

Modélisation du comportement hydrologique du bassin versant du Boubo en milieu tropical humide de la Côte d'Ivoire par l'application du modèle hydrologique distribué CEQUEAU

**Zilé Alex KOUADIO^{1*}, Koffi Eugène KOUAKOU³, Arthur Brice KONAN-WAIDHET¹,
Bi Tié Albert GOULA² et Issiaka SAVANE²**

¹ *Université Jean Lorougnon Guedé de Daloa, BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire*

² *Université Nangui Abrogoua, Laboratoire de Géosciences et Environnement (LGE),
02 BP 801 Abidjan, Côte d'Ivoire*

³ *Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB), Département des Sciences de la Terre et
des Ressources Minières (STeRMi), Laboratoire du Génie Civil, des Géosciences et des Sciences
Géographiques, BP 1093 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire*

* Correspondance, courriel : kazile2004@yahoo.fr

Résumé

L'étude du comportement hydrologique du bassin versant du Boubo a nécessité l'intégration dans le modèle CEQUEAU d'une base de données constituée de données matricielles (paramètres d'altitude et d'occupation du sol), vectorielle (hydrographie, limite du bassin versant, localisation des stations hydrométéorologiques) et des tables associées comprenant les données géographiques. La discrétisation spatiale de la surface du bassin versant (5900 km²) a conduit à 100 mailles carrées de 10 km de côté chacun et 188 mailles partielles. Le calibrage du modèle sur la période (1983-1987) et sa validation sur les périodes (1992-1996, 1997-2001 et 1992-2001) ont permis de reconstituer les débits moyens journaliers écoulés avec des coefficients de Nash variant de 0,74 à 0,85 et le coefficient de corrélation variant de 0,89 à 0,92. La simulation des différents états de surface indique que les changements phytogéographiques opérés sur le bassin ont eu pour conséquence la réduction de la lame d'eau évapotranspirée et infiltrée et l'augmentation de la lames d'eau ruisselée.

Mots-clés : *modélisation, chalandise, CEQUEAU, Boubo, comportement hydrologique.*

Abstract

Modelling of the hydrological behavior of the watershed of the Boubo in Middle tropical moist, Côte d'Ivoire by the application of the model hydrological CEQUEAU distributed

Boubo catchment of this hydrological behaviour study required integration in model CEQUEAU of a data base made up of matric data (parameters of altitude and occupation of the ground), vectorial (hydrographic, limiting network of catchment area, localization of the hydrometeorological stations) and of the tables assignees associated with the geographical data. The grid of this catchment surface (5900 km²) led to 100 square meshes of 10 km side each one and 188 partial meshes.

The calibration of the model over the period (1983-1987) and its validation over the periods (1992-1996, 1997-2001 and 1992-2001) made it possible to reconstitute the daily medium flows with coefficients of varying Nash from 0,74 to 0,85 and the coefficient of correlation varying from 0,89 to 0,92. The phytogeographical changes operated on the basin had as a consequence of reduction evaporation and infiltrated water blades and to increase the streamed blades.

Keywords : *modelling, catchment, CEQUEAU, Boubo, hydrological behaviour.*

1. Introduction

La surface des bassins versants subit de façon perpétuelle d'importantes transformations du fait des activités anthropiques et des conditions climatiques. L'évaluation des impacts de ces transformations bien qu'elle soit approximative, est encore délicate à cause de la complexité spatiale et temporelle des différents paramètres et des équipements hydrauliques [1,2]. En effet, l'application de modèle hydrologique global n'est pas souvent recommandée. Seuls les modèles à utilisation spatiale peuvent contribuer à mieux comprendre le fonctionnement de tel bassin versant [3-5]. Ces derniers permettent en effet d'intégrer de multiples données et de faire des analyses pouvant tenir compte de contraintes très diversifiées pour une gestion optimale de l'eau sur un bassin versant. Parmi cette gamme très variée de modèles, le modèle hydrologique distribué CEQUEAU a été retenu pour cette étude. C'est un outil très souple et apte à simuler toute la complexité des systèmes de ressources en eau et à prendre en compte toutes modifications naturelles ou provoquées de ces systèmes [1,6].

Son application au bassin versant du Boubo devant permettre, en outre la compréhension de l'interaction des divers processus auxquels est soumise l'eau des précipitations lorsqu'elle atteint la surface de celui-ci. Cette eau poursuivant son cours jusqu'à son exutoire [7]. Les débits pouvant être calculés en tout point du bassin. En plus de ces avantages, le modèle CEQUEAU offre la possibilité de simuler l'existence de réservoirs artificiels tels que les ouvrages hydrauliques, les détournements, les aménagements de grandes ampleurs etc. [2,8]. Le bassin du Boubo est connu pour la diversité de son relief, ses sols et la dynamique dans l'espace forestier conditionnée par une agriculture intensive. La prise en compte de la variabilité des caractéristiques physiographiques du bassin dans le modèle permet la mise en évidence de son comportement hydrologique [9]. L'utilisation d'un modèle de ce type dans le cadre de l'aménagement intégré du territoire apparaît donc intéressante et souhaitable. La mise en évidence du comportement hydrologique du bassin versant du Boubo dans ce travail aura pour support les types d'occupation du sol de 1990 et de 2001. Ainsi, après un calage et une validation sur l'occupation de 1990, les paramètres obtenus seront comparés à ceux de la simulation de celle de 2001.

2. Description du site de l'étude

Le Boubo est un cours d'eau de direction Nord-Sud qui développe son lit sur 130 km de long et prend sa source aux environs des localités de Diégonéfla, Tiégba et Bronda à la côte 230m (*Figure 1*). Son bassin versant couvre une superficie de près de 5000 km². Il est situé géographiquement entre 4°90 et 5°60 de longitudes Ouest d'une part, et entre 5°00 et 6°04 latitudes Nord d'autre part. Le Boubo reçoit en rive droite deux affluents importants que sont : la Do et le Laoulo. Le bassin présente une pente modérée en amont de Divo et augmente dans la section de son cours comprise entre le pont de Divo et le pont de Guitry.

Sur les 26 premiers kilomètres, on note la présence des chutes de Ménokadié avec une pente moyenne de 3m/km. Dans l'ensemble, sur les 5100 km² de superficie, 2050 km² sont en dessous de 150m. Le point culminant du bassin est à la côte de 415 m. Ce cours d'eau selon la classification de Strahler est d'ordre 5. Le climat est de type équatorial de transition avec une pluviométrie supérieure à 1500 mm/an. Il est caractérisé par deux saisons pluvieuses et deux saisons sèches (**Figure 2**). La grande saison des pluies (GSP) s'étend de mi-mars à mi-juillet ; la petite saison des pluies (PSP) couvre les mois de septembre et d'octobre. Les saisons sèches s'étendent, pour la grande saison sèche (GSS) de novembre à mi-mars et la petite saison sèche (PSS) mi-juillet à fin août. La température moyenne sur le bassin varie très peu. Elle oscille entre 25°C et 27°C. La principale activité du bassin est l'agriculture qui représente en moyenne près de 80 %. Sur le plan phytogéographique, le bassin versant du Boubo fait partie du sud forestier ivoirien. Il est composé de quatre formations végétales [10]. Il s'agit des forêts marécageuses à *Symphonia globulifera* (Guittifères) et *Mitragyna ciliata* (Rubiaceés), de la forêt dense sempervirente à *Diospyros* spp. (Ebénacées) et *Mapania* spp. (Cypéracées) sur sol à forte capacité de rétention en eau. Cette dernière renferme les espèces les plus hygrophiles du secteur ombrophile. Les deux autres formations sont la mangrove sur sol hydromorphe à gley et la forêt dense sempervirente de sol ferme.

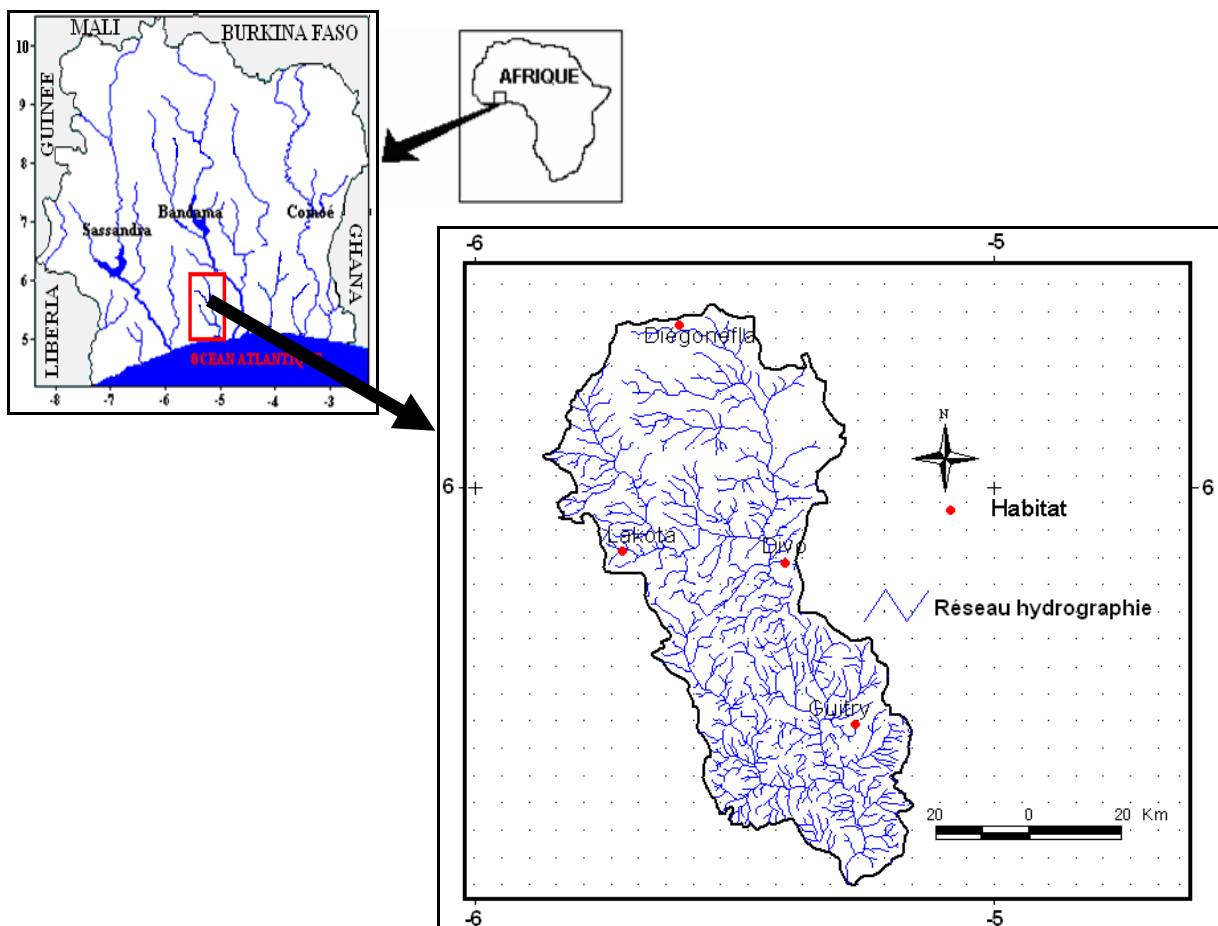


Figure 1 : Localisation du bassin versant du Boubo

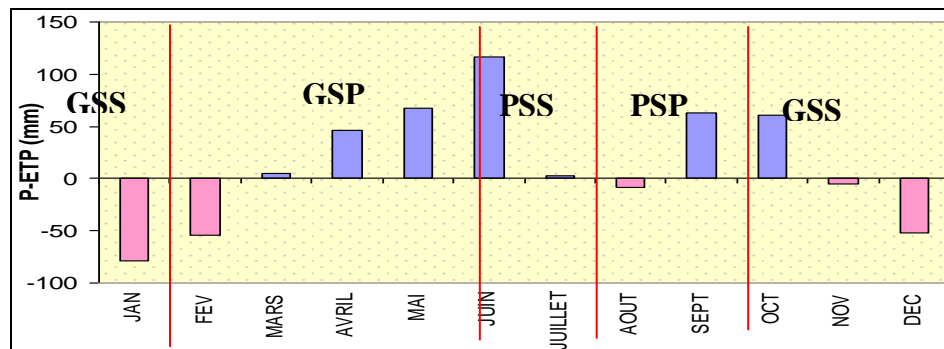


Figure 2 : Présentation du régime pluviométrique du bassin versant du Boubo

3. Données et méthodes

3-1. Données utilisées

Les données d'entrée du modèle CEQUEAU indispensables pour son bon fonctionnement sont de deux types : les données hydroclimatiques et les données physiographiques. Les données hydroclimatiques sont constituées des données de pluie, de température de l'air et de débits, tous au pas de temps journalier. Quatre postes météorologiques et quatre stations de jaugeage ont été retenus pour la réalisation de cette étude. Ils sont identifiables sur le bassin en fonction d'un numéro universel, des coordonnées I-J (10-10) et l'altitude (station pluviométrique) ou du code de carreau partiel (station hydrométrique) (*Tableau 1*). Parmi les quatre postes météorologiques disponibles, trois sont situés à l'intérieur et un à l'extérieur du bassin. L'usage des débits n'a d'intérêt que de servir à l'optimisation des 28 paramètres du modèle. Toutes ces données couvrent la période homogène de 1983-2001 qui est de ce fait retenue pour l'étude. Les données relatives à la présence de la neige sont négligées du fait de la situation du bassin en Afrique Tropicale humide avec une température moyenne variant entre 25 et 27°C. De plus, les données de température étant qu'à la station de Gagnoa, elles ont été interpolées aux autres stations à partir de la méthode de pondération.

Tableau 1 : Positionnement des stations pluviométriques et hydrométriques

Nom de la station	Numéro d'identification	Coordonnées I J sur les mailles	Altitude (en m)
Stations pluviométriques			
Gagnoa	0498000	20-13	260
Divo	0009400	14-17	160
Guitry	0011500	12-24	40
Stations hydrométriques			Code carreau partiel
Babokon	801501	14-17	B

Les données physiographiques comprennent entre autres les numéros de référence des carreaux entiers, les altitudes moyennes des carreaux entiers, les pourcentages de forêt sur les carreaux entiers, les pourcentages de lacs et marais sur les carreaux entiers et le sens d'écoulement de l'eau. Les valeurs d'altitude et les numéros de référence des carreaux sont obtenus respectivement à partir des cartes topographiques et du millage du bassin. Les autres caractéristiques physiographiques étant quant à elles obtenues à partir du traitement des images satellitaires Landsat TM et ETM+ (images p196 r56 et p197r56 du 30/12/1990 et du 16/01/2001).

Toutes ces données sont géoréférencées pour permettre leurs superpositions en vue de l'extraction de certains éléments communs (*Figure 5*). Une fois toutes ces informations demandées par le modèle sont intégrées dans la base de données, elles sont compilées pour être prises en compte lors des simulations (simulations quantités).

3-2. Présentation du modèle hydrologique distribué CEQUEAU

Le modèle hydrologique CEQUEAU est un modèle déterministe matriciel à pas de temps journalier permettant de simuler les débits des cours d'eau. Son application au bassin versant nécessite un maillage du domaine en « carreaux entiers » et en « carreaux partiels » [11]. Le débit obtenu à l'exutoire du bassin entier résulte du transfert de lame d'eau produite sur chacun des carreaux à l'autre. Le découpage en surfaces élémentaires du bassin facilite l'utilisation de la télédétection pour définir certaines caractéristiques physiographiques comme le couvert végétal, le réseau de drainage, etc. Le modèle permet de suivre dans l'espace et le temps la formation et l'évolution des écoulements. Il fournit les débits aussi bien aux points de jaugeage qu'à n'importe quel autre endroit du bassin [12]. Aussi, offre-t-il la possibilité de simuler l'existence de réservoirs artificiels et de prendre en compte les variations spatiales des caractéristiques physiographiques. Les simulations sont possibles au pas de temps de 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12 heures ou journalier. Ainsi, pour mieux décrire le cheminement de l'eau vers l'exutoire du bassin, le modèle CEQUEAU comporte deux fonctions principales. La première est la « fonction de production » et la seconde la « fonction de transfert »

3-2-1. Fonction de production

Elle a pour but de représenter de manière simple les différentes voies que suit l'eau sur le bassin. L'ensemble des processus à la base de cette fonction est schématisé dans le modèle CEQUEAU par la représentation du sol sous forme de réservoirs communiquant entre eux à l'aide de relations mathématiques reproduisant, à l'échelle journalière, les différents transferts de masse (*Figure 2*). Le niveau de l'eau dans le réservoir "SOL" est utilisé pour déterminer l'évaporation, l'infiltration et les évacuations qui reproduisent le ruissellement de surface, et le ruissellement retardé. La méthode utilisée pour le calcul de l'évaporation journalière est celle de Thornthwaite, modifiée pour tenir compte de la durée potentielle d'ensoleillement en fonction de la latitude, du jour de l'année et de la saturation du sol. Les évacuations d'eau sont déterminées en fonction des coefficients de vidange et des hauteurs de chaque orifice. Elles sont additionnées au ruissellement sur les surfaces imperméables pour donner un volume d'eau disponible pour l'écoulement en rivière, sauf la partie infiltration qui s'écoule dans le réservoir "NAPPE".

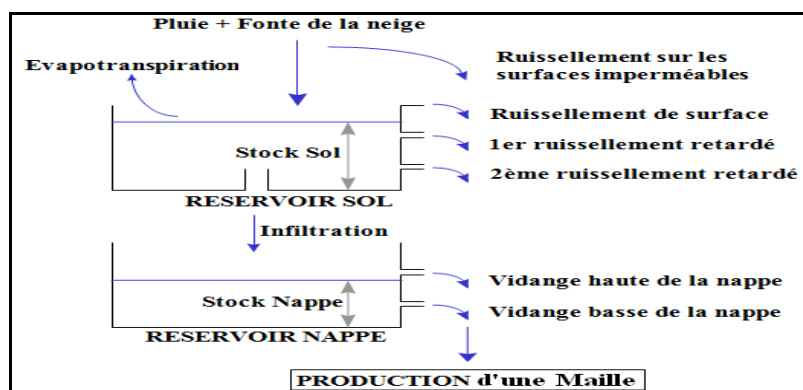


Figure 3 : Schéma de la fonction production d'une maille CEQUEAU [13]

3-2-2. Fonction de transfert

A partir du schéma de production décrit ci-dessus, on obtient pour chaque maille un volume d'eau disponible pour le transfert en rivière. Ce transfert se fait d'une maille amont à une maille aval selon le réseau hydrographique tout en tenant compte de la topographie des mailles. Ainsi, au volume d'eau d'une maille s'ajoute les volumes d'eau transférés depuis les mailles situées directement en amont de celle-ci. Le volume résultant devient le volume disponible pour le transfert vers la maille directement en aval (**Figure 3**). Ce processus est répété de maille en maille jusqu'à l'exutoire du bassin.

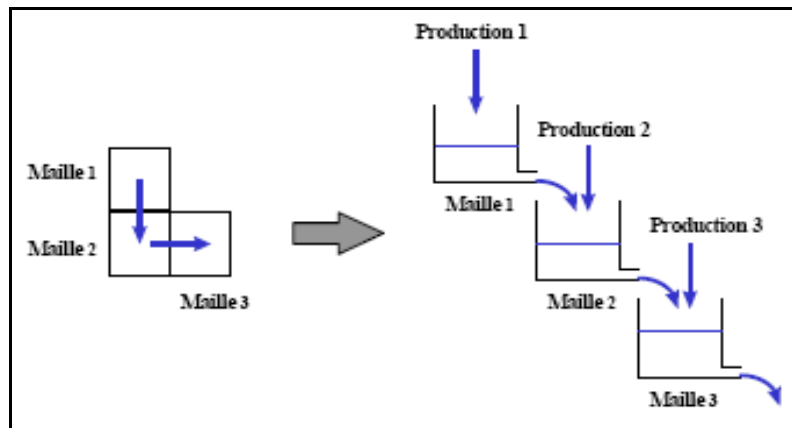


Figure 4 : Schéma de la fonction de transfert de CEQUEAU [13]

3-2-3. Paramètres du modèle

Le modèle CEQUEAU comporte 28 paramètres. Le module de fonte de neige est régi par sept paramètres alors que le cycle hydrologique représenté par les réservoirs sol-nappe-lacs est décrit par 13 paramètres. Parmi ces paramètres, trois peuvent être variables dans l'espace. Il s'agit du coefficient de percolation du réservoir sol vers le réservoir nappe, CIN , de la fraction de surface imperméable, TRI , et du paramètre d'ajustement des coefficients de transfert d'un carreau partiel à un autre, $EXKT$. Six paramètres gouvernent l'évapotranspiration et deux autres sont utilisés pour la prise en compte des gradients de température et de pluie. Sur le bassin du Boubo, les paramètres de formation et de fonte du stock de neige ne sont pas pris en compte car nous nous situons en milieu tropical humide. De même, les paramètres de correction de la pluie et de la température en fonction de l'altitude ne sont pas pris en compte dans le calage en raison de la faible importance de l'orographie. Dans le modèle, l'évapotranspiration potentielle (ETP) est calculée par la formule de Thornthwaite en fonction de la température de l'air. Les paramètres liés au calcul de cette grandeur (XAA et XI), de même que les paramètres XLA (latitude moyenne du bassin versant), TRI et Xinfmax (infiltration maximale) sont calculés en fonction des caractéristiques hydrologiques et physiographiques du bassin concerné. A l'exception de ces paramètres et constantes, les autres paramètres du modèle sont déterminés par essais et erreurs.

3-3. Méthodes d'évaluation de l'application du modèle

3-3-1. Maillage du bassin

Cette étape est rendue possible grâce à un Système d'Information Géographique (SIG) qui est le logiciel Mapinfo 8.0. Il a permis de représenter plusieurs couches d'informations devant être pris en compte dans la modélisation.

Ces informations sont issues soit du logiciel lui-même (topographie), soit provenant de l'utilisateur. Dans la pratique, la mise en place de ces couches d'informations est décrite de la manière suivante :

- Dessiner le contour du bassin versant à partir de son exutoire, tout en spécifiant le cours d'eau principal et ses affluents;
- Dessiner la ligne d'écoulement d'une goutte d'eau depuis un point désigné jusqu'à l'exutoire du bassin. Cette tâche se fait à partir de données de direction et d'accumulation, des écoulements et de la topographie;
- Mailler le bassin versant par intersection de son contour avec une grille à lui superposer ;
- Attribuer à chaque maille la station météorologique la plus proche de son centre ;
- Attribuer à chaque maille, exceptée celle où se trouve le point exutoire une maille amont, à partir du tracé du réseau hydrographique sur le bassin versant. Une maille peut ainsi avoir plusieurs mailles amont, mais elle ne possède qu'une seule maille aval ;
- Evaluer sur chaque maille les informations telles que les pourcentages de forêt, les pourcentages de lacs et marais ;
- Donner l'altitude (en mètre) du coin sud-ouest de chaque maille.

3-4. Calibration du modèle CEQUEAU

L'application du modèle au bassin se fait en deux grandes étapes. Après l'intégration de l'ensemble des données au modèle, celui-ci est calé (période de calage) et validé (période de contrôle). Au cours de ces phases, les différents paramètres du modèle sont ajustés sur la (s) période (s) de calage. Ces mêmes paramètres sont vérifiés sur la (s) période (s) de contrôle afin de s'assurer que la modélisation n'était pas dégradée. Deux critères sont ainsi utilisés pour évaluer l'application du modèle au calage comme à la validation. Le calage a porté sur la période 1983-1987 et la validation sur quatre périodes : 1988-1995, 1996-2001, 1988-2001 et 1983-2001.

3-4-1. Critère de Nash

Le critère de Nash et Stutcliffe [14] évalue la différence entre les débits observés et les débits simulés. Ce critère est très utilisé en hydrologie pour évaluer les performances des modèles pluie-débit. Il est donné à partir de la **formule (1)**.

$$NTD = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (q_{ci} - q_{oi})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (q_{oi} - \bar{q}_o)^2}} \quad (1)$$

où : q_{ci} et q_{oi} sont les débits calculés et observés au jour i ; \bar{q}_c et \bar{q}_o sont les moyennes respectives de q_{ci} et q_{oi} sur les n jours servant au calcul du coefficient.

Plus le Nash est proche de 1, plus les débits simulés sont proches des observations. Un Nash égal à 1 indique que le modèle est parfait.

3-4-2. Méthode de corrélation

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (q_{ci} - \bar{q}_c)(q_{oi} - \bar{q}_o)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (q_{ci} - \bar{q}_c)^2 \sum_{i=1}^n (q_{oi} - \bar{q}_o)^2}} \quad (2)$$

3-5. Evaluation du comportement hydrologique du bassin

Le principe de cette évaluation est le suivant : Le modèle est calé et validé avec l'occupation du sol de 1990. Un premier jeu des valeurs des composantes du cycle hydrologique : pluie moyenne (P) lame écoulée (R), évapotranspiration réelle (ETR) et infiltration (I) sont extraites ou déduites; Ensuite, une seconde simulation est faite en intégrant l'occupation du sol de 2001 dans la base de données physiographiques. Ainsi, un second jeu de paramètres hydrologiques est ainsi obtenu. Dans ce cas, le modèle n'est plus recalé afin d'éviter la correction de l'influence qu'aurait les caractéristiques physiographiques de cet état de surface (carte d'occupation de 2001) sur la réponse hydrologique du bassin. De plus, les données climatiques (pluie et température) sont maintenues constantes sur la période de l'étude pour éviter leur impact sur l'interprétation des résultats [12]. Enfin, les deux jeux de paramètres hydrologiques obtenus sont analysés pour ressortir l'incidence réelle de la substitution de la carte d'occupation du sol de 2001 à celle de 1990 sur le comportement hydrologique des bassins.

4. Résultats

4-1. Résultats du maillage du bassin et la spatialisation des processus hydrologiques

La base données physiographiques tirée de la télédétection et du SIG (**Figure 5**) a permis de fournir les informations nécessaires à la modélisation du comportement hydrologique du bassin. Ces informations sont regroupées sur les cartes d'occupation du sol de 1990 et 2001 de la **Figure 5**. Les altitudes sur le bassin varient entre 10 et 300 m. La pente moyenne résultante vaut 30 % sur le bassin. On note que les parties nord du bassin sont d'altitude relativement plus élevées, opposées aux zones de basses altitudes du sud. Ces particularités liées intrinsèquement au relief du milieu pourraient entraîner la variabilité dans la réponse hydrologique du bassin selon que l'on se trouve au nord ou au sud. Les mailles étant les unités hydrologiques et reliées au réseau hydrographique permettent de suivre le devenir des écoulements dans les rivières. Ainsi, la discrétisation spatiale du bassin versant du Boubo a conduit à des mailles entières de 8 km de côté. 100 carreaux entiers et 188 carreaux partiels ont été obtenus sur le bassin. A l'issue de la préparation des données pour les simulations, les erreurs relatives sur les superficies du bassin et des sous bassins ne dépassent pas les 5%. Ce qui témoigne de la bonne prise en compte des caractéristiques spatiales du bassin. On note aussi que chacune des trois stations pluviométriques disponibles sur le bassin, couvre une superficie d'influence moyenne de 1646 km².

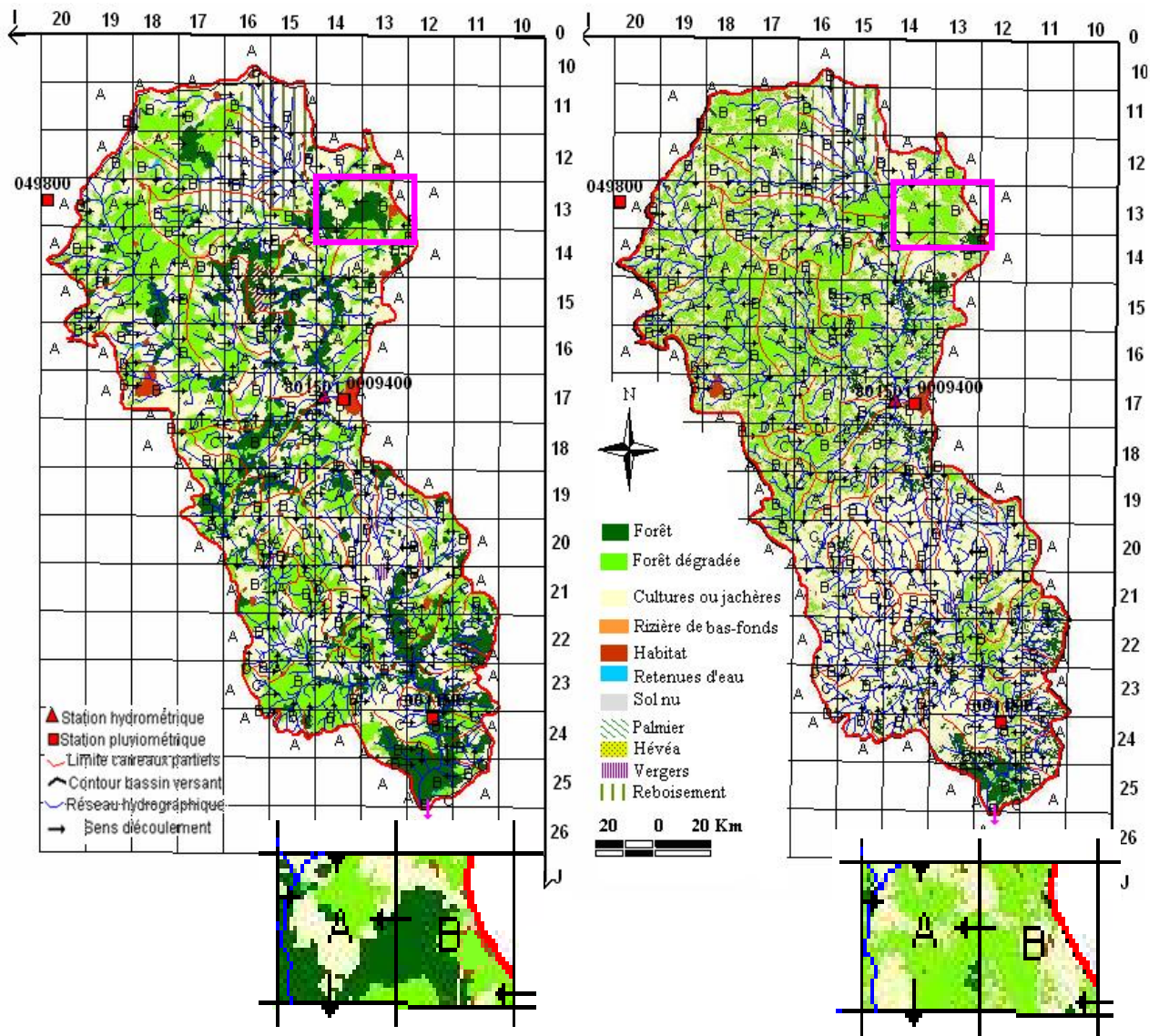


Figure 5 : Spatialisation de la base de données du modèle CEQUEAU

4-3. Calage et validation du modèle

Le calage du modèle sur la période (1983-1987) de la rivière Boubo à Babokon montre un assez bon synchronisme entre les débits observés et calculés (*Figure 6*). Les lames d'eau observées et simulées sont respectivement de 121,31mm et 135,67 mm avec un critère de Nash de 0,78. Cette valeur souligne que le calage est assez satisfaisant car supérieure à 50 %. Le coefficient de corrélation calculé sur la même période vaut 0,88. A la validation sur les périodes de 1988-1995, de 1996-2001, de 1988-2001 et de 1983-2001, le critère de Nash correspondant vaut respectivement 0,74 (*Figure 7a*), 0,85 (*Figure 7b*), 0,81 (*Figure 7c*) et 0,81 (*Figure 7d*) sur le bassin versant du Boubo. Sur chacune des périodes, les lames d'eau moyennes observées et simulées sont respectivement de 97,72 mm et 111,67 mm (1988-1995), de 103,69 mm et 113,45 mm (1996-2001), de 100,45 mm et 112,53 mm (1988-2001) et de 105,99 mm et 118,61 mm (1983-2001). Les coefficients de corrélation obtenus sur chacune de ces périodes varient entre 0,89 et 0,92. Les résultats graphiques relatifs à la validation montrent aussi un assez bon synchronisme entre les courbes des débits observés et simulés que sur la période de calage. Il ressort de leur analyse que les processus hydrologiques sont bien reproduits, à quelques exceptions près.

Cela exprime la bonne performance et la meilleure applicabilité du modèle CEQUEAU au bassin versant du Boubo. Ces performances sont couronnées par des valeurs du critère de Nash variant de 0,74 à 0,85 sur le bassin. Malgré ces atouts du modèle, de légers écarts sont constatés entre les débits observés et calculés au calage et à la validation. La comparaison des débits mensuels interannuels observés et calculés (*Figure 8*) présente deux tendances. La première est à la surestimation des débits simulés par rapport à ceux observés. Quant à la seconde tendance, elle est à l'égalisation des deux types de débits.

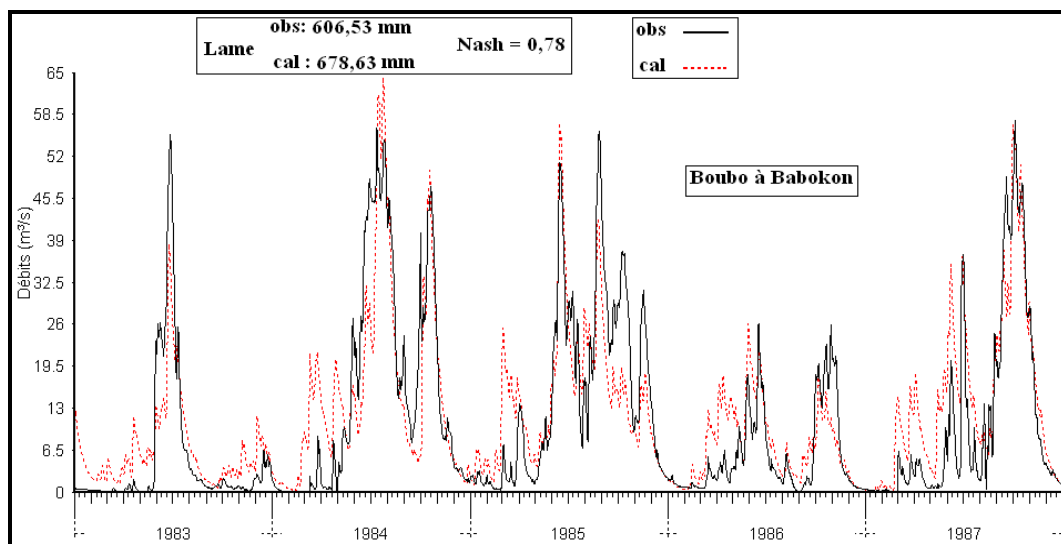
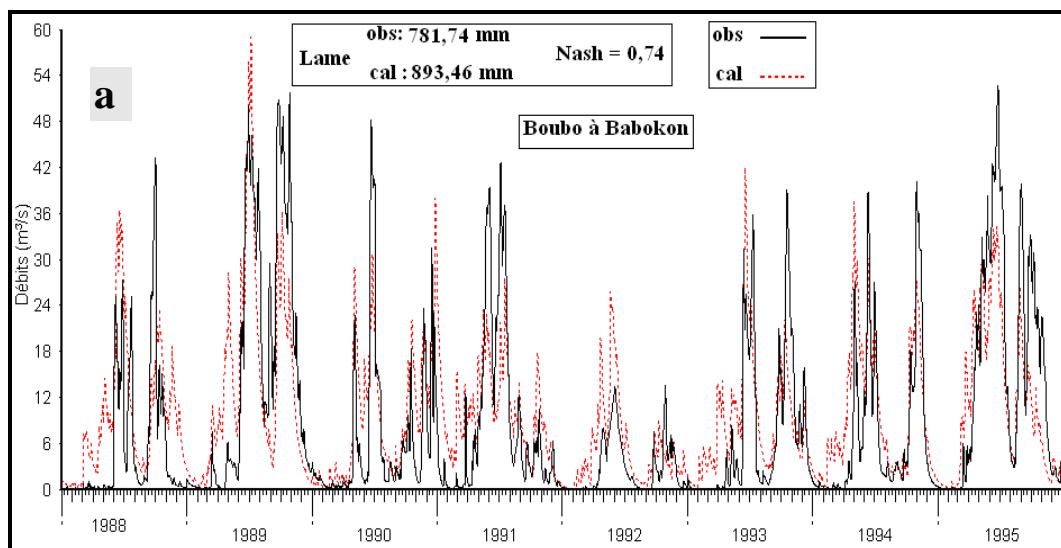


Figure 6 : Débits journaliers observés et calculés sur la période de calibration (1983-1987) du Boubo à Babokon



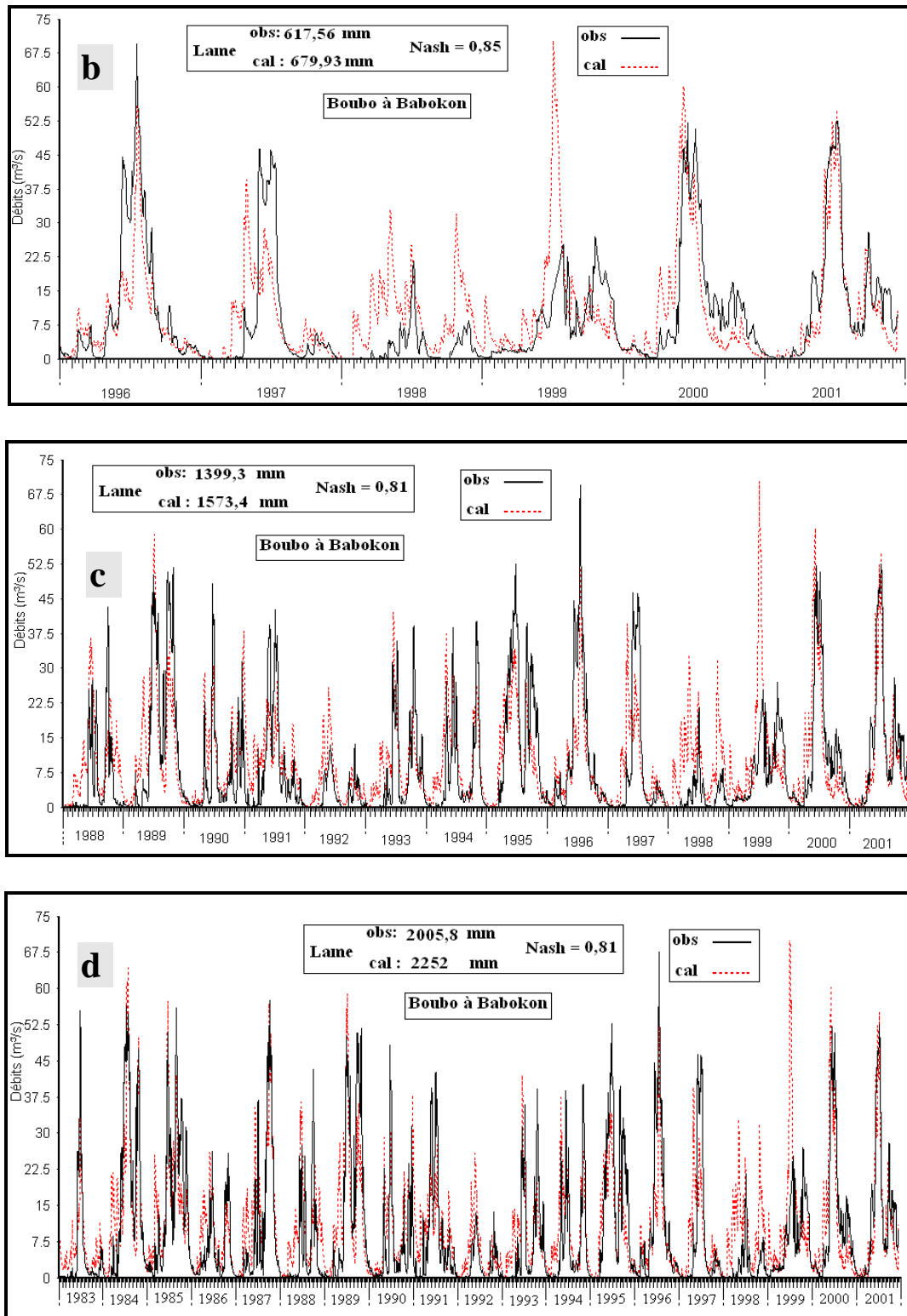


Figure 7 : Débits moyens journaliers observés et calculés sur les périodes de vérification de la rivière Boubo à Babokon : 1988-1995 (a), 1996-2001 (b), 1988-2001 (c) et 1983-2001 (d)

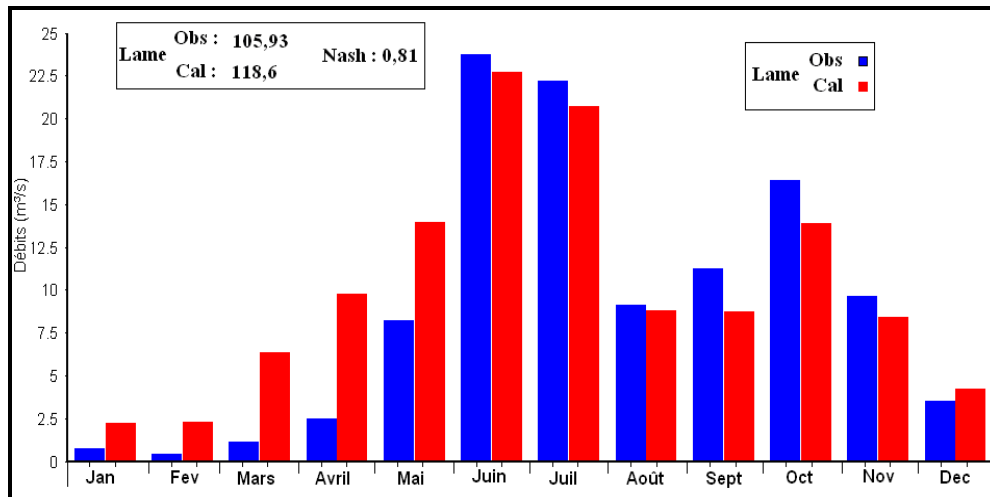


Figure 8 : Débits mensuels interannuels observés et calculés (1983-2001) du Boubo à Babokon

4-5. Comportement hydrologique du bassin

4-5-1. Réponse hydrologique du bassin

Les transformations dans l'occupation du sol d'un bassin versant a des répercussions sur son comportement hydrologique. L'analyse de la relation pluie-débit établit dans ce contexte sur les types d'occupation du sol de 1990 et de 2001 à l'échelle journalière (*Figures 9a et b*) et l'échelle mensuelle (*Figures 10a et b*) montre que sous la même hauteur pluviométrique les pics de crue et les débits d'étiage varient. S'agissant des pics de crue, ils connaissent une augmentation sur cette période de 10 ans tels que indiqués sur les figures précédentes (1)-(1') et (2)-(2'). Cette augmentation est relativement plus faible au de temps journalier qu'à l'échelle mensuelle. Quant aux débits d'étiages, ils sont devenus de plus en plus critiques avec la dynamique de la couverture végétale du bassin.

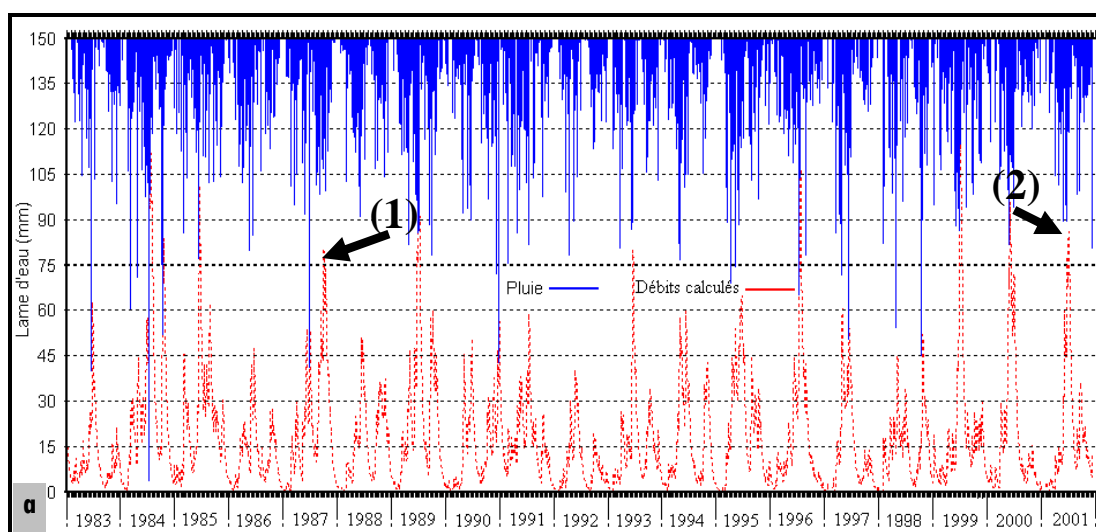


Figure 9 : Comparaison des débits moyens journaliers calculés à l'exutoire du bassin sur les types de l'occupation du sol de 1990 (a) et de 2001 (b)

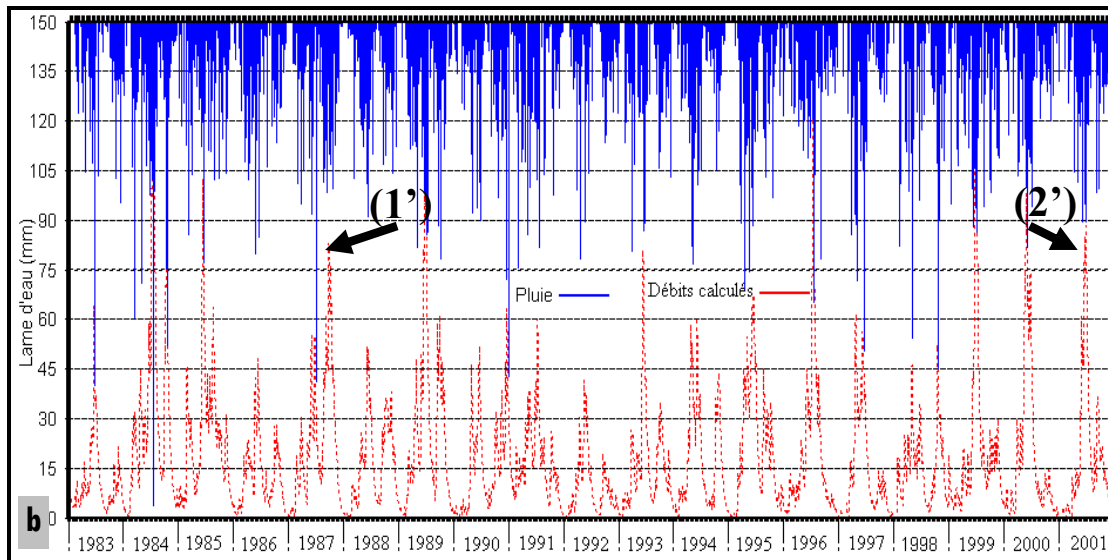


Figure 10 : *Comparaison des débits moyens mensuels calculés à l'exutoire du bassin sur les types de l'occupation du sol de 1990 (a) et de 2001 (b)*

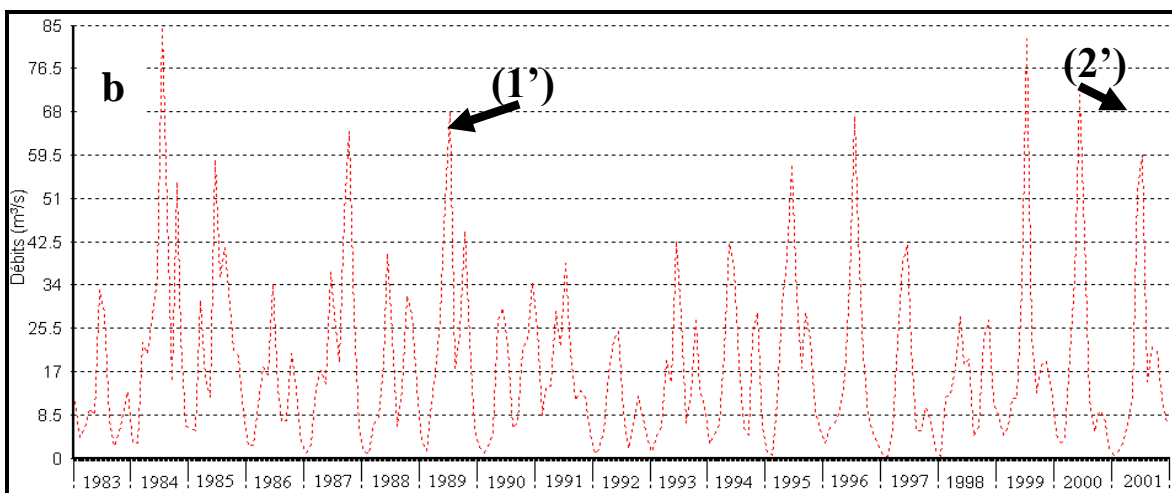
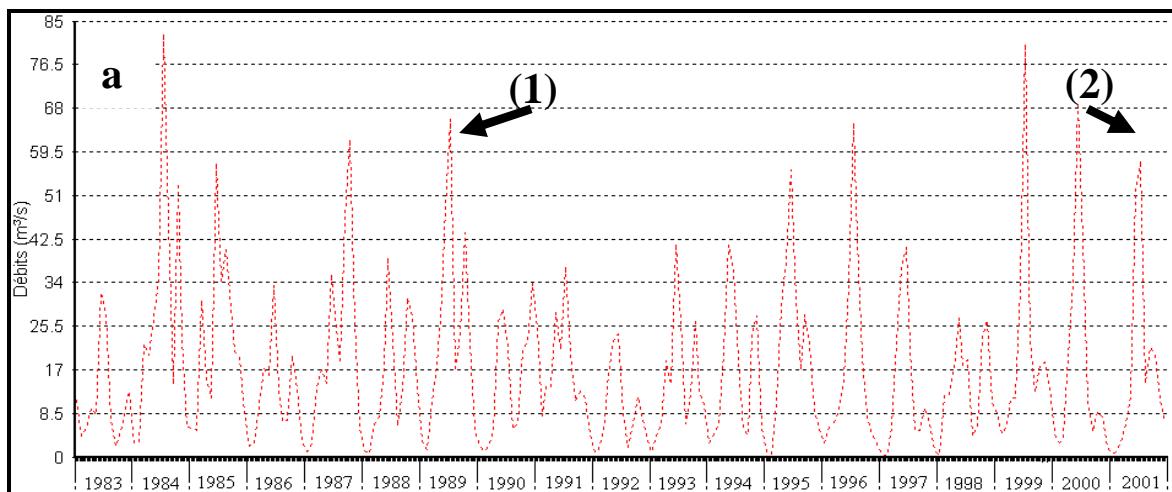


Figure 11 : *Comparaison des débits moyens journaliers observés à l'exutoire sur l'occupation du sol de 1990 (a) et de 2001 (b)*

4-5-2. Bilan hydrologique sur le bassin versant de l'Agneby

Les bilans hydrologiques interannuels et mensuels établis sur les types d'occupation du sol de 1990 et 2001 par l'application du modèle hydrologique CEQUEAU sur la période 1983-2001 sont consignés dans les tableaux 2 et 3. Il ressort de l'examen de ces tableaux que la pluviométrie moyenne annuelle et mensuelle enregistrée respectivement sur la même période (1983-2001), varie entre 883 et 1516,5 mm et entre 19,1 et 204,4 mm. Dans le bilan, ces types de pluviométries se répartissent entre l'évapotranspiration réelle (ETR), l'écoulement en rivière (R) et la recharge des réservoirs souterrains (I). Une première analyse des valeurs du bilan hydrologique annuel et mensuel établi sur l'occupation du sol de 1990 indique que les écoulements sur le bassin représentent en moyenne 3 à 15 % des précipitations. La plus grande fraction étant fortement évapotranspirée. Quant à la recharge interannuelle des réservoirs d'eau souterrains (infiltration), elle varie de (-1,50 mm) en 1983 à 57,92 mm en 2001. Les valeurs négatives de l'infiltration enregistrée en 1983 et en 1991 sont les conséquences des grands moments de sécheresse qui sont traduits par le modèle. Les autres valeurs de l'infiltration restent variables en fonction de la hauteur de pluie incidente.

La comparaison des résultats de simulation de l'occupation du sol de 1990 et de 2001 a permis d'évaluer l'incidence réelle de la dynamique de l'état de surface du bassin sur son comportement hydrologique. Les bilans hydrologiques mensuels et interannuels issus de ces simulations montrent que les fractions d'eau évapotranspirées et infiltrées sont réduites et ruisselée est en hausse. L'examen des bilans hydrologiques moyens interannuels (**Tableau 2**) indique que la précipitation moyenne de 1192,3 mm se répartie entre les différents termes du bilan de la manière suivante :

- la fraction d'eau évapotranspirée passe de 1062 mm à 1060,5 mm en simulant respectivement l'occupation du sol de 1990 et de 2001, ce qui représente un déficit de (-1,5 mm), soit un volume d'eau de $7,34 \times 10^6 \text{ m}^3$ (-0,14 %) ;
- la lame d'eau écoulee vaut 112,6 mm sur l'OCS 1990 contre 115,4 mm sur l'OCS 2001, équivalent à un gain de (+2,8 mm), soit un volume $13,71 \times 10^6 \text{ m}^3$ (+2,49 %) ;
- quant à la lame infiltrée, elle varie entre 17,6 mm et 16,4 mm respectivement sur les types d'occupation du sol de 1990 et 2001. Cette variation représente un déficit de (-1,2 mm) correspondant à un volume d'eau de $5,87 \times 10^6 \text{ m}^3$ (-6,81 %).

Les bilans hydrologiques moyens mensuels (**Tableau 3**) donnent les mêmes conclusions que les bilans interannuels. Il s'agit en occurrence de la réduction des lames d'eau évapotranspirées et infiltrées et de la hausse des lames écoulées. L'analyse des valeurs de l'infiltration donne des indications sur la recharge de la nappe au cours de l'année. En effet, au cours des mois de novembre à janvier d'une part et d'autre part de juillet et août, les lames d'eau infiltrées calculées sont toutes négatives. On note de plus que ces mois enregistrent les hauteurs pluviométriques les plus faibles pendant l'année (saisons sèches) et seraient déficitaires quant à la recharge de la nappe. A l'opposé, les périodes prenant en compte les mois de février à juin et de septembre et octobre sont consécutives à des valeurs positives d'infiltration. Ces mois sont de ce fait favorables à la recharge des nappes. Dans ces bilans, les valeurs des lames d'eau évapotranspirées restent peu sensibles aux variations des précipitations.

Tableau 2 : Bilan hydrologique interannuel sur la période 1983-2001

ANNEES	Pluie moy	OCS 1990			OCS 2001			ΔETR (mm)	ΔR (mm)	ΔI (mm)
		ETR (mm)	R (mm)	I (mm)	ETR (mm)	R (mm)	I (mm)			
1983	928,8	869,5	72,9	-13,6	868,6	74,5	-14,2	-0,9	1,6	-0,6
1984	1516,5	1314,5	181,8	20,2	1315,0	186,0	15,5	0,4	4,2	-4,7
1985	1421	1259,8	149,9	11,2	1258,6	153,4	9,0	-1,3	3,5	-2,2
1986	1006,2	913,3	78,1	14,7	912,3	80,1	13,8	-1,0	2,0	-0,9
1987	1360,2	1193,8	146,3	20,1	1191,4	149,7	19,1	-2,5	3,4	-0,9
1988	1208,2	1084,7	101,2	22,3	1081,7	104,0	22,6	-3,0	2,8	0,2
1989	1411	1237,2	155,4	18,4	1236,2	159,4	15,3	-1,0	4,0	-3,1
1990	1174,4	1013,9	95,5	65,0	1014,3	97,6	62,5	0,4	2,1	-2,5
1991	1129	1049,7	111,9	-32,6	1048,8	114,6	-34,4	-0,9	2,7	-1,7
1992	883	802,6	59,3	21,1	800,1	60,9	21,9	-2,4	1,6	0,9
1993	1161,6	1046,9	97,7	17,1	1043,3	100,2	18,1	-3,6	2,5	1,1
1994	1164,1	1041,7	106,0	16,4	1038,0	108,5	17,6	-3,7	2,5	1,2
1995	1338,1	1178,2	133,6	26,3	1179,8	136,9	21,4	1,7	3,3	-5,0
1996	1256	1127,3	116,8	11,9	1125,5	119,9	10,5	-1,8	3,1	-1,3
1997	964,9	863,1	84,0	17,8	862,8	86,1	16,0	-0,3	2,1	-1,8
1998	1092,1	978,6	94,7	18,8	976,0	96,5	19,6	-2,6	1,8	0,8
1999	1282,4	1132,5	130,3	19,7	1130,4	132,8	19,2	-2,1	2,6	-0,5
2000	1164,9	1033,7	113,7	17,5	1031,6	116,7	16,6	-2,1	3,0	-0,9
2001	1190,9	1037,0	111,1	42,9	1035,5	113,8	41,7	-1,5	2,7	-1,2
Moyenne	1192,3	1062,0	112,6	17,6	1060,5	115,4	16,4	-1,49	2,71	-1,23

Tableau 3 : Bilan hydrologique mensuel sur la période 1983-2001

MOIS	Pluie	OCS 1990			OCS 2001			ΔETR (mm)	ΔR (mm)	ΔI (mm)
		ETR	R	I	ETR	R	I			
Janvier	19,1	20,5	2,2	-3,6	20,5	2,3	-3,7	0,01	0,06	-0,07
Février	50,8	40,9	1,7	8,3	40,7	1,7	8,4	-0,13	0,03	0,10
Mars	100,2	88,9	5,2	6,1	88,7	5,3	6,2	-0,21	0,10	0,11
Avril	143,3	117,5	8,2	17,5	117,1	8,4	17,7	-0,39	0,17	0,22
Mai	147,0	131,5	12,4	3,0	131,1	12,7	3,2	-0,42	0,28	0,14
Juin	204,4	167,5	20,5	16,3	161,5	21,0	21,9	-6,01	0,49	5,53
Juillet	92,4	100,8	20,3	-28,7	100,7	20,8	-29,1	-0,10	0,56	-0,46
Août	65,5	60,1	8,6	-3,2	60,1	8,9	-3,5	-0,01	0,25	-0,25
Septembre	98,8	86,0	7,7	5,1	85,8	7,9	5,1	-0,25	0,21	0,05
Octobre	142,2	127,0	12,7	2,5	126,6	13,0	2,6	-0,41	0,31	0,09
Novembre	87,9	93,5	8,6	-14,1	93,4	8,9	-14,4	-0,05	0,29	-0,23
Décembre	40,9	42,9	4,4	-6,5	43,1	4,6	-6,8	0,19	0,16	-0,35

5. Discussion

Les résultats de l'application du modèle CEQUEAU au bassin versant du Boubo que celui traduit assez fidèlement son comportement hydrologique. Les critères d'évaluation numériques (coefficient de Nash et de corrélation) et graphiques (*Figures 6, 7a, 7b, 7c et 7d*) le témoignent très clairement. Néanmoins le modèle a tendance à surestimer les débits simulés par rapport à ceux observés au cours des mois secs et de début de saison des pluies (*Figure 8*). Cette situation est probablement due aux prélèvements importants pour l'irrigation et l'alimentation des populations humaines et animales. En effet, au cours de ces mois de l'année, la demande en eau des espèces animales et végétales est importante, vu la rareté de la ressource. Pourtant ces importants prélèvements ne sont pas pris en compte dans le modèle, faute de disponibilité des données aussi bien dans le temps que dans l'espace sur le bassin. Les meilleurs synchronismes entre débits observés et simulés s'observent pendant la saison de pluie (avril à novembre). On note ici cependant une légère tendance à la surestimation des débits observés par rapport à ceux simulés (septembre, octobre et novembre). Ces insuffisances peuvent provenir dans un premier temps de l'occurrence de pluies à faible extension spatiale et de la mauvaise estimation des températures.

En effet, une bonne spatialisation des précipitations et de la température à l'échelle du bassin versant est déterminante pour la modélisation hydrologique [15-23]. Ces paramètres étant généralement mal évalués à cause du réseau météorologique assez lâche et non uniforme, alors qu'ils représentent les principales entrées du modèle. Leur extrapolation spatiale n'est souvent pas parfaitement bien prise en compte dans le modèle. Dans un second temps, il peut d'agir de la procédure de mesure des débits qui est basée sur la conversion des hauteurs limnimétriques journalières à partir de la courbe de tarage du cours d'eau. La troisième raison justifiant l'insuffisance des résultats est l'évolution dans le temps des caractéristiques internes du bassin, notamment l'humidité dans les différentes couches du sol et leur saturation après un épisode pluvieux. Ces caractéristiques étant variables dans le temps et l'espace pourraient avoir une incidence sur la réponse du bassin. Les réponses hydrologiques obtenues de la simulation successive de l'occupation du sol de 1990 et de 2001 sur le bassin mettent en évidence l'augmentation des pics de crue et la réduction des débits d'étiage. Ces variations sont relativement faibles sur cette période de 11 ans (*Figures 9a et b ; 10a et b*) et pourraient être le fait des types de transformations qui ont lieu en passant d'un type d'occupation à l'autre. En effet, la principale activité du bassin étant l'agriculture (près de 90 %), celle-ci se pratique sur la presque totalité du bassin et cela en fonction des besoins des populations.

Selon le Ministère de l'Agriculture [24], les seules plantations de cacaoyer, de caféier et de palmier à huile occupent une proportion de près 80 % du bassin. Ces cultures en se substituant au couvert forestier, prennent très rapidement le caractère arbustif à moyen terme. De ce fait, malgré le degré important de déforestation, il existe tout de même un couvert végétal qui réduit l'érosion des sols. Les écoulements rapides étant certainement ralentis dans le temps. Cela justifierait le fait que la réaction du bassin ne soit pas immédiate. La couverture végétale du bassin jouant le double rôle de modérateur des écoulements et de réducteur des pointes de crue [25-27]. Ces formes de mutations (déforestation et révégétalisation) de la surface du bassin la font revenir rapidement à un stade intermédiaire d'occupation. Ainsi, la non linéarité des actions de transformation de la surface du bassin serait une raison suffisante pour justifier les faibles amplitudes des pics de crue journalière et des débits critiques d'étiage. De plus, l'étendue du bassin lui-même confère un temps de concentration très varié et variable selon ses caractéristiques morphométriques. Les bilans hydrologiques interannuels et mensuels établis de la simulation de l'occupation du sol de 1990 et de 2001 (*Tableaux 2 et 3*) mettent en évidence la réduction des lames d'eau évapotranspirées et infiltrées d'une part et d'autre part l'augmentation de celle ruisselée.

Il résulte aussi de ces bilans une surestimation des lames d'eau évapotranspirées. Les fortes valeurs d'évapotranspiration observées seraient dans une certaine mesure imputables à l'interception des milieux forestiers comme c'est le cas du bassin étudié [28]. En effet, la forte couverture végétale en interceptant une grande part des eaux de pluie, contribue de façon complexe à sa redistribution entre les composantes du cycle hydrologique [29]. De plus, la formule de Thornthwaite utilisée dans le modèle pour le calcul de l'ETR sous-estime un temps soit peu les autres paramètres climatiques au profit de ceux liés à la couverture végétale. La faible variation des hauteurs d'eau évapotranspirées sur la période d'étude face à la variabilité pluviométrique pourrait s'expliquer par la saturation du pouvoir évaporant de l'atmosphère qui serait atteinte plus tôt. On note aussi que la dynamique de l'occupation du sol dans cette étude est plutôt liée à l'interaction complexe entre les systèmes sociaux (facteurs anthropiques) qu'aux facteurs environnementaux. Les facteurs climatiques étant maintenus constants au cours des simulations, toute perturbation dans les écosystèmes ne peut être due qu'aux types d'activités des populations sur le bassin.

6. Conclusion

Cette étude avait pour but de simuler le comportement hydrologique du bassin versant du Boubo entre 1990 et 2001 en appliquant le modèle hydrologique distribué CEQUEAU. La prise en compte par ce dernier de la variabilité des données physiographiques surtout celles liées à la dynamique de l'occupation du sol entre les années 1990 et 2001, a conduit à atteindre cet objectif. L'intégration de ces données n'a été possible qu'à partir du traitement des images satellitaires TM de Landsat et des données provenant des SIG. La discrétisation spatiale du bassin a fourni 100 carreaux entiers de 8 km de côté et 188 carreaux partiels sur une superficie totale de 8500 km². Elle a aussi permis de prendre en compte les autres caractéristiques physiques variabilités spatiales des catégories d'occupation du sol du bassin dans le modèle. Les résultats de la simulation du modèle indiquent que les paramètres optimaux sont atteints pour des valeurs du critère de Nash variant de 0,78 à 0,85 au calage et à la validation. Les coefficients de corrélation calculés varient quant à eux entre 0,88 et 0,95. Le modèle est sensible aux saisons de pluie et sèche qu'il traduit dans les résultats de simulation. Sur le bassin versant du Boubo, les transformations opérées de 1990 à 2001 (tendance à la dégradation) ont conduit à la réduction des lames d'eau évapotranspirées de (-0,14 %) et infiltrées de (-6,81 %). La lame écoulée a quant à elle enregistré sur la même période une augmentation de (+2,49 %). Spécifiquement, la dynamique de l'occupation du sol du bassin versant du Boubo fait augmenter les pics de crue et réduit les débits d'étiage caractéristiques. Aussi, la recharge des réservoirs d'eau souterrains sur le bassin a-t-elle lieu au cours des mois de février à juin et de septembre à octobre. Ainsi, dans un cadre plus large de stratégie de décision et par suite de sa conception même, le modèle hydrophysiographique CEQUEAU a les potentialités d'analyse du comportement des ouvrages projetés de même que de leurs répercussions hydrologiques sur l'ensemble du bassin étudié.

Références

- [1] - G. MORIN, J.P. FORTIN, J.P. LARDEAU, W. SOCHANSKA et S. PAQUETTE, Modèle CEQUEAU : manuel d'utilisation. IBRS-Eau rapport scientifique no. 93 (1981) 449 p.
- [2] - G. MORIN et P. PAQUET : Le modèle de simulation de quantité et de qualité CEQUEAU. Guide de l'utilisateur, version 1. OB Windows, INRS-Eau, Rapport de recherche n°435 (1995).
- [3] - J. DUPONT, J. SMITZ, A.N. ROUSSEAU, A. MAILHOT ET G. GANGBAZO, Utilisation des outils numériques d'aide à la décision pour la gestion de l'eau. Revue des sciences de l'eau, numéro spécial, (1998) p. 5-18.

- [4] - J.C. BAUDEZ, C. LOUMAGNE, C.L. MICHEL, B. PALAGOS, V. GOMENDY et F. BARTOLI, vers une comparaison de l'approche globale et de l'approche distribuée. Modélisation hydrologique et hétérogénéité spatiale des bassins. *Etude et Gestion des Sols*, 6,4, (1999) pp 165-184.
- [5] - Y. HUNDECHA et A. BARDOSSY, Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model. *J. Hydrol.* 292, (2004) pp 281-295.
- [6] - K. F. KOUAME, M. BERNIER, D. L. GONE, M. B. SALEY, R. LEFEBVRE, N. SORO et A. KOUDOU, Géospatiales dans un modèle hydrologique distribué pour la simulation des écoulements des eaux en milieu tropical humide de côte d'ivoire (Afrique de l'ouest). *Revue Télédétection*, vol. 7, n° 1-2-3-4, (2007) p. 217-235.
- [7] - B. KONAN, Modélisation et gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant du Sassandra (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat 3eme cycle, Université d'Abobo-Adjamé, (2002)146p.
- [8] - M. AYADI ET Z. BARGAOUI, Modélisation des écoulements de l'oued Miliane par le modèle CEQUEAU. *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 43(5), (1998) 741-758.
- [9] - G.C.L. DOOGE, Mathematical models of hydrologic systems. Symposium International sur les Techniques de Modèles mathématiques appliqués aux Systèmes de Ressources en Eau, tome 1, p. 171-189: Environnement Canada (Ottawa, 9-12 mai 1972) (1972).
- [10] - J. M. AVENARD, M. ELDIN, G. GIRARD, J. SIRCOULON, P. TOUCHEBEUF, J.L. GUILLAUMET, E. ADJANAHOON, A. PERRAUD : Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoire ORSTOM, N° 50, Paris : (1971) 391p.
- [11] - G. MORIN ET P. PAQUET, Modèle hydrologique CEQUEAU, INRS-ETE, rapport de recherche no R000926, (2007) 458p.
- [12] - G. MORIN, Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride. Le modèle hydrologique CEQUEAU : exemple d'application. INRS-eau, Université du Quebec, Canada, (1991) pp. 23-39.
- [13] - F. HENDRICKX, Impact hydrologique d'un changement climatique sur le bassin du Rhone Hydroecol. Appl., Tome 13 Vol. 1, (2001) pp. 77-100.
- [14] - J. E. NASH et J. V. STUTCLIFFE, River flow forecasting through conceptual models, part 1: a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), (1970) pp. 282-290.
- [15] - R. P. RUDRA, WT. DICKINSON ET E.L. VON EUW, The importance of precise rainfall inputs in nonpoint source pollution modeling. *Trans. ASAE* 36 :(1993) 445—450.
- [16] - VL. LOPES, On the effect of uncertainty in spatial distribution of rainfall on catchment modelling. *Catena* 28: (1996) 107—119.
- [17] - I. CHAUBEY, C. T. HAAN, S. GRUNWALD et J. M. SALISBURY, Uncertainty in the model parameters due to spatial variability of rainfall. *J. Hydrol.* 220:(1999) 48—61.
- [18] - B. DUPASQUIER, Modélisation hydrologique et hydraulique des infiltrations d'eaux parasites dans les réseaux séparatifs d'eaux usées. Thèse de Doctorat, ENGREF, Ecole Nationale des Eaux et Forêts de Paris, (1999) 287p.
- [19] - C. PERRIN, Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de Doctorat, CEMAGREF/ENGREF, Institut National Polytechnique de Grenoble, (2000) 530p.
- [20] - V. ANDREASSIAN et J. LAVABRE : Relations entre le couvert forestier et le comportement hydrologique à l'échelle du bassin versant. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, 88(7), (1999) pp.97-98.
- [21] - K. INDARTO, Découpages spatiaux et conséquences sur le bilan hydrologique. Application au bassin de l'Orb à travers une démarche de modélisation distribuée. Thèse de Doctorat, CEMAGREF/ENGREF, Ecole Nationale de Génie Rural, des Eaux et Forêts de Montpellier, (2002) 258p.

- [22] - J. L. PAYAN, Prise en compte de barrages-réservoirs dans un modèle global pluie-débit. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, CEMAGREF, (2007) 257p.
- [23] - M. BOURQUI, Impact de la variabilité spatiale des pluies sur les performances des modèles hydrologiques. Thèse de Doctorat, ENGREF, Ecole Nationale des Eaux et Forêts de Paris, (2008) 333p.
- [24] - Ministère de l'Agriculture et des Ressources Animales (MINAGRA), Direction des Statistiques, de la Documentation et de l'Informatique (DSDI) : Recensement National de l'Agriculture en Côte d'Ivoire, (2001) 57 P.
- [25] - N. O. NASCIMENTO, Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'action anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle du bassin versant. Thèse de Doctorat, CERGRENE/ENPC, Paris, (1995) 550 p.
- [26] - V. ANDREASSIAN ET J. LAVABRE, Relations entre le couvert forestier et le comportement hydrologique à l'échelle du bassin versant. Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France, 88(7): (2002) 97-98.
- [27] - S. Y. SCHREIDER, Detecting changes in streamflow response to changes in non-climatic catchment conditions: farm dam development in the Murray- Darling basin, Australia. Journal of Hydrology, 262(1-4), (2002) pp84-98.
- [28] - C. COSANDEY, C. MARTIN ET J.F. DIDON-LESCOT, *Forêt et écoulements : étude des d'une coupe forestière sur le bilan d'écoulement annuel, les crues et les étiages*. Rapport sectoriel pour le rapport final du contrat européen FOREX, (2000)34 p.
- [29] - K. B. ZUELI, "Etude d'un milieu de forêt dense-analyse et cartographie des paysages de la région de Soubré (sud-ouest ivoirien)". Thèse de Doctorat 3ème cycle en Géographie, (1981) 52p.