**

La valeur de ce paramètre est donnée par la relation suivante :

Bilan en eau et étude comparative des écoulements du bassin versant du Kou
 MODELISATION

$$\text{Coefficient } t \text{ de recession} = (q_2 / q_1)^{(1/m)}$$

Où, q_1 et q_2 sont respectivement, les débits au début et à la fin de la saison sèche et m , la durée en mois de cette saison sèche.

Tableau 18 : Paramètres hydrologiques en fonction de la texture du sol

Texture	Teneur en argile (%)	PSDI	Pression de bouillonnement	permeabilité mm/h	Porosité	Humidité résiduelle
Peat	0	0.50	100	500	0.70	0.10
Sable	3	0.25	120	630	0.40	0.10
Loamy Sand	6	0.23	90	560	0.41	0.10
Marne sableuse	9	0.20	220	125	0.44	0.15
Silt Loam	14	0.19	80	26	0.49	0.15
Loam	19	0.18	500	25	0.45	0.15
Sandy Clay Loam	28	0.14	300	23	0.42	0.15
Silty Clay Loam	34	0.13	360	6	0.48	0.20
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

Nota:

1. Ces valeurs sont basées sur des données expérimentales. Certains parmi elles varient d'une manière rendant difficile l'estimation d'une moyenne quand plusieurs types de sols sont concernés. A titre d'exemple, dans le cas de la pression de bouillonnement la valeur par défaut de 250 doit être utilisée à moins que le bassin versant ne soit à 100% d'un type particulier

2. La teneur en argile et l'humidité résiduelle ne sont pas utilisées par HYSIM mais incluses dans le tableau à titre de complément.

- **Coefficient de correction de la pluviométrie (Precipitation correction factor)**

Ce paramètre a été prévu pour corriger une éventuelle sous-estimation ou une éventuelle surestimation de la pluviométrie. Le test de sensibilité a montré que le modèle réagit trop par rapport à la pluviométrie de sorte que les débits simulés sont

nettement supérieurs aux débits observés. L'introduction de ce paramètre en diminuant (dans notre cas) la pluviométrie permet alors de coller les débits simulés avec les débits observés. Après plusieurs essais la valeur de 0,6 a été retenue.

- **Coefficient de correction de l'évapotranspiration potentielle (Potential evapotranspiration correction factor)**

La détermination de l'évapotranspiration étant réputée moins précise que celle de la pluviométrie, c'est sur ce paramètre que l'on va le plus souvent jouer pour obtenir l'équilibre du bilan hydrologique (optimisation à paramètre unique).

- **Superficie du sous-bassin (sub-catchment area)**

C'est la superficie du sous bassin versant en km². Elle est de 989 km².

IV.2.4.3. Paramètres hydrologiques avancés

Ils ne sont dits « avancés » que parce que le modèle est moins sensible à leur modulation. Le plus souvent on se contentera des valeurs par défaut suggérées.

- **Perméabilité à saturation à la surface de l'horizon superficiel (saturated permeability at the top of the Upper horizon boundary):**

La valeur par défaut proposée et que nous retiendrons est : 1000 mm/h.

- **Proportion de stockage d'humidité dans l'horizon supérieur**

C'est un paramètre difficile à ajuster avec assurance. Mais, il serait peu commun de dépasser la valeur par défaut de 0,3. S'il se trouve que la réponse du modèle à de petits orages est généralement très faible, la valeur de ce paramètre peut être réduite, c'est-à-dire que l'horizon supérieur se remplira plus rapidement et se déchargera aussitôt.

- **Rapport de la surface du bassin versant souterrain participant au bilan, au bassin versant de surface (Ratio of Contributing Groundwater Catchment Area to Surface Catchment Area)**

Ce ratio tient compte du fait que les deux bassins pourraient ne pas coïncider.

- **Proportion du bassin versant qui soit sans contribution de nappe souterraine (Proportion of Catchment without Contributing Groundwater).**

Idem avec le paramètre précédent.

- **Proportion de zone marécageuse (Riparian proportion)** soumise à l'évapotranspiration au taux potentiel pendant toute l'année et ce même quand tout le reste du bassin versant serait sec.

- **Porosité (porosity) :**

Le tableau 18 donne une valeur de 44%.

- **Pression de bouillonnement (bubbling pressure)**

Cette valeur représente la succion capillaire à partir de laquelle, des bulles apparaissent quand le sol est soumis à un assèchement. Ce paramètre est l'un des deux paramètres qui commandent la réponse de la succion capillaire dans le sol à la teneur en eau. Des valeurs typiques sont indiquées dans le **tableau 18** mais, la valeur par défaut appropriée pour un bassin versant réputé hétérogène est 250.

- **Coefficient de récession de la nappe souterraine intermédiaire**

Valeur par défaut : 0,5.

- **Proportion d'humidité quittant les nappes intermédiaires en direction des canaux.**

Valeur par défaut : 0.

- **Facteur d'interception**

Ceci est un coefficient de pondération de l'évapotranspiration qui se produit au droit du réservoir d'interception. L'évaporation s'y produit en effet, à un taux équivalent à ce qui se produirait sur un plan d'eau libre dont le taux est nettement supérieur à l'évapotranspiration. Valeur par défaut : 1.

IV.2.4.4. Test de sensibilité

Ce test permet d'identifier les paramètres qui influencent le plus les résultats du modèle. Le test a consisté à faire varier les paramètres dans des plages raisonnables et réalistes vis à vis des observations de terrain. A l'issue de ce test on fait le constat suivant :

- Le facteur de zone imperméable a de l'influence sur l'effet des petites pluies sur les débits. Plus ce facteur est grand, plus les débits simulés seront élevés.
- La profondeur racinaire a une grande influence sur les volumes et les débits ruisselés. Le volume ruisselé croît en sens inverse de la profondeur racinaire.
- Le facteur de récession de la nappe a quant à lui de l'influence sur le débit de saison sèche ou débit de base.
- Les facteurs de correction de la pluviométrie et de l'évapotranspiration jouent dans le même sens que le débit. Quand les débits simulés sont supérieurs aux débits observés, il faut diminuer le paramètre de correction de la pluie et augmenter celui de l'ETP. Mais ces deux paramètres ont moins de conséquences que la profondeur racinaire.
- Un autre facteur dont l'influence sur les débits et les volumes est important, c'est l'indice de composition granulométrique. Plus cet indice est grand, moins il y a d'écoulement. Mais cela a une influence positive sur le débit de base.

Les autres facteurs comme les perméabilités ont également des influences notables sur l'écoulement, mais comme ces paramètres sont optimisés automatiquement, on n'en tiendra pas trop compte.

IV.2.4.5. Optimisation des paramètres du modèle

L'optimisation des paramètres a pour but de trouver le jeu de paramètres qui rapproche le plus possible le comportement du modèle de celui du bassin modélisé, la similitude des comportements étant quantifiée par un critère (fonction objectif) servant à l'optimisation des paramètres et mesurant ce degré de similitude.

L'optimisation des paramètres se fait en deux étapes :

- L'optimisation à paramètre unique : C'est l'optimisation par ajustement de l'un des trois paramètres suivants :
 - Le coefficient correcteur de la pluviométrie ;
 - Le coefficient correcteur de l'évapotranspiration ;
 - Et la profondeur racinaire.

Le choix du paramètre à ajuster va largement dépendre de la qualité des données pluviométriques. Si ces données donnent une bonne couverture spatiale du bassin (c'est-à-dire une bonne représentativité), il serait alors préférable d'optimiser le coefficient correcteur de l'évapotranspiration potentielle (ETP) ; Dans le cas contraire, choisir le coefficient correcteur de la pluviométrie. La profondeur racinaire ne sera choisie que dans le seul cas où, les données pluviométriques et d'évapotranspiration seraient très sûres.

- L'optimisation à multiples paramètres

L'optimisation porte sur quatre au moins, des six paramètres suivants :

- 1) Perméabilité verticale à saturation, à la limite entre l'horizon superficiel et l'horizon qui lui est inférieur (Saturated permeability at the horizon boundary) ;
- 2) Perméabilité verticale à saturation à la base de l'horizon inférieur (Saturated permeability at the base of the lower horizon) ;
- 3) Perméabilité horizontale à saturation de l'horizon superficiel (interflow run-off from the upper horizon at saturation):
- 4) Perméabilité horizontale à saturation de l'horizon inférieur (interflow run-off from the lower horizon at saturation):
- 5) Profondeur racinaire (soil rooting depth (mm)) :
- 6) Indice granulométrique (Pore Size Distribution Index (PSDI)) :

Quatre fonctions objectives sont disponibles dans cette option d'optimisation à multiples paramètres. En effet, l'on doit choisir l'une de ces quatre fonctions avant de lancer l'optimisation. HYSIM va alors essayer de minimiser cette fonction objective, en choisissant une direction à partir du jeu initial de paramètres, pour effectuer des déplacements dans l'espace ces derniers, et calculer la valeur de la fonction au nouveau point. S'il y a amélioration, l'opération est renouvelée à partir de ces nouveaux paramètres. Sinon, on choisit une nouvelle direction à partir de ce même point.

Ces quatre fonctions objectives sont les suivantes :

a) Erreur réduite d'estimation (Reduced error estimate (R.E.E))

Elle est donnée par la formule suivante :

$$R.E.E. = \left\{ \frac{\sum (F - F_R)^2}{\sum (F - F_m)^2} \right\}^{0.5}$$

Où,
F = Débit moyen journalier simulé
F_m = Débit moyen journalier observé
F_R = Débit journalier observé

Cette fonction donne le même poids à des erreurs équivalentes ; par exemple une erreur de 1m³/s aura le même poids, que le débit soit de 10 ou de 1m³/s. Le choix du R.E.E. est bien indiqué, pour la modélisation des écoulements ou pour des bassins versants à activité saisonnière.

b) Erreur proportionnelle d'estimation (Proportional error of estimate (P.E.E.))

Elle est donnée par la formule suivante :

$$P.E.E. = \left\{ \sum \left(\frac{(F - F_R)}{F_R} \right)^2 / (n - 1) \right\}^{0.5}$$

Où, n désigne le nombre de jours utilisés pour le calage et les autres termes restent tels que définis ci-dessus. Cette fonction conduit à la minimisation des erreurs proportionnelles ; par exemple une erreur de 1m³/s où le débit est de 10m³/s, a le même poids qu'une erreur de 0.1m³/s où le débit est de 1m³/s. Cette fonction objective est particulièrement utile dans le cas des écoulements lents.

c) Erreur extrême d'estimation (Extreme error of estimate (E.E.E.))

Elle est donnée par la formule suivante :

$$E.E.E. = \left\{ \frac{\sum (|F - F_R| * |F - F_m| / (F_R * F_m))}{(n - 1)} \right\}^{0.5}$$

Cette fonction objective donne des poids plus grands aux extrêmes (maxi et mini). Elle sera généralement préférée à toutes les autres. Ce sera celle que nous allons utiliser.

d) Débit de base (base flow)

Cette fonction est basée sur la somme des carrés des erreurs des débits de base.

IV.3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

IV.3.1. Analyse de la qualité des résultats du modèle

La pluviométrie moyenne sur le bassin versant a été déterminée par la méthode des polygones de Thiessen et à partir des observations faites sur trois stations assez bien réparties dans l'espace. Elle nous paraît de ce fait, plus sûre que l'évapotranspiration qui a été déterminée à partir d'une seule station. C'est pour cette raison que nous avons choisi de jouer sur le coefficient se rapportant à l'ETP, dans l'étape de l'optimisation à paramètre unique.

Pour l'optimisation à multiples paramètres, nous avons joué sur les quatre paramètres que le concepteur conseille dans les cas courants (voir paragraphe IV.2.4.4).

Après plusieurs simulations où nous avons chaque fois déterminé la fonction critère nous sommes arrivé au résultat suivant :

Tableau 19 : Valeurs des paramètres de base issues du calage

Réservoir d'interception (mm)	10
Proportion de terrain imperméable	0,10
Temps de montée (heure)	43
Profondeur racinaire* (mm)	6000
Index de composition granulométrique	0,25
Perméabilité verticale à saturation a l'interface des deux horizons* (mm/h)	140
Perméabilité verticale à saturation à la base de l'horizon inférieur* (mm/h)	14
Écoulement hypodermique horizon superficiel* (mm/h)	14
Écoulement hypodermique horizon inférieur* (mm/h)	11
Facteur de récession de la nappe* (par mois)	0,999
Facteur de correction de la pluviométrie*	0,60
Facteur de correction de l'évapotranspiration	0,307
Surface du bassin versant (Km2)	989

Il convient de voir si les valeurs de paramètres trouvés sont réalistes. La critique va porter sur les paramètres marqués par un astérisque dans le **tableau 19**, les autres paramètres ayant déjà été choisis sur la base des données de terrain :

➤ La perméabilité à saturation à l'interface des deux couches (140 mm) est caractéristique des terrains sableux (voir **tableau 20**), et ceci correspond à notre terrain.

- La perméabilité à saturation à la base de la couche inférieure est caractéristique de sols lourds, ce qui est également le cas du bassin du Kou.
- Quant aux écoulements hypodermiques les taux qui sont les leurs nous semblent raisonnables.
- La valeur de la profondeur racinaire semble cependant exagérée, mais c'est tout de même une valeur plausible du fait de la nature sédimentaire du terrain ; et d'après CHABI GONNI (2003), la nappe se situerait en moyenne à 20 m de profondeur.
- Le coefficient de correction de la pluviométrie (0,60) semble être faible : Cela pourrait s'expliquer par les diverses prélèvements en amont de Badara car les erreurs sur la mesure de la pluie ne pourraient à elle seule expliquer un rabattement de 40 % pour passer de la pluie mesurée à la pluie efficace.
- Le coefficient de correction de l'ETP semble être également sous-estimé. Cela pourrait s'expliquer par la faiblesse du coefficient de correction de la pluviométrie. Les valeurs de ces deux derniers paramètres posent la question de la surparamétrisation du modèle.

Tableau 20 : Coefficient de perméabilité en fonction de la texture du sol. (Tiré du cours d'Hydrogéologie de M. DIENG (EIER))

Diamètre (mm)	5	0,05	0,005	
Nature des sols	Graviers ou Gravillons sans éléments fins	Sable pur ou sable et Gravier sans éléments fins	Sable très fin, silts et mélange de sables et argiles	Argiles homogènes
K en m/s	1	10^{-2}	10^{-5}	10^{-9}
	Très bonne	Bonne	Mauvaise	Imperméable

Les valeurs des paramètres déterminés à partir du calage sont réalistes et acceptables.

IV.3.2. Analyse des résultats du calage

Les graphiques des **figures 34 à 39** présentent les résultats du calage. L'observation visuelle des graphiques et les valeurs du critère de Nash sur les débits et de l'erreur relative sur les volumes du **tableau 21** autorisent les remarques suivantes :

- Critère de Nash > 0,6 : bonne restitution des débits cependant, l'observation des graphiques (semis des points) montre que le modèle a tendance à sous-estimer les débits maximums et moyens (simulés). Par contre les débits minimums simulés sont surestimés.

Bilan en eau et étude comparative des écoulements du bassin versant du Kou
MODELISATION

- L'erreur relative exprimée par la différence entre les volumes observés et simulés est inférieure en valeur absolue à 5%, ce qui est acceptable, d'où nous concluons qu'il y a une bonne restitution des volumes.
- Une bonne synchronisation des débits observés et simulés au cours des années 1997 et 1999, par contre au début de l'année 1998 on constate un certain décrochage des deux courbes ; cela peut être du à la qualité des données d'observation. Le modèle annonce une crue ; cela est confirmé en regardant l'histogramme des pluies où on peut remarquer qu'il y a effectivement une pluie correspondant à ce jour. La courbe des débits observés reste cependant muette là-dessus.
- Il y a une meilleure sensibilité du modèle aux événements pluvieux mêmes les plus faibles par rapport aux débits observés.

Tableau 21 : Critère de Nash au calage

Date	1997	1998	1999	1997-1999
Nash	0,61	0,79	0,86	0,76
Erreur relative (%)	0,1	3,4	0,5	2,2
Corrélation (%)	0,79	89,2	93,8	88,3

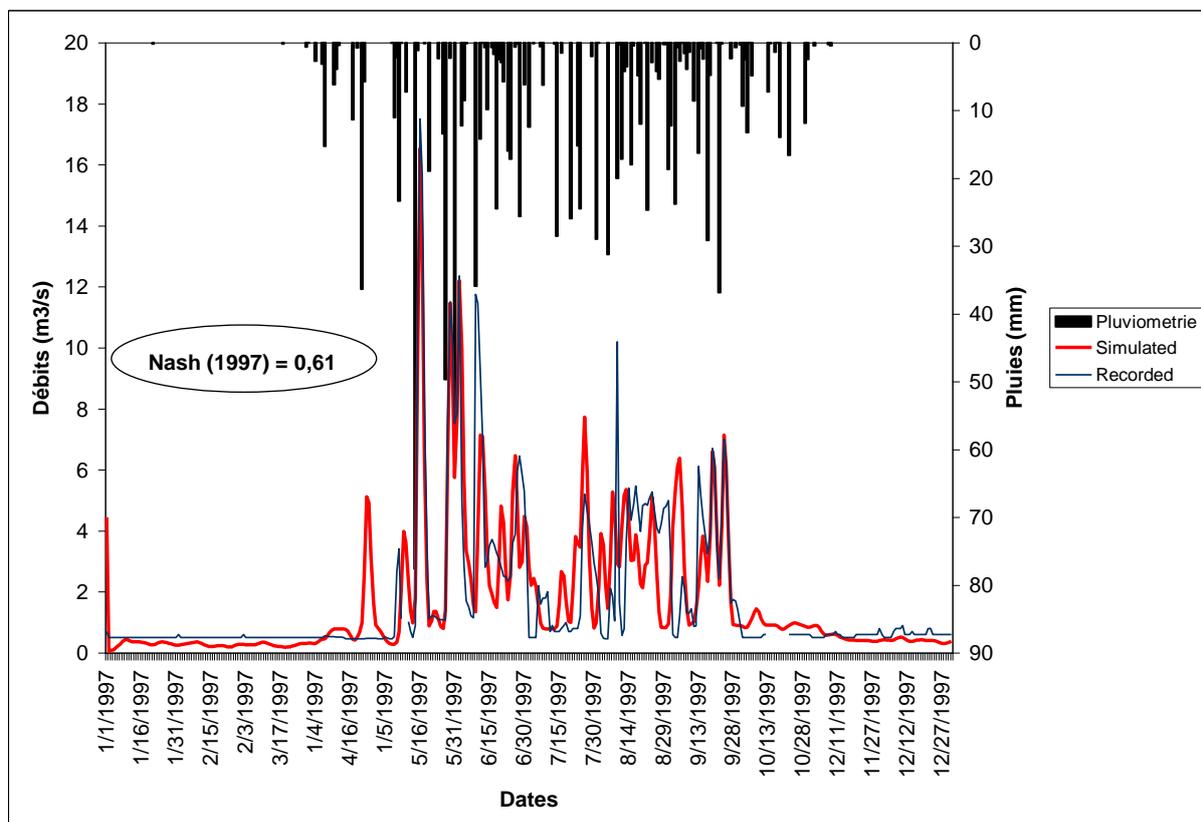


Figure 34 : Comparaison des débits simulés et observés 1997

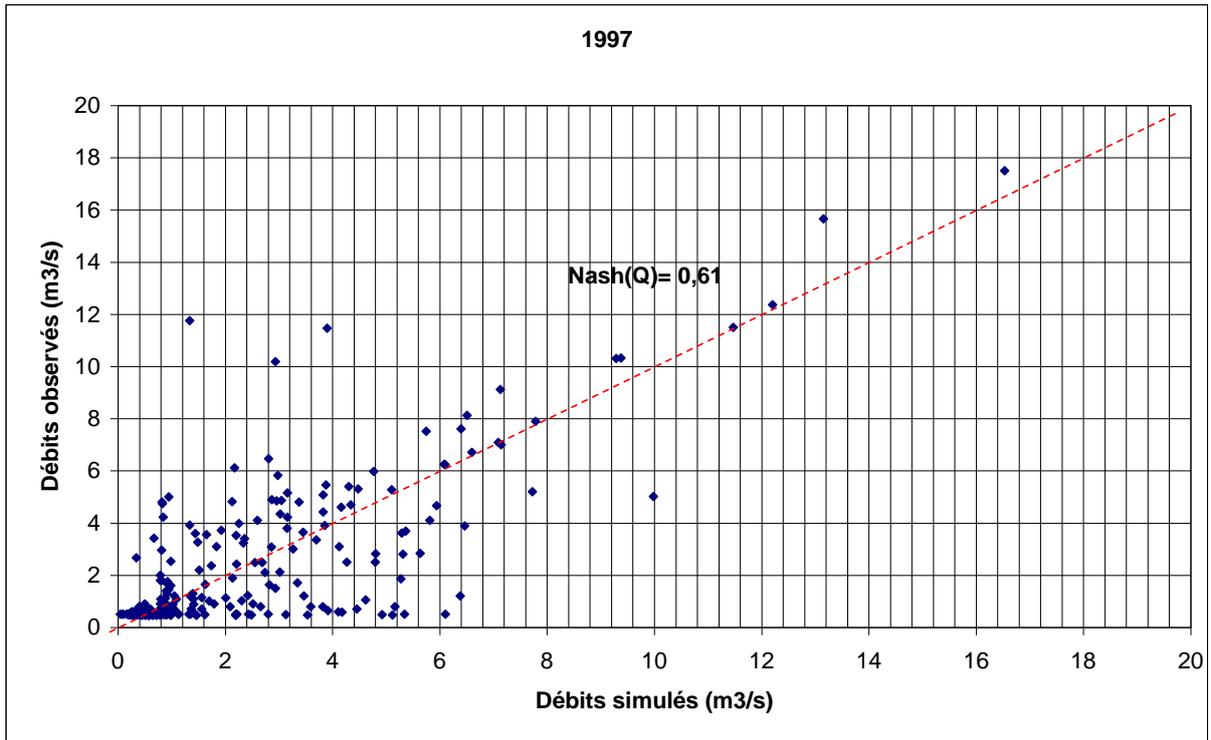


Figure 35 : Comparaison des débits simulés et observés 1997

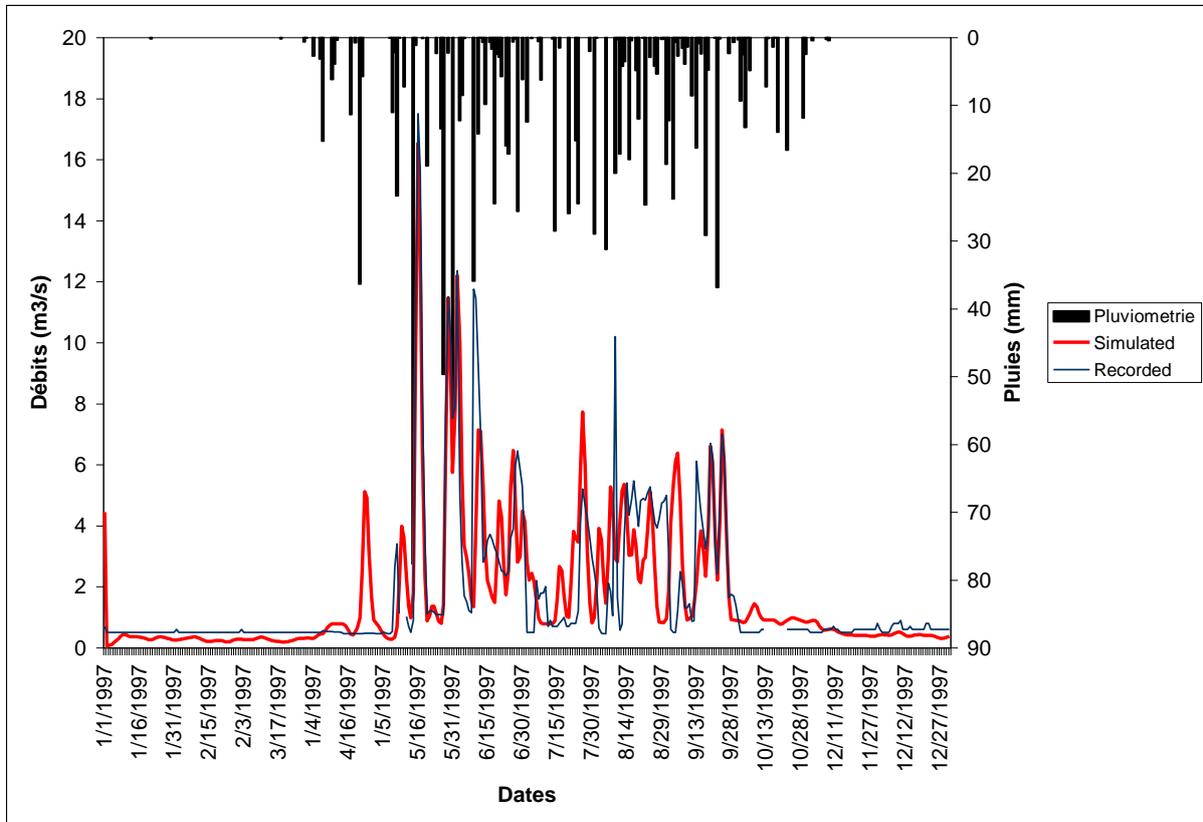


Figure 35 : Comparaison des débits simulés et observés 1998

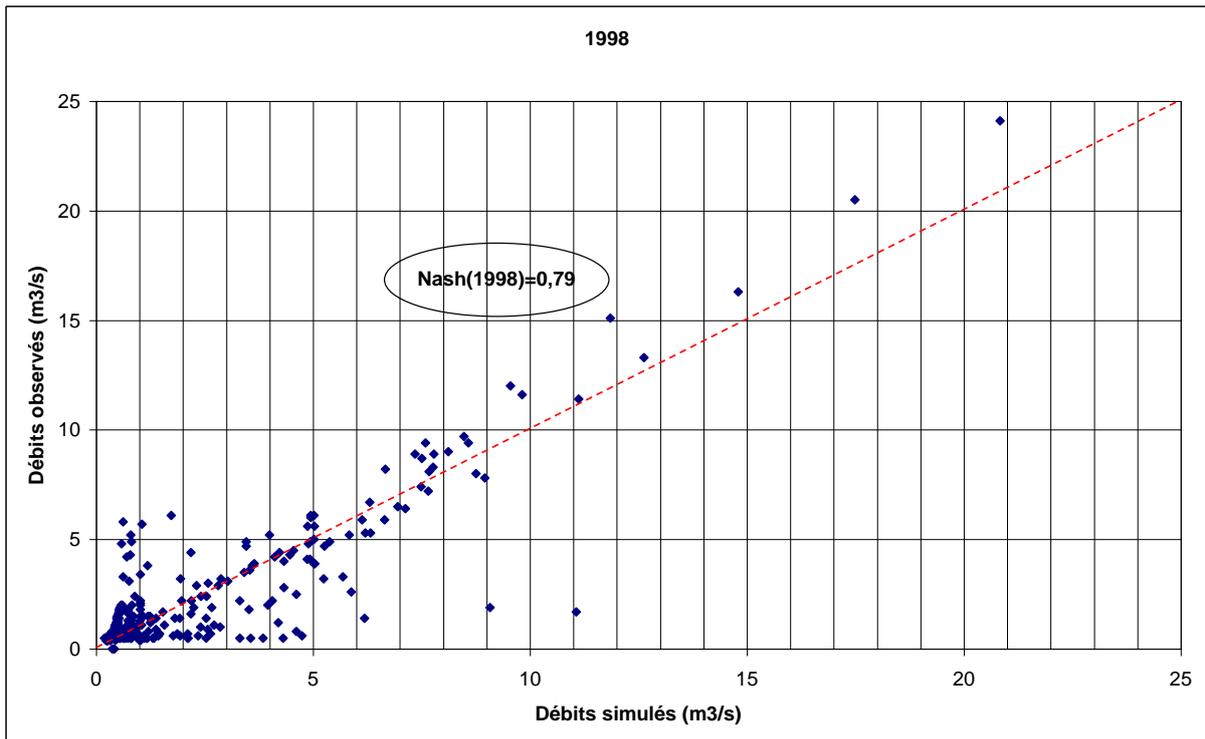


Figure 36 : Comparaison des débits simulés et observés 1998

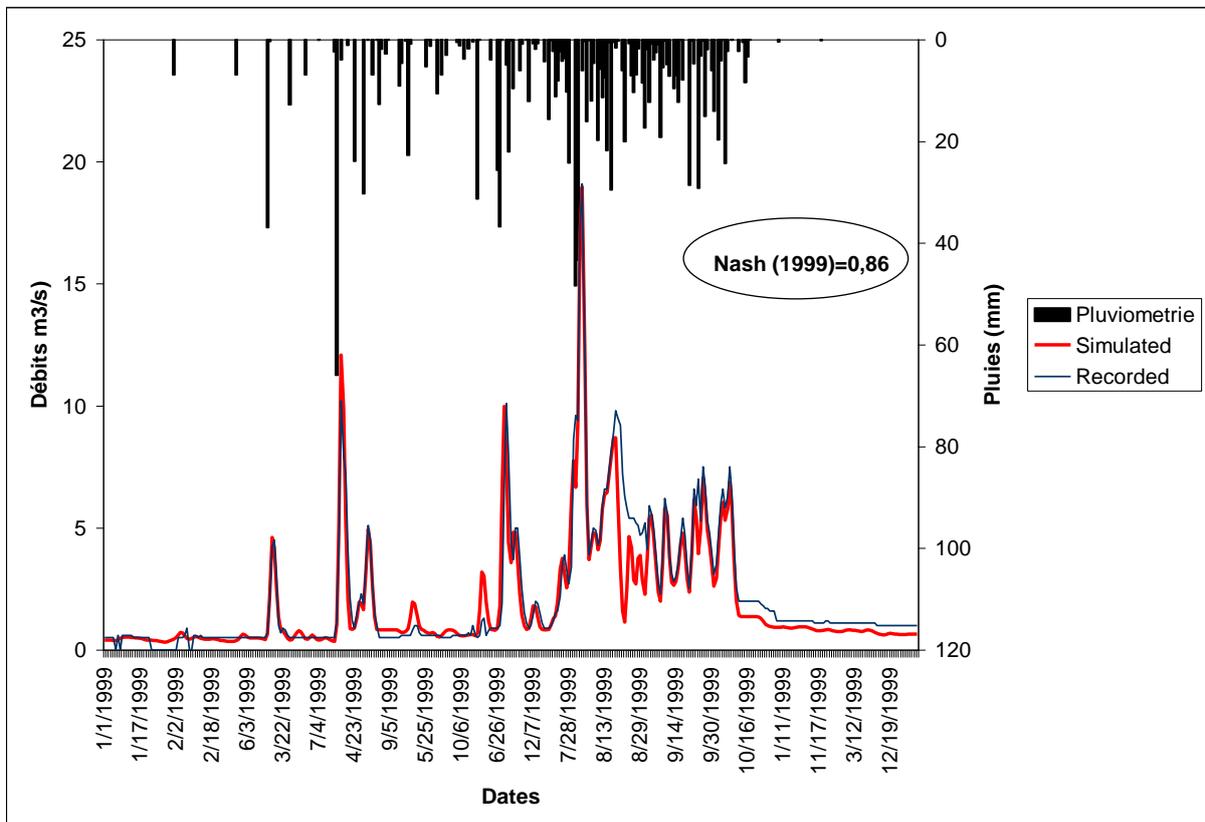


Figure 37 : Comparaison des débits simulés et observés 1999

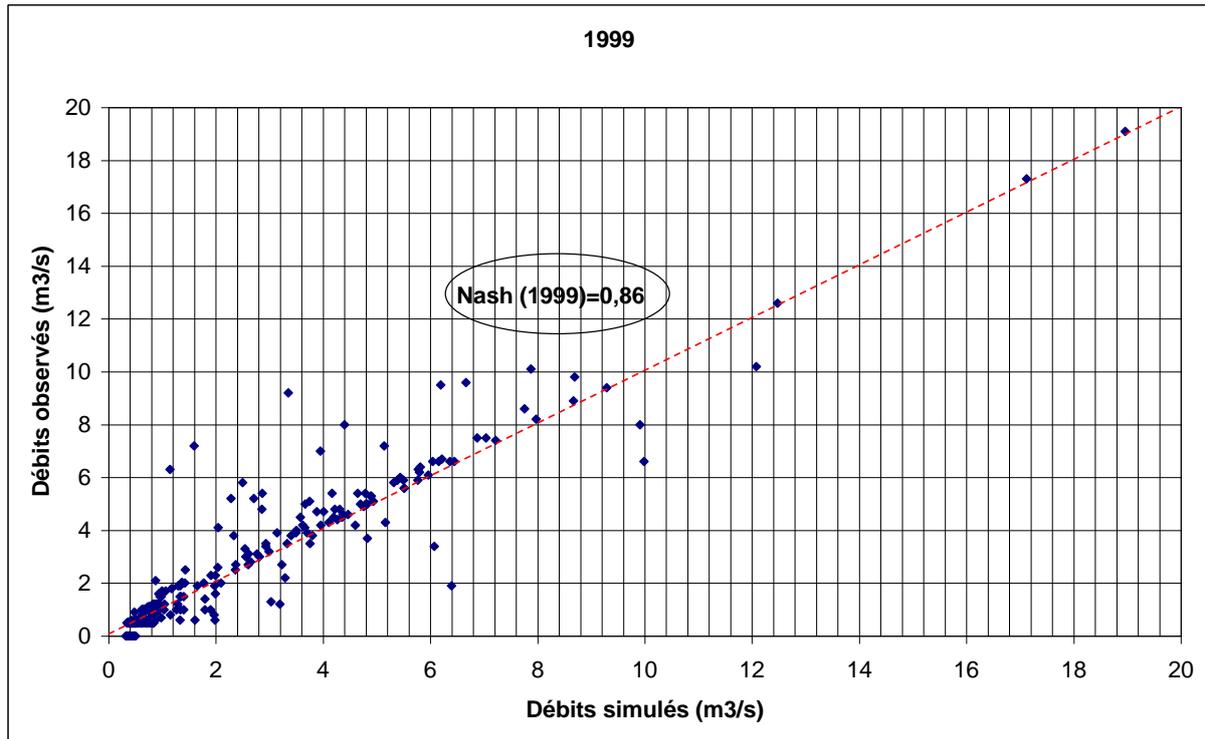


Figure 38 : Comparaison des débits simulés et observés 1999

IV.3.3. Analyse des résultats de la validation

La calibration ou calage a consisté en gros, à partir de la pluviométrie et de l'évapotranspiration pour déterminer les paramètres du modèle. La validation sera l'opération inverse permettant d'évaluer la performance du modèle (muni des paramètres déterminés en calibration) à décrire fidèlement le processus hydrologique au sein du bassin versant. Pour ce faire, on fait tourner le modèle pour une période autre que celle ayant servi à la calibration et on compare les résultats ainsi obtenus aux résultats mesurés. Nous analysons là aussi la restitution des volumes d'eau écoulés et des débits avec les mêmes moyens qu'au calage (**tableau 22 et figures 39 à 44**).

Le critère de Nash que nous trouvons est de 0,6 pour chaque année du calage prise individuellement ou pour l'ensemble des trois années. Cela confirme le fait que modèle restitue de façon acceptable les débits. Les débits maximums et moyens sont là aussi minorés par rapport aux observations. L'observation est valable pour les débits minimums également. Le biais est assez net pour 2001 et 2000.

Bilan en eau et étude comparative des écoulements du bassin versant du Kou
MODELISATION

L'erreur sur le volume est pour chaque année prise individuellement ou pour l'ensemble de la période de calage, très élevée car dépassant même les 10 %. Cela est à imputer à la qualité des données de cette période.

Il y a une bonne synchronisation entre débits simulés et observés en particulier pour les débits maximums.

On observe là aussi une bonne sensibilité aux événements pluvieux.

Tableau 22 : Critère de Nash et erreur relative sur le volume en validation

Date	2000	2001	2002	2000-2002
Nash	0,66	0,63	0,56	0,61
Erreur relative (%)	13,0	24,0	11,0	2,2

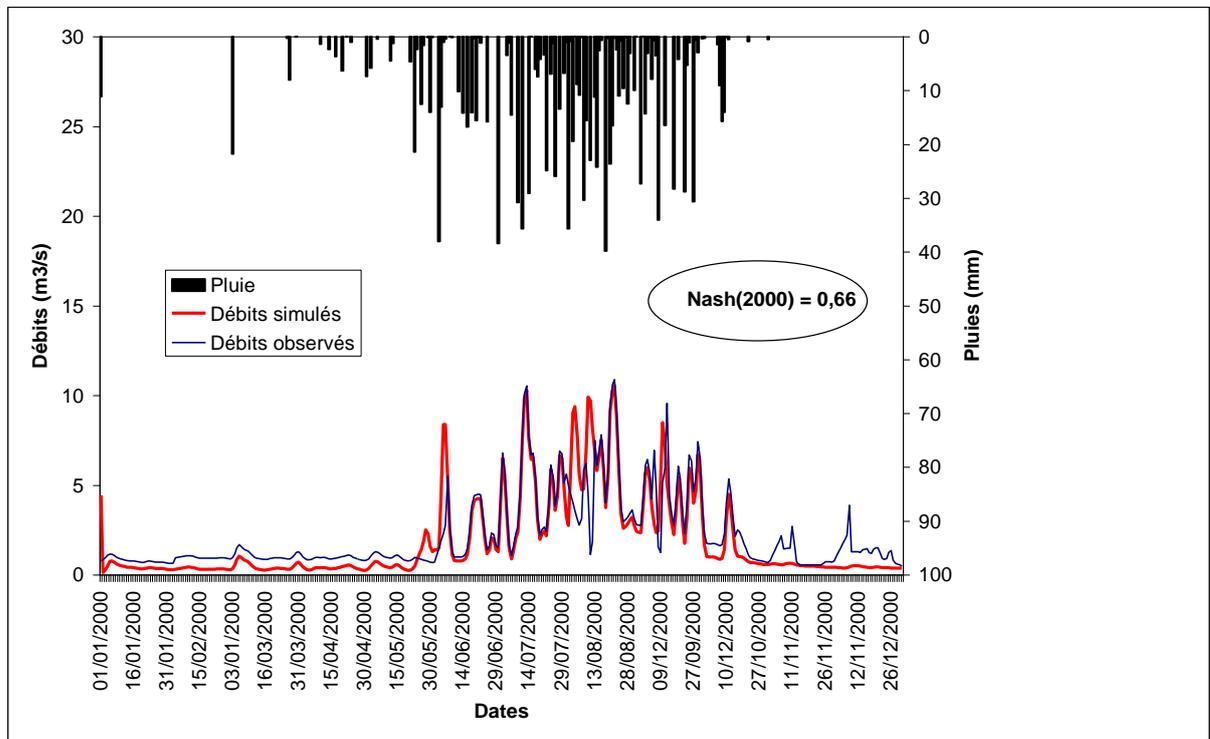


Figure 39 : Comparaison des débits simulés et observés 2000

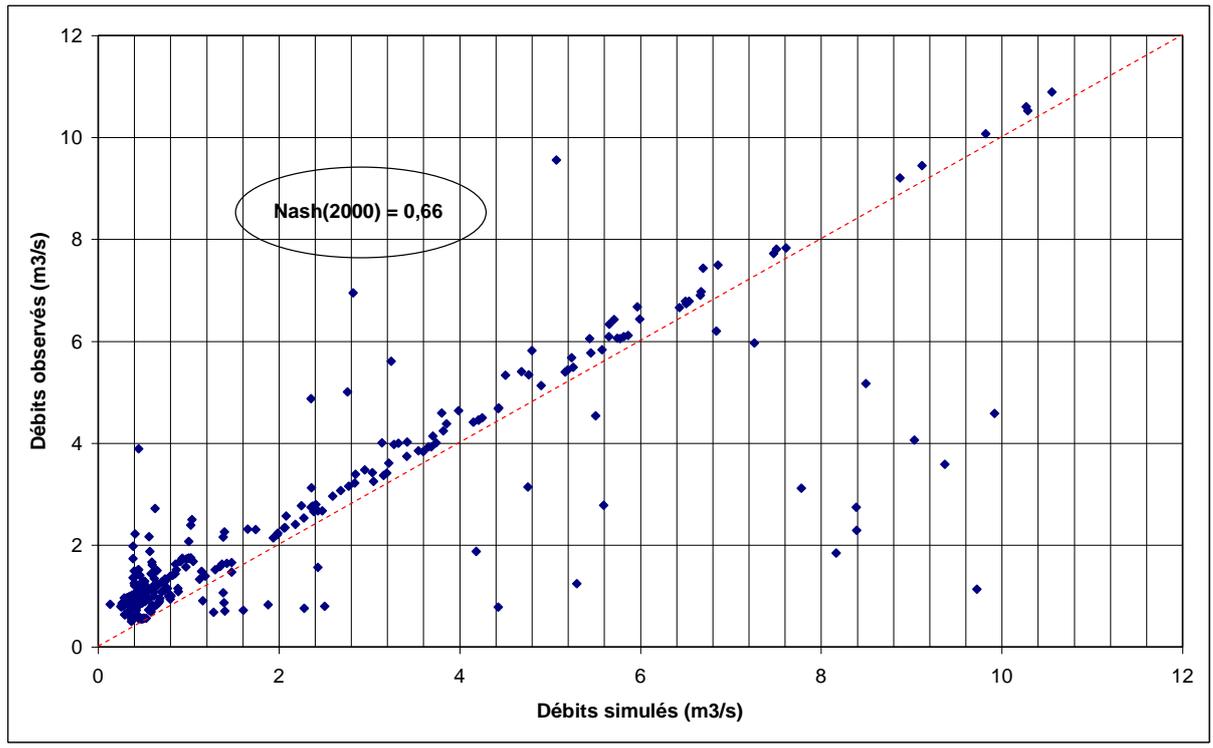


Figure 40 : Comparaison des débits simulés et observés 2000

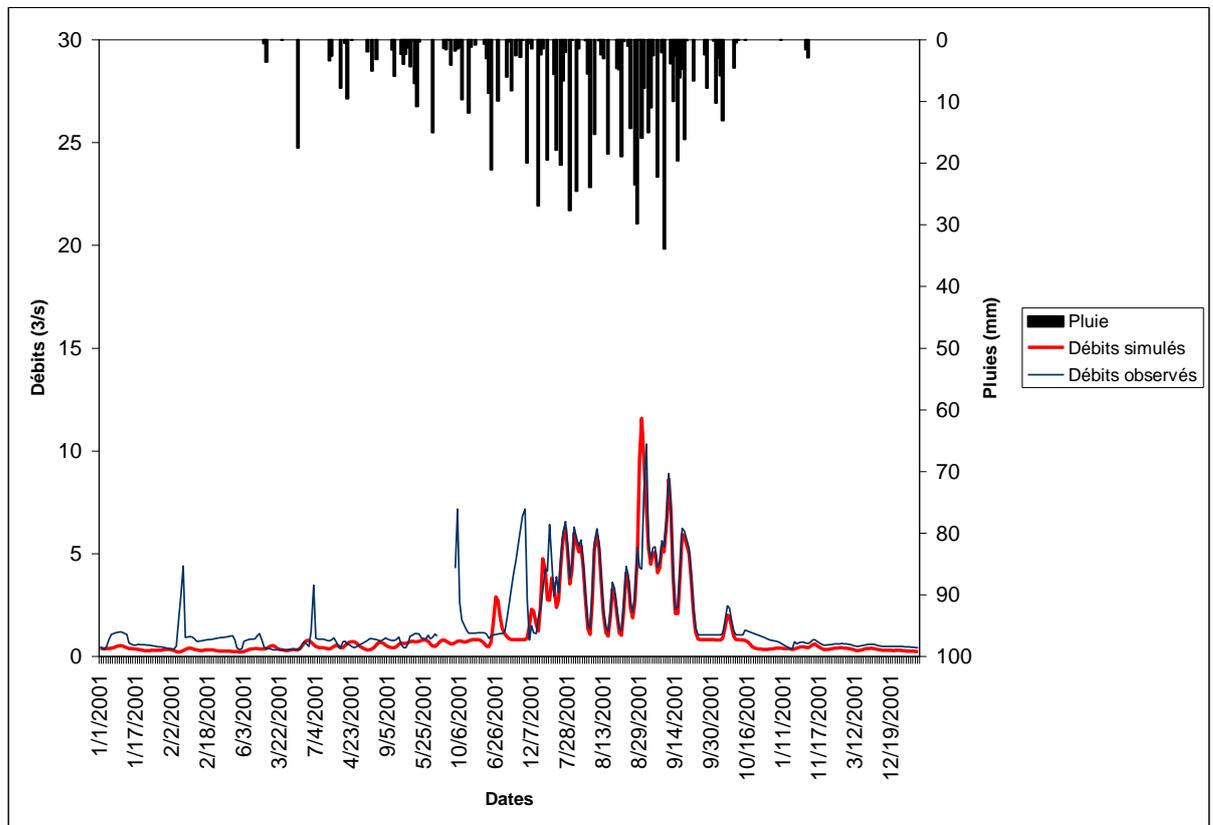


Figure 41 : Comparaison des débits simulés et observés 2001

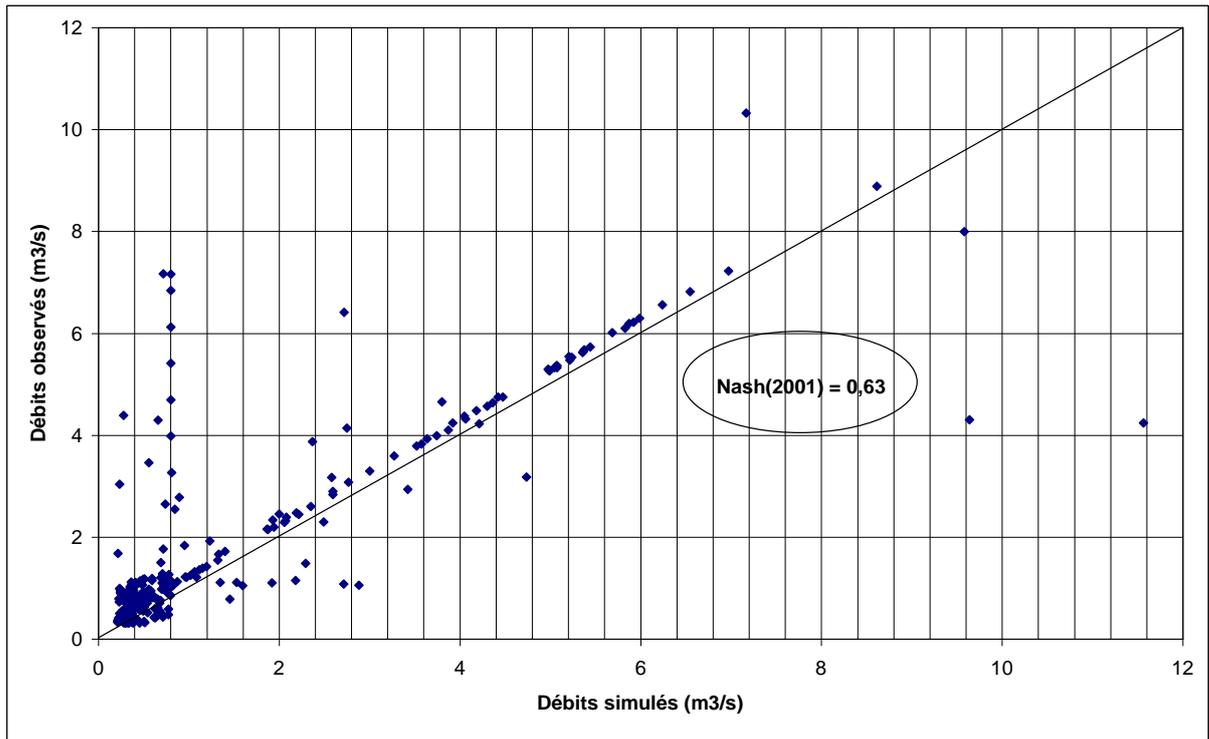


Figure 42 : Comparaison des débits simulés et observés 2001

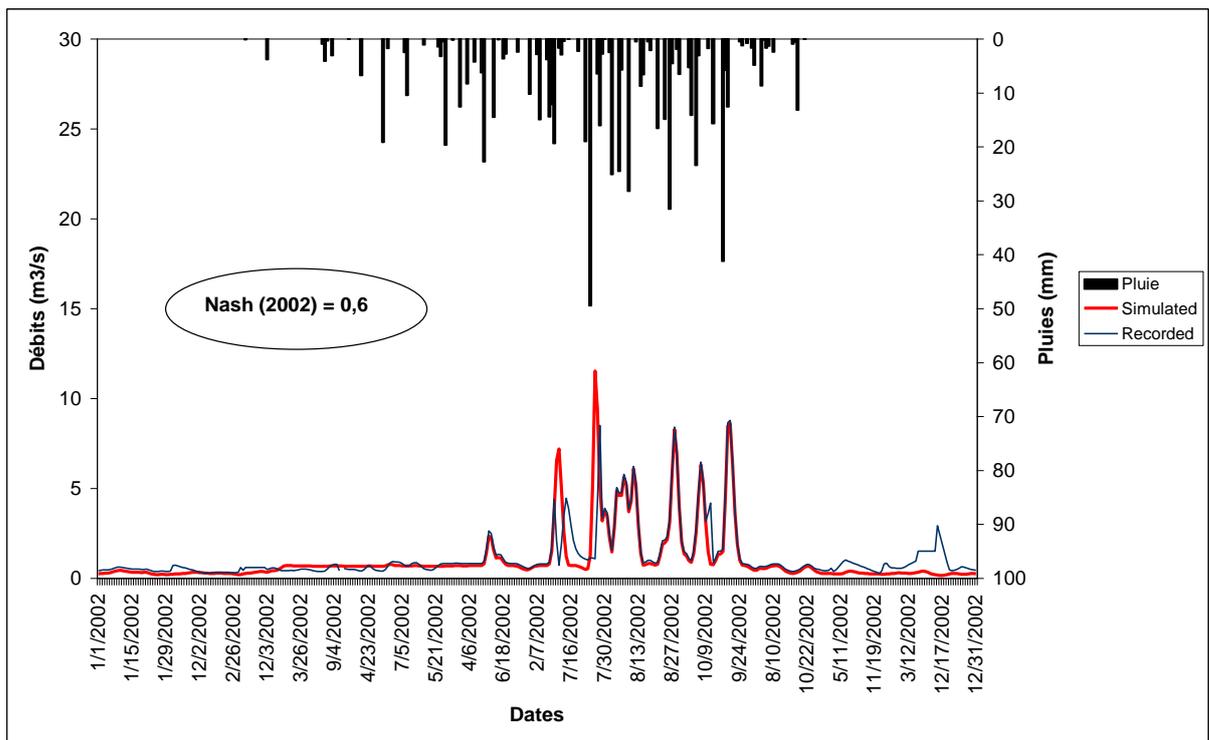


Figure 43 : Comparaison des débits simulés et observés 2002

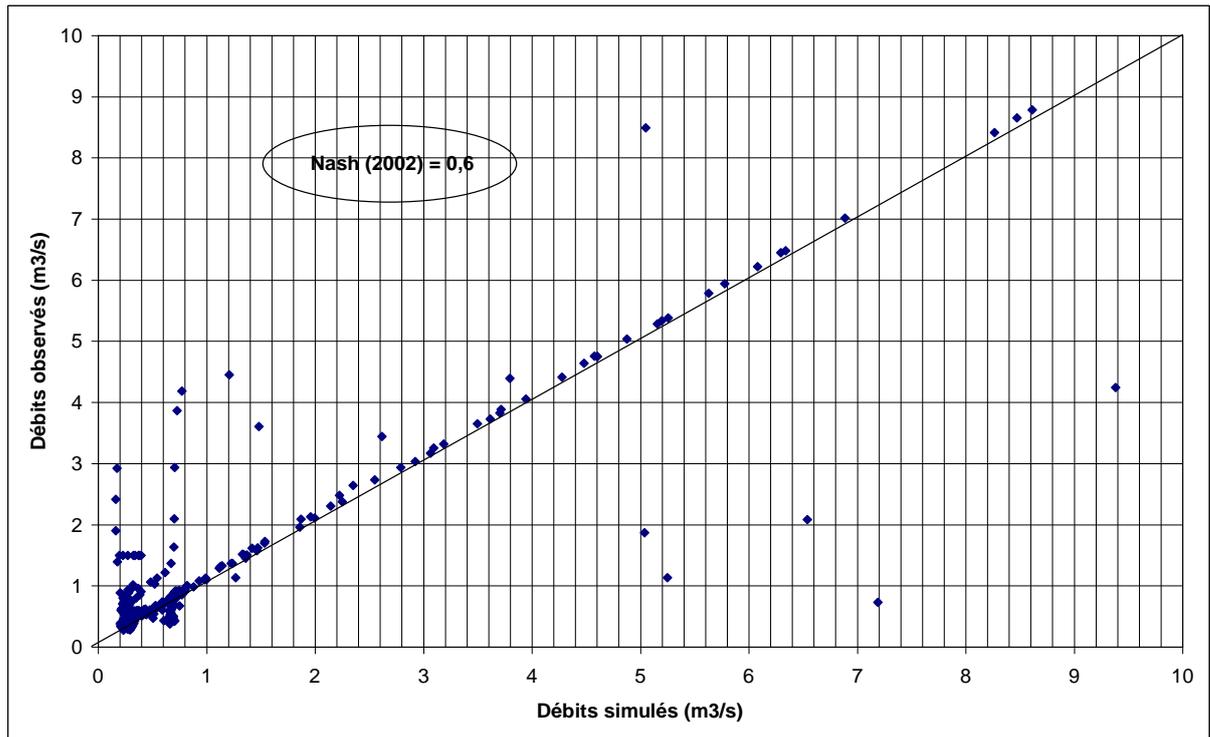


Figure 44 : Comparaison des débits simulés et observés 2002

IV.3.4. Reconstitution des données hydrométriques manquantes à l'aide du modèle

La simulation consiste à mettre en œuvre le modèle calé précédemment, pour déterminer les débits correspondants à des périodes sans observation hydrométrique ou dont les données contiennent des lacunes.

Nous retenons comme période de simulation, la période comprise entre 1986 et 2003 qui correspond à celle dont les observations des trois stations pluviométriques utilisées plus haut sont disponibles.

A l'analyse des résultats, nous faisons le constat suivant :

D'une manière générale les variations des débits suivent les saisons météorologiques. Pendant la saison des pluies le débit augmente et atteint son maximum en août (5,3m³/s). Les débits baissent rapidement à partir d'octobre et continuerons ensuite à baisser graduellement de novembre à juin. Le débit d'étiage moyen (correspondant à la période de décembre à mai) est de l'ordre de 0,7m³/s. La **figure 45** illustre la variation inter-saisonnière du débit moyen.

Le débit moyen annuel calculé pour la période de 1984 à 2003 est de 1,7m³/s. le volume écoulé correspondant s'élève à 53,6 million de m³. On obtient ainsi un coefficient d'écoulement de 5,3%.

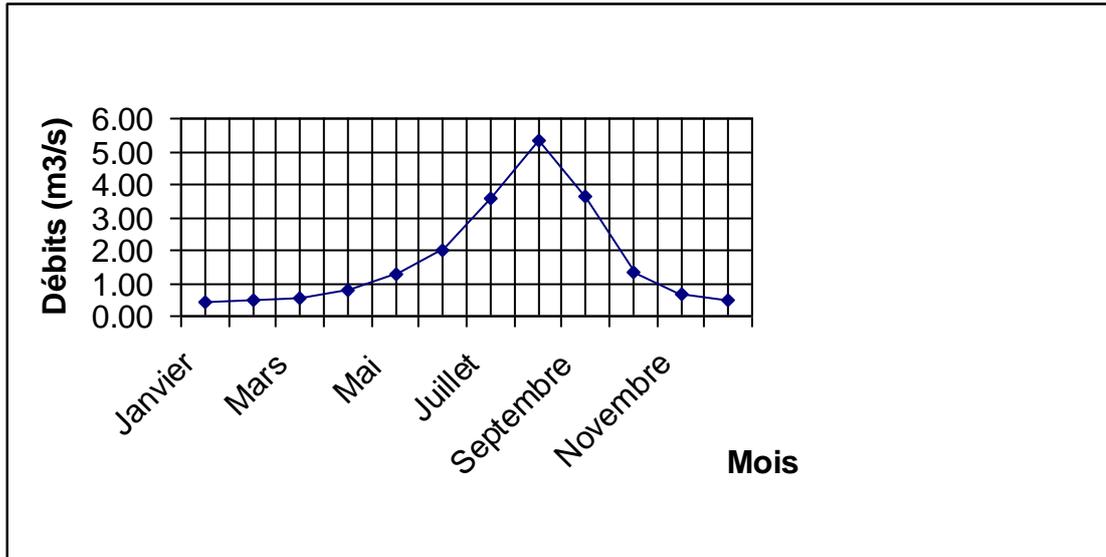


Figure 45 : Variation saisonnière du débit du Kou

Pour analyser les variations interannuelles des débits nous avons appliqué la méthode de la moyenne mobile au débit d'étiage c'est-à-dire de décembre à mai. L'analyse des débits annuels (**figure 46**) ne permet pas en effet, de conclure sur l'évolution des débits ; car des années où les débits paraissent élevés, il peut y avoir des mois sans écoulement en fait, compensés par des mois pluvieux.

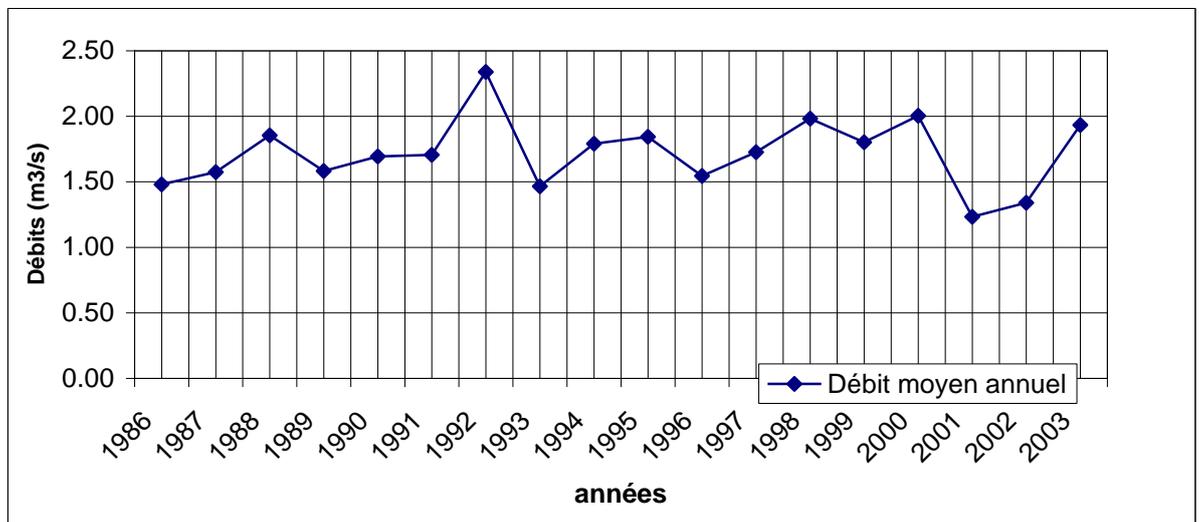


Figure 46 : Variabilité du débit moyen annuel

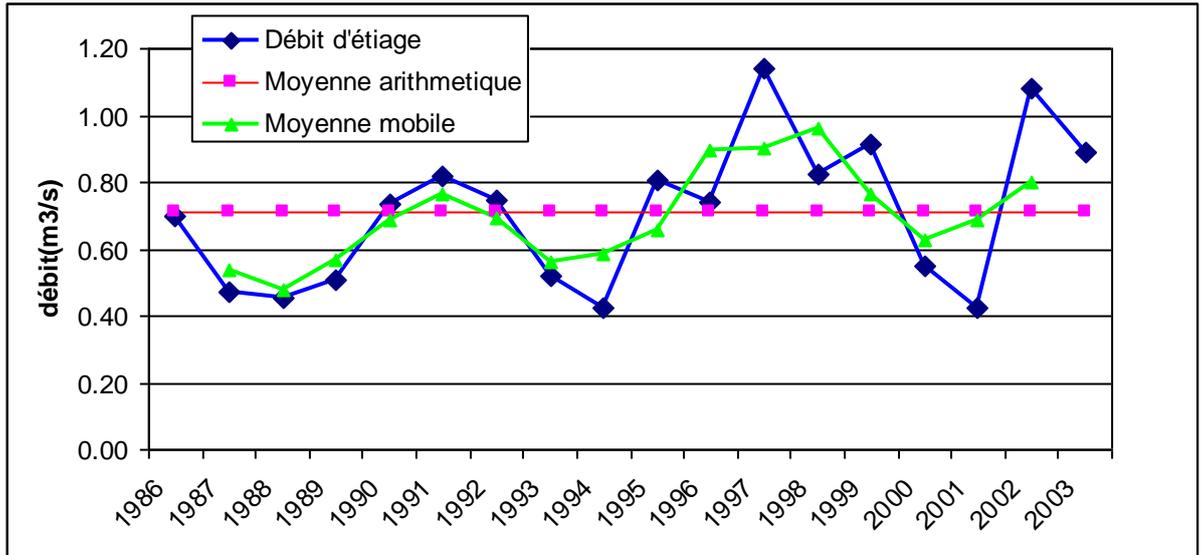


Figure 47: Application de la moyenne mobile aux débits simulés

A l'issue du test de la moyenne mobile, le constat est qu'on ne décèle pas de tendance. Cela est normal car le débit est fonction de la pluviométrie qui elle-même ne connaît pas de tendance comme nous l'avons vu plus loin.

IV.3.5. Conclusion

HYSIM est un modèle prolifique en paramètres, ce qui a rendu le calage très laborieux. La multiplicité des paramètres peut également conduire à des solutions locales. Un autre fait déplorable, c'est la petitesse de la chronique utilisée ; Il faut également citer le fait que la station hydrométrique dont les données ont été utilisées n'est pas celle qui est le plus à l'aval du bassin versant ; Cela est de nature à biaiser le résultat obtenu. Cependant la mise en oeuvre de HYSIM sur le bassin du Kou a donné des bons résultats. On peut donc l'employer pour simuler les débits et compléter les données nécessaires au calcul du bilan hydrologique.

V. BILAN EN EAU DU BASSIN

V.1. APPROCHE METHODOLOGIQUE

Faire un bilan hydrique à l'échelle d'un objet revient toujours à considérer que la loi de conservation de la masse est satisfaite pour la période retenue.

Le bilan hydrologique que l'on peut comparer à une simple opération comptable, vise à établir le budget entre les entrées et les sorties en eau d'une unité hydrologique définie pendant une période de temps donné.

Dans sa formulation la plus générale, il s'écrit:

$$P = Q + ETR + \Delta R(u + h)$$

Tout ce qui tombe (P) dans un espace hydrologique et dans un laps de temps donné soit s'écoule (Q), soit repart dans l'atmosphère par évapotranspiration (ETR), soit participe à la recharge des réserves en eau du sol (Ru) ou du sous-sol (Rh). Les variations de réserve peuvent être également négatives et contribuer aux écoulements et/ou à l'évapotranspiration.

La méthodologie ci-dessous développée, consistera à déterminer tous les termes du bilan hydrologique et à poser l'équation du bilan. On prendra le cas d'une année moyenne, d'une année décennale sèche et d'une année décennale humide.

V.2. LES DIFFERENTS TERMES DU BILAN

V.2.1. Les apports pluviométriques

La pluviométrie annuelle moyenne sur le bassin versant a été déterminée dans la première partie. De même une analyse fréquentielle en a été faite. Cela a révélé l'extrême variabilité interannuelle de la pluie. C'est pour cette raison que dans cette évaluation des apports, nous prenons le cas d'une pluie en année moyenne (1996), en année décennale sèche (2001) et en année décennale humide (1998). La surface étant de 989 km², nous en déduisons les volumes des apports pluviométriques correspondant aux années retenues pour l'étude du bilan. Les résultats sont consignés au tableau.

Tableau 23 : Volumes des apports pluviométrique pour des cas de pluies en année moyenne, décennale sèche et décennale humide

	Année moyenne	Année décennale sèche	Année décennale humide
Année correspondante	1996	2001	1998
Hauteur (mm)	929,9	788,8	1157,9
Volume apports (m3)	919 671 800	780 123 200	1 145 163 100

V.2.2. Les écoulements

Les débits correspondant à la période de 1984 à 2003 ont été simulés avec le modèle HYSIM ; Ils sont catalogués en **annexe IV**. Nous notons au **tableau 24** les lames écoulées, les débits moyens et les volumes écoulés correspondant aux années du bilan.

Tableau 24 : Volumes écoulés correspondant à des exemples de pluies moyenne décennale sèche et humide

	Année moyenne	Année décennale sèche	Année décennale humide
Année correspondante	1996	2001	1998
Lame écoulee (mm)	47,8	30,1	62
Débit moyen annuel (m3/s)	1,501	1,233	1,952
Volume écoulé (m3)	47 274 200	29 768 900	61 318 000
Coefficient d'écoulement (%)	5,1	5,0	5,4

On note un très faible coefficient d'écoulement, quelque soit le quantile considéré. A titre de comparaison, l'étude IWACO (1989) citée par BERTHIAUD (2001) a trouvé un coefficient d'écoulement de 5,2% pour la période de 1974 à 1985.

V.2.3. L'évapotranspiration réelle

L'évapotranspiration réelle (ETR) est l'une des variables de sortie du modèle. Nous présentons dans le **tableau 25** suivant les valeurs correspondant à l'ETR des années du Bilan.

Tableau 25: Valeurs de l'ETR de 1996, 2001 et 1998

	Année moyenne	Année décennale sèche	Année décennale humide
Année correspondante	1996	2001	1998
Evapotranspiration réelle (mm)	624,7	660,5	629,8

L'ETR reste au même niveau quelque soit l'issue de la saison des pluies. Elle est cependant plus accentuée en année sèche à cause de la faible teneur en eau de l'air.

V.2.4. La variation du stock des différents réservoirs

Le modèle sort également l'état des différents réservoirs au pas de temps journalier. On peut donc calculer la variation du contenu de chaque réservoir et de là, la variation de stock totale au cours d'une période (**tableau 26**).

Tableau 26 : Variation du stock au cours d'une année moyenne, une année décennale sèche et décennale humide

	Année moyenne	Année décennale sèche	Année décennale humide
Année correspondante	1996	2001	1998
Neige	0,0	0,0	0,0
Interception	0,0	0,0	0,0
Horizon superficiel	-68,9	-185,9	45,2
Horizon inférieur	-2,2	-4,5	13,0
Nappe intermédiaire	0,0	0,0	0,0
Nappe souterraine	-22,3	-22,3	-21,7
Chenaux mineurs	0,0	0,0	0,1
Variation du stock totale (mm)	-93,1	-212,68	+36,56

On constate une variation de stock ($Stock_{final} - Stock_{initial}$) négative en année moyenne et en année sèche. Les deux premières couches du sol perdent leurs eaux au profit de la

demande évaporative. De même, elles sont mises à contribution ainsi que la nappe souterraine, pour renflouer la rivière. En année humide les horizons superficiel et inférieur du sol sont réalimentés.

V.2.5. Bilan en eau du bassin versant

Le **tableau 27** suivant présente le bilan.

Tableau 27: Bilan en eau du bassin versant du Kou

	Année moyenne	Année décennale sèche	Année décennale humide
Année correspondante	1996	2001	1998
Pluie (mm)	929,9	788,8	1157,9
Pluie efficace (mm)	557,9	473,3	694,7
Lame écoulée (mm)	47,8	30,1	62
Evapotranspiration réelle (mm)	624,7	660,5	629,8
Variation du stock (mm)	- 93,1	- 212,68	+ 36,56
Fermeture (mm)	-21,5	-4,6	39,5

La fermeture du bilan n'est pas nulle. Mais les écarts sont faibles et acceptables d'autant plus qu'ils sont imputables aux erreurs et incertitudes dans la détermination des différents termes du bilan. Pour obtenir la fermeture du bilan nous avons du considérer, la pluie efficace plutôt que la pluie réellement observée dans l'équation du bilan. En calculant le bilan avec la pluie observée obtenons les écarts suivants : 350,1 mm pour 1996 ; 310,8 mm pour 2001 et 399,3 mm pour 1998. La pluie efficace est déterminée en multipliant la pluie observée par le coefficient de correction de la pluviométrie, déterminé dans l'étape de calage du modèle. Ce coefficient a normalement pour but de corriger les erreurs d'évaluation sur la pluviométrie, mais la valeur de 0,6 nous paraît exagérée pour de simples erreurs d'estimation. La raison de la faiblesse de ce coefficient est à rechercher ailleurs dans les divers prélèvements effectués et dans les stockages en surface non pris en compte par le modèle. Pour étayer cette affirmation nous allons estimer les stockages en surface et les principales utilisations de l'eau.

V.3. LES UTILISATIONS D'EAU

Les principaux utilisateurs de l'eau sont :

- L'adduction d'eau potable de la ville de Bobo-Dioulasso ;
- Les périmètres irrigués formels et informels ;
- L'élevage et les autres

V.3.1. L'AEP de Bobo-Dioulasso

L'alimentation en eau potable de Bobo-Dioulasso la deuxième ville du Burkina Faso, est assurée principalement par l'ONEA à partir des installations de captage des sources de Nasso. Les sources de Nasso sont comme nous l'avons vu parmi les principales ressources d'alimentation des écoulements du Kou. Il est de ce fait important de quantifier l'ampleur de ce prélèvement.

La population de la ville de Bobo-Dioulasso a été estimée en à 600000 habitants en 2003 avec un taux d'accroissement de 4,3. Actuellement cette Population serait alors de 700000 habitants. Pour avoir une idée de la demande induite par cette population nous lui appliquons une consommation spécifique moyenne de 40 l/jour/habitant (D. ZOUNGRANA, 2003). La demande journalière serait de ce fait, de 28 000 m³.

V.3.2. Le périmètre rizicole

Le périmètre irrigué de la vallée du Kou est situé au nord-ouest de la ville de Bobo-Dioulasso dans la commune de Bama. Il a été réalisé dans le cadre de la coopération entre le Burkina Faso (Haute Volta à l'époque) et la République de Chine Taiwan.

Le périmètre couvre une superficie de 1250 ha dont 1021 ha sont effectivement susceptibles d'être mis en valeur. Il est alimenté en eau à partir d'une prise réalisée sur la rivière Kou à Diaradougou. Le canal d'aménagé de forme trapézoïdale, en béton, a une longueur de 11 km et a été dimensionné pour un débit maximum de 3,5 m³/s. A l'étiage tout le débit du Kou est dérivé vers le périmètre irrigué.

Le périmètre est exclusivement consacré à la production de riz conformément à son objectif d'origine qui est de pourvoir à la demande en riz.

On note l'existence de deux campagnes de production par an :

- la campagne hivernale et,
- la campagne de saison sèche de janvier à mai et pendant laquelle l'alimentation en eau des cultures est assurée par irrigation.

Nous avons estimés les consommations en eau du périmètre rizicole à 20 000 m³/ha, d'où une demande totale de 40,840 millions de mètres cubes. Les hypothèses et les détails de calcul sont consignés en **annexe V**.

V.3.3. L'irrigation informelle

L'irrigation informelle est représentée par les exploitations agricoles installées spontanément çà et là dans la vallée du Kou et en particulier le long du canal d'amener du périmètre rizicole du Kou.

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 :

en amont de la prise de Diaradougou : 170 ha ;

à l'aval de Diaradougou : 200 ha dont 100 ha appartiennent à l'IRFA, l'ORD, et l'INERA.

Les cultures pratiquées sur ces terres sont généralement des cultures maraîchères. On note également la présence de plantations de bananiers et de papayers d'ailleurs en nette expansion.

En estimant les besoins en eau des cultures maraîchères à 8700 m³/ha (Hypothèses et détails des calculs en **annexe VI**), la demande en eau de l'irrigation informelle pourra être estimée à 2 349 000 m³.

V.3.4. Les utilisateurs pastoraux

L'élevage est comme nous l'avons vu, la deuxième activité économique de la région des hauts bassins.

On notera dans un premier temps, l'élevage pratiqué par les populations résidentes à titre d'activité secondaire, utilisant les sous produits de l'agriculture et apportant juste, un supplément de revenu. Les effectifs impliqués sont alors modestes et de moindre conséquence sur la demande globale en eau du bassin du Kou.

Les plus grands effectifs d'animaux rencontrés dans la vallée, appartiennent aux pasteurs transhumants des régions moins favorisées par la pluviométrie du Burkina Faso. Ces derniers fréquentent la vallée en particulier pendant la saison sèche, quand les ressources en eau et en pâturage se sont épuisées dans leur région d'origine. Le cheptel est constitué majoritairement de bovins et dans une moindre mesure de caprins et ovins.

On note également la présence d'un élevage semi intensif pratiqué par des groupements d'éleveurs ou par des particuliers.

Les éleveurs ont une préférence pour les eaux de surface car cela implique pour eux moins d'effort. Ils seront orientés plus vers l'exploitation des mares et des rivières.

Le rapport d'IWACO (1999) sur le pastoralisme donne les effectifs suivants :

Tableau 28 : Composition du cheptel de la zone pastorale de Bobo-Dioulasso

	Bovins	Ovins	Caprins	Asins
Bobo-Dioulasso	7587	1170	577	3106

Source : « *le pastoralisme dans les zones de Bobo-Dioulasso-Samorogouan-Barani-Djibasso.* », Adama Deme).

Bilan en eau et étude comparative des écoulements du bassin versant du Kou
BILAN EN EAU DU BASSIN

Nous retenons les consommations spécifiques (D. ZOUNGRANA, 2003) indiquées au tableau et cela donne la demande pastorale correspondante.

Tableau 29: Consommation en eau du cheptel

Espèce	Bovins	Ovins	Caprins	Asins	total
Effectif	7587	1170	577	3106	-
Consommation Spécifique (l/j/individu)	40	15	15	20	-
Consommation annuelle (m ³)	110 770	32028	3159	22674	168 631

V.3.5. Retentions en surfaces et recharge de la nappe

Les retentions en surface concernent les retentions dans les mares lacs et autres dépressions. Le cas le plus représentatif est la mare de Bama qui stocke un million de m³ (HURE, 1998), ce qui équivaut à 1mm (infime).

Par contre les recharges de la nappe représentent un volume plus significatif. Dans l'état des lieux des ressources en eau au Burkina Faso (GIRE, 2001) on les estime à 16 % de la pluie tombée par an. Cela correspond respectivement à 148,8 mm pour 1996, 126,2 mm pour 2001 et 185,3 pour 1998.

V.3.6. Synthèse des utilisations d'eau

Le **tableau 29** suivant résume les consommations en eau de la vallée du Kou.

Tableau 30: Consommation d'eau du bassin versant du Kou

	Unité	Quantité (Volume m ³)
AEP Bobo-Dioulasso	m ³ /s	28 000
Demande pastorale	m ³	168 631
Périmètre rizicole	m ³ /s	40 840 000
Périmètre informel	m ³ /s	2 349 000
Total en m ³		43 385 631
Total en mm (par rapport à la superficie du bassin versant)		43,9
Année	1996	1998
Recharge nappe (mm)	148,8	126,2
		2001
		185,3

V.4. CONCLUSION

Nous avons calculé le bilan pour une année moyenne, une année décennale sèche, et une année décennale humide. Nous sommes arrivés à des fermetures non nulles que l'on a expliqué par les erreurs accumulées dans la détermination des termes du bilan annuel. Nous avons ensuite essayé d'expliquer le rabatement de 40 % qu'implique le coefficient de correction de la pluviométrie déterminé au Calage du modèle en recherchant du côté des prélèvements d'eau effectués sur le bassin versant, en amont de l'exutoire de Badara. Nous avons pour cela effectué une évaluation grossière de ces évaluations. Les quantités trouvées sont loin d'expliquer cette différence entre pluie efficace et pluie mesurée. La question de la compréhension de la signification reste encore d'actualité à la sortie de chapitre sur le bilan.

VI. CONCLUSION GENERALE

La première tâche que nous nous sommes donnée dans le cadre de cette étude, c'est la constitution d'une base de données hydrométriques et pluviométriques assainies. Si on peut juger, la disponibilité et la qualité des données pluviométriques de satisfaisant, on ne peut pas en dire autant des données hydrométriques. Le réseau hydrométrique est en effet de très qualité mauvaise qualité. Cela rend impossible toute étude hydrologique rigoureuse sur la base des seules données disponibles. D'où la nécessité de faire recours à d'autres moyens et en l'occurrence à la modélisation.

Nous avons ensuite essayé de mettre en œuvre un modèle hydrologique de type pluies-debit (HYSIM) sur le bassin versant. Malgré l'insuffisance de données de qualité et les limitations de la version du modèle dont nous disposons, nous sommes parvenus à de résultats satisfaisants. L'utilisation du modèle nous a ensuite permis de reconstituer une chronique de débits de vingt ans, de 1984 à 2003, nous donnant ainsi des éléments d'analyse de notre bilan en eau.

Le bilan a été calculé pour une année moyenne, une année décennale sèche et une année décennale humide. On constate que 40% de la pluie qui tombe ne participe pas aux activités hydrologiques proprement dites. Une évaluation des différentes utilisations a confirmé ce fait.

D'autre part cette étude a révélé les difficultés qu'il y a à obtenir de données fiables avec un réseau d'observations hydrométriques du type traditionnel à cause des problèmes de gestion qu'il implique : moyen financier, section de contrôle en perpétuel changement, techniques de jaugeage inadapté au régime (turbulent) des cours d'eau...La modélisation par contre permet d'avoir une chronique de débit acceptable tout en s'affranchissant des inconvénients de gestion de plusieurs stations hydrométriques. C'est là une voie à suivre pour nos pays à faible moyen et où la gestion de stations d'observation n'est pas encore évidente.

BIBLIOGRAPHIE

BERTHIAUD A, 2001. Contribution pour une évaluation des relations entre l'usage des eaux de surface et l'occupation de l'espace : Bassin du Moun-Hou supérieur. Rapport de stage , Université Paul VALÉRY Montpellier III, 117 pages+ annexes.

BICABA K, 1991. Etude hydrologique du bassin versant du Kou au confluent Niamé-Baoulé. Mémoire de fin d'études d'ingénieur du centre AGRIMETH de Niamey, 113 pages + annexes.

CHABI-GONNI B. G. F, 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.

CIEH, ORSTOM et LCT-CEMAGREF-ENAGREF, 1996. Crue et apports. Rome, 245 pages.

GAETAN M, 1985. Hydrologie générale : Principe et application.

GINESTE P et GUINAUDEAU M, Cours d'Hydrologie, tome1 : hydrométrie et Hydrologie statistiques. Polycopié EIER, Ouagadougou, 221 pages.

HURE A, Juillet 1998, Etude et modélisation du système d'eau de la vallée du Kou. Rapport de stage, ENSG de Nancy France, 151 pages.

KARAMBIRI H, 2003. Crue et érosion hydrique au Sahel : Etude et modélisation des flux d'eau et de matières sur un petit bassin versant pastoral au Nord du Burkina Faso. Thèse de doctorat, Université Paris 6, 318 pages.

LUC J. P, 2005. "Water accounting, blue and green water", IRD-IWMI-INAT, 78 pages.

MANLEY R. E and Water resource association Ltd., 2003. A guid to using HYSIM. Londres, 105 pages.

ZOUNGRANA D, EIER Ouagadougou, 2003. Cours d'Approvisionnement en eau potable. Polycopié EIER, Ouagadougou, 142 pages.

ANNEXES