

SIMULATION DU COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE L'AGNEBY, EN COTE D'IVOIRE

**Bi Tié Albert GOULA¹, Zilé Alex KOUADIO^{1*}, Koffi Eugène KOUAKOU¹,
Yao Alexis N'GO¹, Claude N'DOUME² et Issiaka SAVANE¹.**

¹*Laboratoire Géosciences et Environnement, UFR Sciences et Gestion de
l'Environnement Université d'Abobo-Adjamé, 02 BP 801 Abidjan 02,
Côte d'Ivoire.*

²*Centre de Cartographie et de Télédétection BNETD, 01 BP3862 Abidjan 01,
Côte d'Ivoire*

(Reçu le 07 Février 2009, accepté le 09 Juin 2009)

* Correspondance et tirés à part, e-mail: kazile2004@yahoo.fr

RÉSUMÉ

L'application du modèle hydrologique CEQUEAU au bassin versant de l'Agneby a permis de mettre en évidence l'impact de la dynamique de l'occupation du sol entre 1990 et 2001 sur son comportement hydrologique. Ce bassin fortement anthropisé couvre une superficie de 8495 km². La base de données nécessaire pour son fonctionnement comprend les données physiographiques, climatologiques et hydrologiques. Le maillage du bassin a conduit à 114 mailles carrées de 10 km de côté chacune. Quant au maillage secondaire, il a permis d'obtenir 214 carreaux partiels. L'intégration des types d'occupation du sol dans le modèle a été possible à partir de l'identification suivie de l'évaluation des classes les composant sur chaque maille. Les données hydroclimatiques sont observées à l'échelle journalière sur la période 1983-2001 au niveau de 4 postes pluviométriques et 4 stations de jaugeage. La calibration du modèle a porté sur la période 1983-1987 qui est relativement sèche. Quant à la validation, elle a porté sur trois périodes (1992-1996, 1997-2001 et 1992-2001) qui sont relativement humides. Durant ces périodes, les débits moyens journaliers sont reconstitués avec des coefficients de Nash variant pour le calage et la validation de 0,66 à 0,89. Les écarts relatifs varient respectivement entre +1,71 % et +11,68 % pour la rivière Agneby à Agboville. Les changements phytogéographiques opérés sur le bassin ont pour conséquence de réduire les lames d'eau évapotranspirée et infiltrée d'une part et d'autre part d'augmenter la lame ruisselée. Leurs incidences sont aussi perceptibles sur les pics de crue et les débits d'étiage.

Mots-clés : *modélisation, bassin versant, CEQUEAU, Agneby,
comportement hydrologique*

ABSTRACT

Hydrological simulation of Agneby's catchment behavior in ivory

The hydrological model CEQUEAU is applied to Agneby catchment to highlight its hydrological behavior between 1990 and 2001 landuses. This catchment which covers 8495 km² is proves very anthropized. The necessary data base for model application includes physiographical, climatological and hydrological data. The catchment grid led to 114 square meshes with 10 side km each one. The secondary grid made it possible to obtain 214 partial squares. The integration of landuse types in the model were possible that starting from the identification followed by the component classes on each mesh evaluation. Hydroclimatic data are observed on day scale day labourer over 1983-2001 at 4 pluviometric stations and 4 streamflow stations. Model calibration related to 1983-1987 period which is relatively dry. As for the model validation, four periods (1992-1996, 1997-2001, 1992-2001 and 1983-2001) relatively wet were selected. During these periods (chock and validation), the daily medium flows are reconstituted with a Nash coefficients varying between of 0.66 to 0.89. The relative bias obtained ranged between +1.71 % and +11.68 % Agboville station.

The phytogeographical changes operated on the catchment result in to reduce evaporation and infiltration water blades, dune leaves, and to increase the streamed blade, in addition. These variations are also perceptible on the peaks of are believed and the minimum flows

Keywords : *modelling, catchment, CEQUEAU, Agneby, hydrological behaviour*

I - INTRODUCTION

Les bassins versants connaissent au cours de leur évolution d'importantes modifications du fait des activités anthropiques et des conditions climatiques. Si l'évaluation de leurs impacts est toujours approximative, celle du comportement hydrologique du bassin versant reste délicate du fait de la complexité spatiale et temporelle des différents paramètres et des équipements hydrauliques [1,2]. L'utilisation de modèle global n'est pas souvent recommandée. Seuls les modèles à utilisation spatiale peuvent contribuer à mieux comprendre le fonctionnement de tel type de bassin versant [3-5]. Ces derniers permettent en effet d'intégrer 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 la gamme très variée de ce type 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 ressource en

eau et à prendre en compte toute modification naturelle ou provoquée [1]. Son application au bassin versant de l'Agneby doit permettre, en outre la compréhension de l'interaction des divers processus auxquels est soumise l'eau des précipitations lorsqu'elle atteint la surface du bassin, jusqu'au moment où elle passe à l'exutoire de celui-ci [6,7]. 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, des détournements, des aménagements de grandes ampleurs etc... [2,7]. Le bassin de l'Agneby est aussi connu pour la diversité de son relief, ses sols et la dynamique dans son espace forestier conditionnée par son histoire agricole. La considération des caractéristiques physiographiques d'un bassin versant dans le modèle permet en outre de faire des prévisions sur son comportement hydrologique [8]. Le choix d'un tel modèle dans le cadre de l'aménagement intégré du territoire apparaît donc intéressant et souhaitable. Dans ce travail, la mise en évidence du comportement hydrologique du bassin versant de l'Agneby aura pour support l'occupation du sol de 1990 et de 2001. Ainsi, après un calage et une validation sur l'occupation du sol de 1990, les paramètres obtenus seront comparés à ceux de la simulation de l'occupation du sol de 2001.

II - MATÉRIEL ET MÉTHODES

II-1. Description du site de l'étude

La rivière Agneby est un cours d'eau côtier de direction nord-sud qui prend l'une des sources dans les environs des villages d'Affery dans le département de Bongouanou à l'altitude 205m. Ce cours d'eau s'écoule entièrement en territoire ivoirien. Il est situé géographiquement entre les latitudes 5°10 et 6°08 Nord, d'une part, et d'autre part, entre les longitudes 3°50 et 4°41 Ouest. Son bassin versant couvre une superficie d'environ 8500 km² et développe son lit sur environ 217 km. Ses affluents sont le M'pébo, le Kavi et le Séguié. La pente du bassin est assez régulière et relativement faible, soit 1,25m/km. Une grande partie du bassin se trouve en dessous de 100m avec une altitude moyenne de 105m.

Le bassin versant de l'Agneby fait partie du sud forestier ivoirien (*Figure 1*). Il est composé de quatre formations végétales [9]. Il s'agit des forêts marécageuses à *Symphonia globulifera* (Guittifères) et *Mitragyna ciliata* (Rubiacees), de la forêt dense sempervirente à *Diospyros* spp. (Ebénacées) et *Mapania* spp. (Cypéacées) 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.

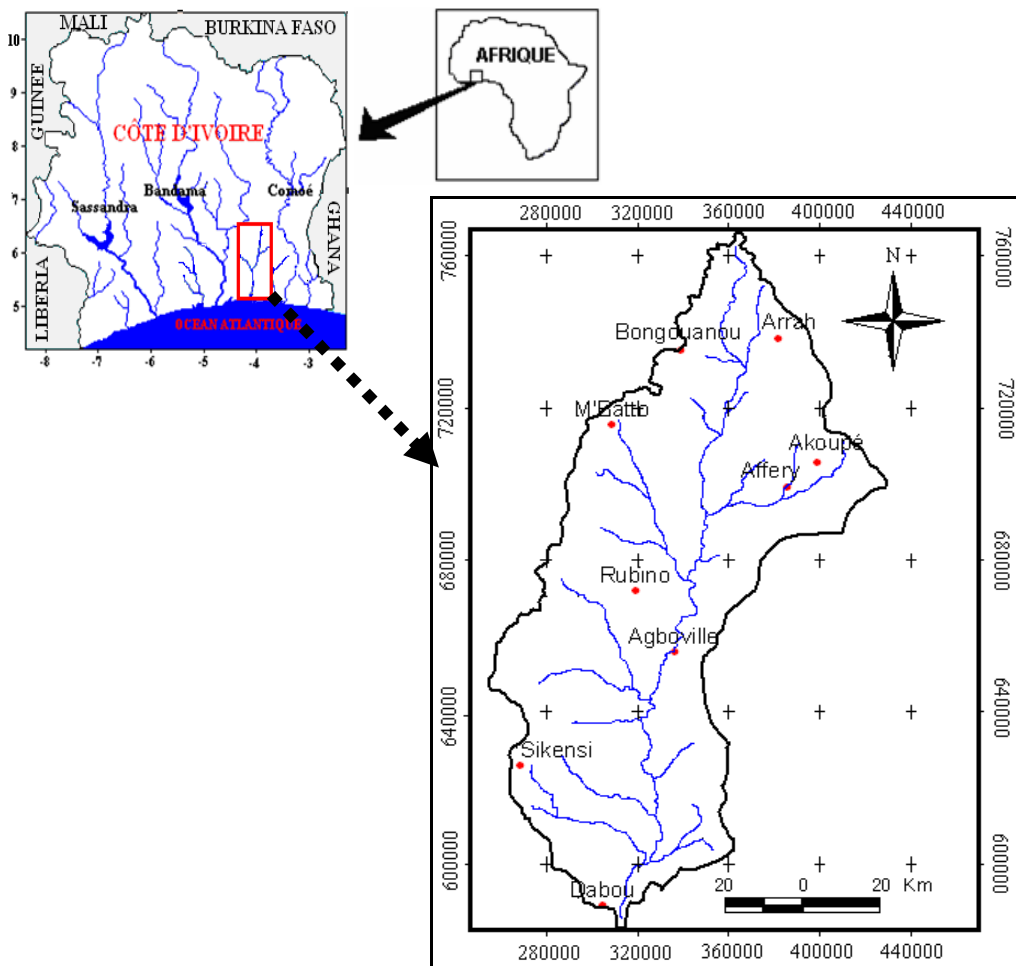


Figure 1 : Situation du bassin versant de l'Agneby

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 d'avril à juillet ; la petite saison des pluies (PSP) couvre les mois d'octobre et de novembre. Les saisons sèches s'étendent, pour la grande (GSS) de décembre à mars et la petite (PSS) d'août à septembre. La température moyenne sur le bassin varie très peu. Elle oscille entre 25°C et 27°C. L'agriculture est la principale activité du bassin. Elle représente en moyenne plus de 80 % de l'ensemble des activités menées.

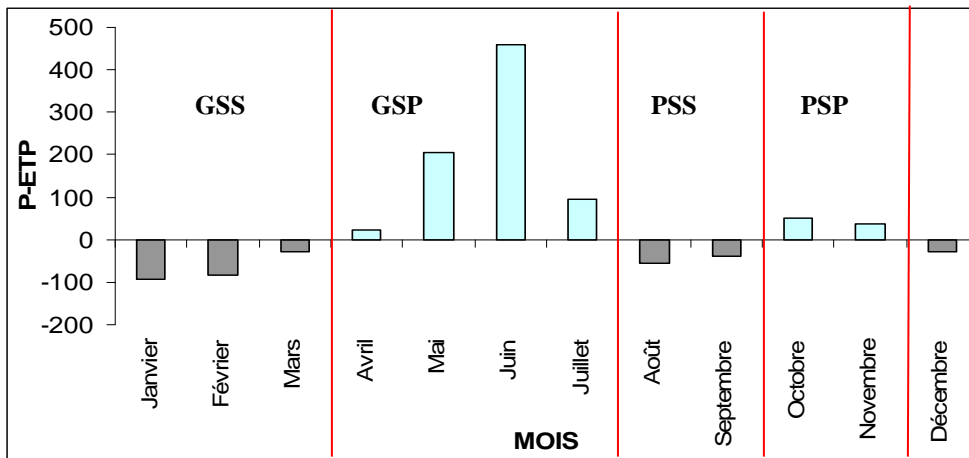


Figure 2 : Régime pluviométrique du sud du pays

GSP : grande saison des pluies ; PSP : petite saison des pluies

GSS : Grande saison sèche ; PSS : petite saison sèche

II-2. Données et méthodes

II-2-1. Présentation du modèle hydrologique distribué CEQUEAU

Le modèle hydrologique CEQUEAU est un modèle déterministe matriciel au pas de temps journalier qui permet 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» [10]. Le débit ainsi obtenu à l'exutoire du bassin entier résulte du transfert de la 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 et de fournir les débits aussi bien aux points de jaugeage qu'à n'importe quel autre endroit du bassin [1]. Il offre aussi la possibilité de simuler l'existence de réservoirs artificiels et de prendre en compte les variations spatiales des caractéristiques physiographiques. Le modèle permet d'effectuer les simulations au pas de temps de 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12 heures ou journalier. 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 ».

- **Fonction de production**

Elle a pour but de représenter de manière simple les différentes voies que suivra l'eau sur le bassin versant. 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 3**).

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 [11], 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".

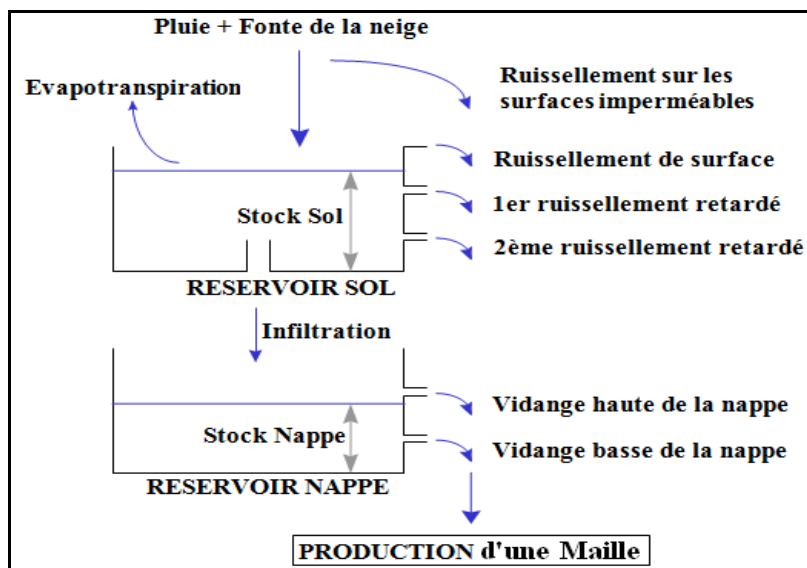


Figure 3 : Schéma de la fonction production d'une maille CEQUEAU

- **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 4**). Ce processus est répété de maille en maille jusqu'à l'exutoire du bassin.

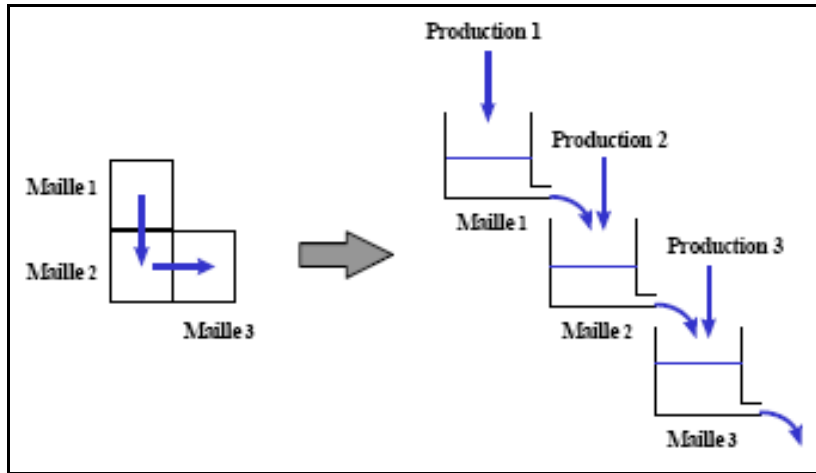


Figure 4 : Schéma de la fonction de transfert de CEQUEAU

- **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.

Pour le bassin de l'Agneby, 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.

- **Maillage du bassin**

Cette étape est rendue possible grâce à un Système d'Information Géographique (SIG) qui est le logiciel Mapinfo 8.0 ayant permis de représenter plusieurs couches d'informations devant être prises 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 des 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 avale, 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.

II-2-2. 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 I*). 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 d'Abidjan, 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			
Arrah	0003000	13-12	140
Adzopé	0001900	12-19	70
Agboville	0002200	16-21	40
Sikensi	0770000	15-19	90
Stations hydrométriques			Code carreau partiel
Guéssigué	504003	17-15	A
M'bessé	503503	17-22	A
Agboville	501009	16-22	A
Offoligué	501035	16-24	A

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 (images p196r56 et p196r55 du 30/12/1990 et du 01/02/2001). 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).

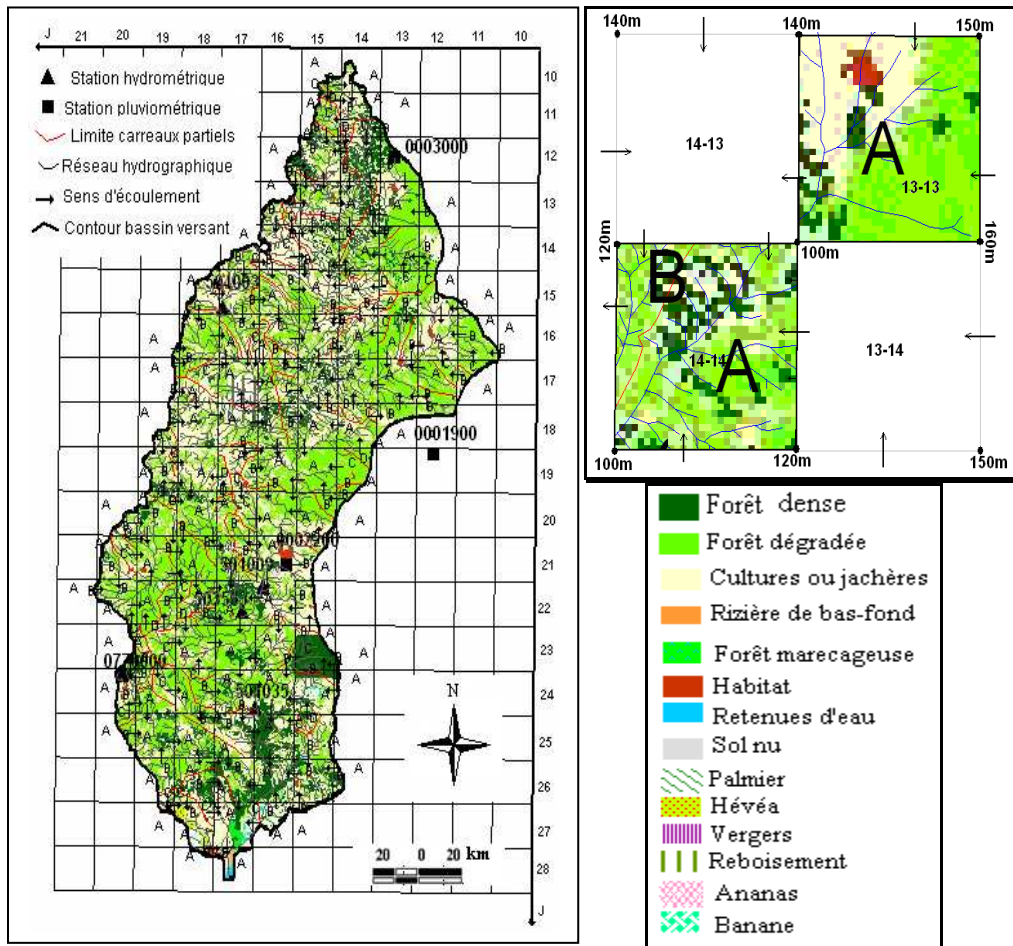


Figure 5: Discretisation spatiale du bassin versant de l'Agneby

II-2-3. 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, d'une part, calé (période de calage), et d'autre part, 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.

- **Critère de Nash**

Le critère de Nash et Stutcliffe [12] 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.

- **Méthode de corrélation**

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

II-2-4. 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 [13]. 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.

III - RÉSULTATS

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

Les données de télédétection et du SIG ont permis de fournir la base de données physiographique du bassin. Les cartes topographiques utilisées ont quant à elles permis de suivre le sens d'écoulement des eaux à travers la variation des pentes sur le bassin (*Figure 5*). On note à cet effet que les altitudes sur le bassin varient entre 10 et 300 m. La pente moyenne résultante vaut 12,5 % sur le bassin. 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 du bassin représentant les unités hydrologiques reliées au réseau hydrographique permettent de suivre le devenir des écoulements dans les rivières. Ainsi, la discrétisation du bassin versant a conduit à des mailles entières de 10 km de côté. 114 carreaux entiers et 214 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 [10]. On note aussi que chacune des quatre stations pluviométriques disponibles sur le bassin, couvre une superficie d'influence moyenne de 2111,25 km².

III-2. Simulation des écoulements sur le bassin

Les résultats du calage du modèle sur la période 1983-1987 (*Figure 6*) montrent que les débits journaliers simulés concordent assez bien avec les débits journaliers observés à la station de jaugeage d'Agboville. Les lames d'eau observées et simulées sont respectivement de 23,069 mm et 26,646 mm avec un coefficient de Nash de 0,66. Cette valeur du critère de Nash indique que le calage est assez satisfaisant car supérieure à 50 %. Quant au coefficient de corrélation calculé sur cette période, il 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 0,83 (*Figure 7a*), 0,87 (*Figure 7b*), 0,88 (*Figure 7c*) et 0,85 (*Figure 7d*) sur le

bassin versant de l'Agneby. Sur chacune des périodes, les lames d'eau moyennes observées et simulées sont respectivement de 29,797 mm et 38,101 mm (1988-1995), de 37,249 mm et 43,523 mm (1996-2001), de 32,201 mm et 42,276 mm (1988-2001) et de 30,73 mm et 37,026 mm (1983-2001). Les coefficients de corrélation obtenus sur chacune de ces périodes variant entre 0,88 et 0,95.

Ces résultats montrent une meilleure concordance entre les courbes des débits observés et simulés que sur la période de calage. Il ressort de l'analyse des résultats graphiques 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 de l'Agneby. Ces performances sont traduites par des valeurs du critère de Nash variant de 0,66 à 0,88 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. On note aussi une tendance à la surestimation des débits simulés (**Figures 8 et 9**) par rapport à ceux observés.

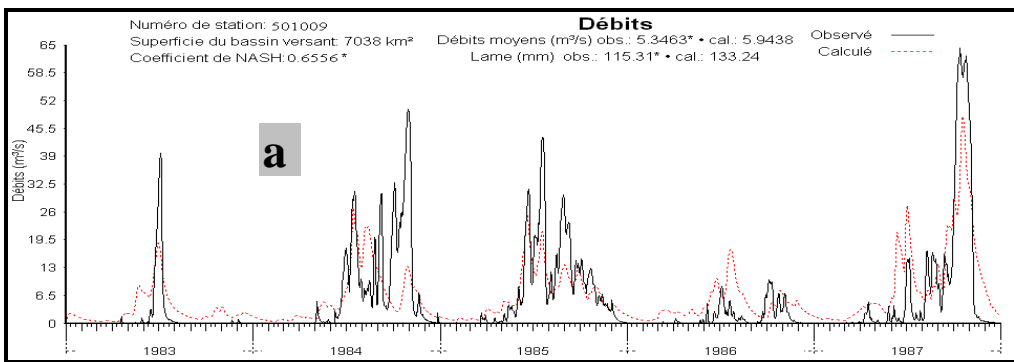
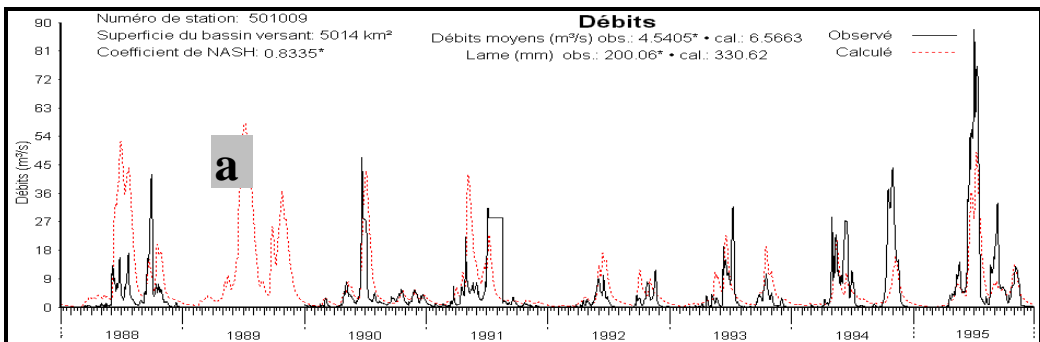


Figure 6 : Débits moyens journaliers interannuels observés et calculés sur la période de calibration (1983-1987) de la rivière Agneby à la station d'Agboville



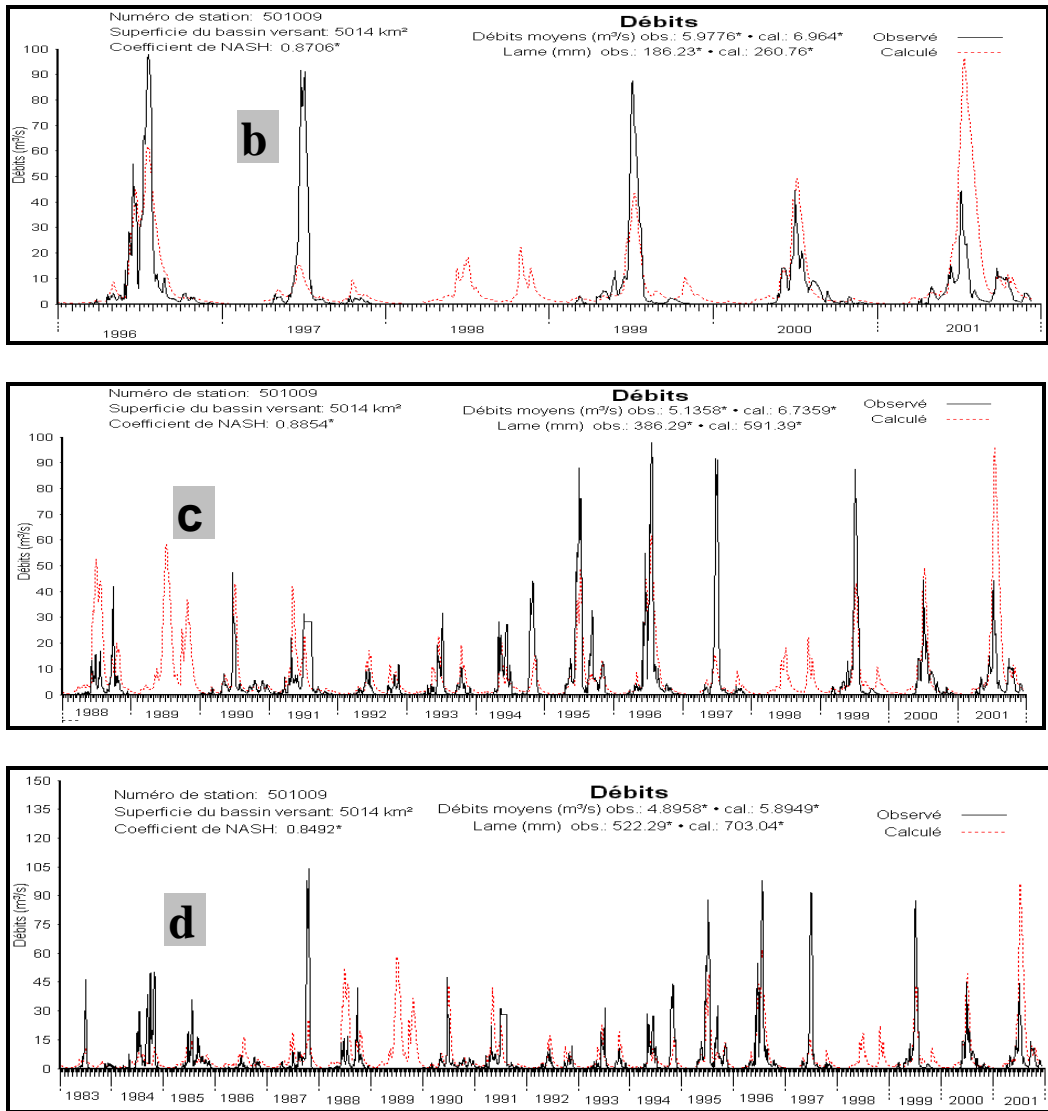


Figure 7 : Débits moyens journaliers observés et calculés sur les périodes de vérification 1988-1995 (a), 1996-2001 (b), 1988-2001 (c) et 1983-2001 (d) de la rivière Agneby à la station d'Agboville

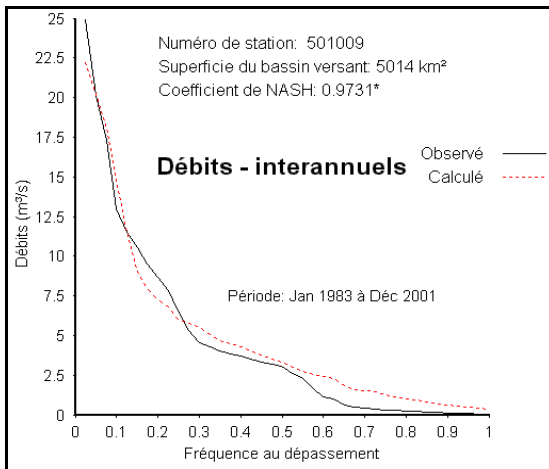


Figure 8 : Débits moyens journaliers classés à la station d'Agboville (1983-2001)

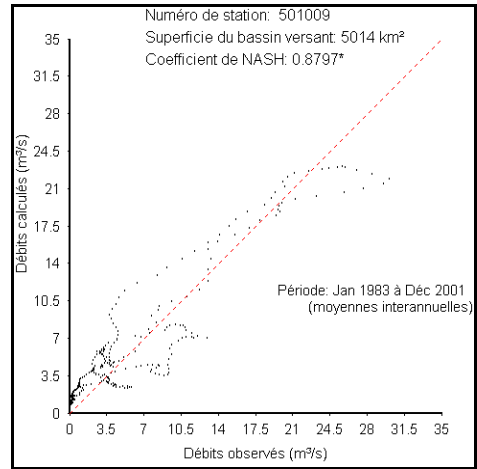
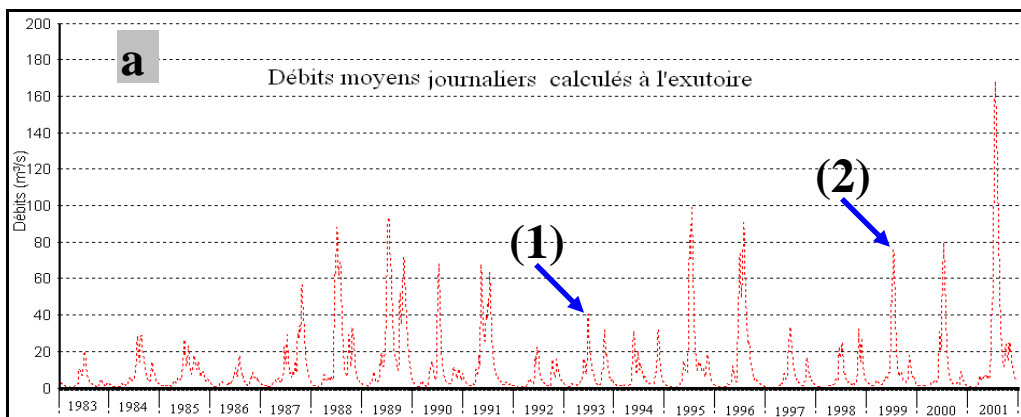


Figure 9 : Débits moyens journaliers (dispersion) à la station d'Agboville (1983-2001)

III-3. Comportement hydrologique du bassin

III-3-1. Réponse hydrologique du bassin

L'analyse des lames d'eau moyennes journalières issues de la simulation de l'occupation du sol de 1990 et de 2001 (*Figures 10a* et *10b*) à l'exutoire du bassin, met en évidence la variation des pics de crues (1)-(1') et (2)-(2') et des débits d'étiage. La variation des pics de crue entre ces deux dates est relativement faible et vaut environ $10\text{m}^3/\text{s}$. Quant aux débits d'étiage, ils sont devenus de plus en plus critiques.



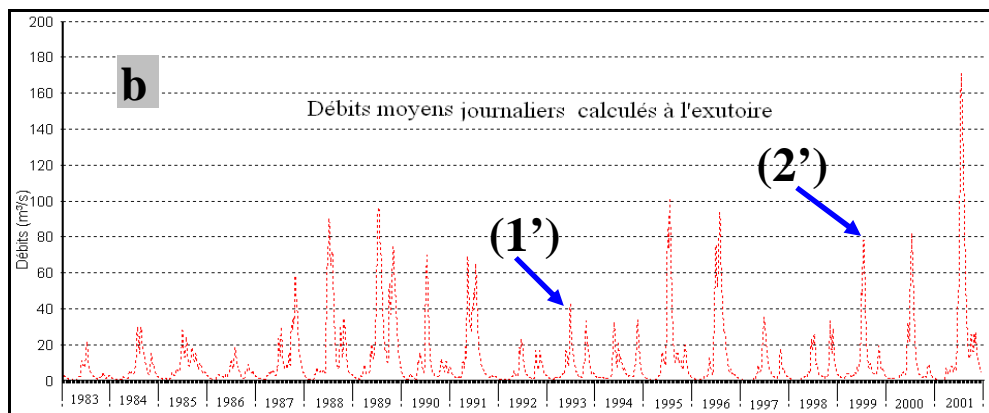


Figure 10 : Comparaison des débits moyens journaliers observés à l'exutoire sur l'occupation du sol de 1990 (a) et de 2001 (b)

III-3-2. Bilan hydrologique sur le bassin versant de l'Agneby

Les *Tableaux 2* et *3* présentent respectivement les bilans hydrologiques interannuels et mensuels sur la période 1983-2001, calculés avec le modèle CEQUEAU en simulant l'occupation du sol de 1990 et de 2001. La pluviométrie moyenne annuelle et mensuelle enregistrée respectivement sur le bassin en 1990 et 2001, varie entre 985,7 et 2082,7 mm et entre 18 et 290,9 mm. Ces types de pluviométries sont repartis entre l'évapotranspiration réelle (ETR), l'écoulement en rivière (R) et la recharge des réservoirs souterrains (I). Une première analyse des valeurs du bilan à l'échelle annuelle comme mensuelle de 1990 indique que les écoulements représentent en moyenne 3 à 15 % des précipitations. Le reste (la plus grande fraction) étant fortement évapotranspiré. Quant à la recharge interannuelle des réservoirs souterrains (infiltration), elle varie de -1,50 mm en 1983 à 57,92 mm en 2001. La valeur négative de l'infiltration enregistrée en 1983 fait suite à la grande sécheresse qui a touché la presque totalité du pays. Le modèle traduit bien cette période de sécheresse. Les autres valeurs restent variables en fonction de la hauteur de pluie incidente.

La comparaison des résultats relatifs à la simulation des deux cas d'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 établis montrent que les fractions d'eau évapotranspirées et infiltrées connaissent sur toute la période de l'étude une réduction, contrairement à la lame ruisselée qui connaît une hausse. L'examen du bilan moyen interannuel (*Tableau 2*) indique qu'avec un apport moyen d'eau précipitée de 1504,1 mm, sa

répartition entre les différents termes du bilan sur les deux types d'occupation du sol se fait de la manière suivante :

- la fraction d'eau évapotranspirée passe de 1446,18 mm à 1434,8 mm respectivement en simulant l'occupation du sol de 1990 et de 2001, ce qui représente un déficit de (-1,37 mm), soit un volume d'eau de $3,47 \times 10^6$ (-0,09 %).
- concernant la lame d'eau écoulée, elle représente 50,19 mm sur l'occupation du sol (OCS) de 1990 contre 51,85 mm sur celle de 2001, équivalent à un gain de (+1,66 mm), soit un volume $14,12 \times 10^6 \text{ m}^3$ (+3,25 %).
- quant à la lame infiltrée, elle varie entre 17,79 mm et 17,48 mm respectivement sur les types d'occupation du sol de 1990 et 2001. Cette variation représente un déficit de (-0,31 mm) correspondant à un volume d'eau de $2,63 \times 10^6 \text{ m}^3$ (-1,90 %).

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

ANNEES	Pluie moy	OCS 1990			OCS 2001			Δ ETR (%)	Δ R (%)	Δ I (%)
		ETR	R	I	ETR	R	I			
1983	985,7	964,4	23,1	-1,82	963,5	23,68	-1,50	-0,09	2,44	-2,67
1984	1345,2	1285,6	35,3	24,35	1284,6	36,38	24,26	-0,08	3,12	-0,64
1985	1509	1441,8	36,8	30,35	1440,5	38,37	30,14	-0,09	4,13	-1,04
1986	1172,4	1125,8	26,0	20,68	1125,2	26,62	20,58	-0,05	2,53	-0,92
1987	1713,4	1628,5	52,7	32,22	1626,8	54,45	32,11	-0,10	3,39	-0,51
1988	1745,4	1639,8	75,3	30,22	1637,6	77,88	29,89	-0,13	3,36	-1,64
1989	2082,7	1937,7	100,3	44,70	1933,9	104,25	44,57	-0,20	3,92	-0,38
1990	1492,2	1408,8	42,7	40,67	1407,7	44,13	40,41	-0,08	3,28	-0,85
1991	1546,8	1481,4	46,1	19,35	1480,1	48,02	18,66	-0,09	3,16	10,43
1992	1247,9	1186,9	28,7	32,38	1188,7	29,51	29,66	0,16	2,94	12,17
1993	1438,3	1373,9	38,7	25,76	1372,8	40,00	25,46	-0,07	3,40	-1,88
1994	1480,9	1418,0	36,5	26,43	1416,7	37,76	26,43	-0,09	3,39	0,01
1995	1658,9	1567,6	63,4	27,89	1565,7	65,67	27,58	-0,12	3,58	-1,74
1996	1558,9	1467,1	67,2	24,60	1465,3	69,51	24,10	-0,12	3,40	-3,39
1997	1205,5	1145,4	31,4	28,68	1144,5	32,36	28,64	-0,08	3,11	-0,20
1998	1384,7	1306,5	33,8	44,47	1305,3	34,71	44,65	-0,09	2,83	0,51
1999	1665,2	1602,9	49,8	12,49	1601,7	51,50	12,04	-0,08	3,48	18,16
2000	1447,5	1377,7	47,1	22,74	1376,3	48,58	22,58	-0,10	3,13	-1,22
2001	1898,2	1737,8	102,7	57,75	1734,4	105,86	57,92	-0,19	3,08	0,36
Moyenne	1504,1	1426,2	49,3	28,63	1424,8	51,01	28,33	-0,09	3,25	-1,90

Les bilans moyens mensuels établis sur la même période (**Tableau 3**) donnent les mêmes conclusions que les bilans interannuels. Il s'agit en l'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 décembre et janvier d'une part et de juillet et août de l'autre, les

valeurs de 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 couvrant 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 3 : Bilan hydrologique mensuel sur la période 1983-2001

MOIS	Pluie	OCS 1990			OCS 2001			ΔETR (%)	ΔR (%)	ΔI (%)
		ETR	R	I	ETR	R	I			
Janvier	18	24,2	0,44	-6,6	24,3	0,46	-6,73	0,41	4,55	1,97
Février	51,7	44,7	0,26	6,7	44,7	0,26	6,76	0,00	0,00	0,90
Mars	113,3	102,5	0,56	10,3	102,4	0,57	10,39	-0,10	1,79	0,87
Avril	183	156,9	0,97	25,2	156,5	0,99	25,50	-0,25	2,06	1,19
Mai	193,9	186,1	2,85	4,9	185,8	2,95	5,10	-0,16	3,51	4,08
Juin	290,9	245,4	7,12	38,5	244,7	7,37	38,89	-0,29	3,51	1,01
Juillet	123,3	143,1	12,35	-32,1	142,9	12,77	-32,29	-0,14	3,40	0,59
Août	74,6	87,9	4,54	-17,8	88,1	4,79	-18,26	0,23	5,51	2,58
Septembre	120,1	113,1	2,40	4,6	113	2,53	4,54	-0,09	5,42	-1,30
Octobre	204,4	182,8	3,99	17,7	182,4	4,17	17,84	-0,22	4,51	0,79
Novembre	99,2	120,9	3,49	-25,2	121	3,69	-25,49	0,08	5,73	1,15
Décembre	31,6	48,8	1,22	-18,4	49,1	1,29	-18,76	0,61	5,74	1,96

OCS : occupation du sol

ETR : évapotranspiration réelle

R : ruissellement

I : infiltration

IV – DISCUSSION

Les résultats de l'application du modèle CEQUEAU au bassin versant de l'Agneby a conduit à des valeurs des critères d'évaluation numérique (Nash et corrélation) et graphique assez acceptables. Les légers décalages constatés entre les débits observés et calculés (*Figures 6, 7a, 7b, 7c et 7d*) au cours des mois secs de décembre à mars, sont probablement dus aux prélèvements importants pour l'irrigation et l'alimentation des populations. Les demandes en eau des espèces animales et végétales étant importantes, vue la rareté de la ressource à ces moments de l'année. 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. Les meilleurs accords s'observent pendant la saison de pluie (avril à novembre) où les ouvrages de stockage sont tous remplis. Ainsi, les excédents pluviométriques contribuent à accroître le ruissellement sur le bassin. On note ici aussi une tendance à la surestimation des débits simulés par rapport à ceux observés (*Figures 9 et 10*). 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 [13-21]. Ces paramètres sont 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 prise en compte dans le modèle. Dans un second temps, il peut s'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 [22]. 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 dans l'espace peuvent avoir une incidence sur la réponse du bassin.

Les réponses hydrologiques obtenues de la simulation de l'occupation de 1990 et de 2001 du bassin de l'Agneby ont permis de mettre en évidence des variations relativement faibles des pics de crues et des débits d'étiage (*Figures 10a et 10b*). Ces faiblesses peuvent être liées aux types de transformation qui ont lieu lors de l'occupation du sol sur le bassin. La principale activité du bassin étant l'agriculture (près de 80 %), celle-ci se pratique en fonction des besoins des populations. Selon le **Ministère de l'Agriculture** [23], les cultures de cacaoyer de caféier et de banane plantain représentent à elles seules une proportion de près 82,44 % sur le bassin. Ces cultures, en se substituant au couvert forestier, prennent très rapidement le caractère arbustif à moyen terme. Ainsi, malgré le degré important de déforestation, il existe tout de même un couvert végétal qui réduit l'érosion des sols. Les écoulements rapides sont de ce fait, certainement ralentis dans le temps. Cela justifierait 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 [13,24-26]. Ces formes de mutations (déforestation et de 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 à partir de la simulation de l'occupation du sol de 1990 et de 2001 (**Tableau 2** et **3**) mettent en évidence la réduction des lames d'eau évapotranspirées et infiltrées et l'augmentation de celles ruisselées. Il résulte aussi de ces bilans une surestimation des lames d'eau évapotranspirées. Ces 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 [27]. 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 [28]. De plus, la formule de Thornthwaite utilisée dans le modèle pour le calcul de l'ETR néglige un temps soit peu les autres paramètres climatiques au profit de ceux liés à la couverture végétale. La faible variation des valeurs des lames d'eau évapotranspirées sur la période d'étude face aux variations des précipitations pourraient s'expliquer par une 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. En effet, 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.

V - CONCLUSION

L'étude du comportement hydrologique du bassin versant de l'Agneby a nécessité l'application du modèle hydrologique distribué CEQUEAU. L'intégration dans le modèle de la variabilité des données physiographiques surtout celles liées à l'occupation du sol des années 1990 et 2001 a conduit à réaliser ce travail. La prise en compte de la variabilité spatiale et temporelle de l'occupation du sol 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 permis d'obtenir 114 carreaux entiers de 10 km de côté et 214 carreaux partiels sur une superficie totale de 8495 km². Elle a aussi permis de prendre en compte des variabilités spatiales des catégories d'occupation du sol du bassin dans le modèle. Il ressort des résultats des simulations que les paramètres optimaux ont été obtenus pour des valeurs du critère de Nash variant de 0,66 à 0,88 sur l'ensemble des cinq périodes retenues pour le calage et la validation du modèle. Le coefficient de

corrélation calculé sur ces mêmes périodes indique des valeurs variant entre 0,88 et 0,95.

La transformation (tendance à la dégradation) de la surface du bassin de 1990 à 2001 a conduit à la réduction des lames d'eau évapotranspirées et infiltrées et à la l'augmentation des écoules. Aussi, la recharge des nappes sur le bassin a lieu au cours des mois de février à juin et de septembre à octobre. Spécifiquement, la dynamique de la surface du bassin versant de l'Agneby fait augmenter les pics de crue et réduit les débits d'étiage caractéristiques.

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, JP. FORTIN, JP. 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) 5-18.
- [4] - J. C. BAUDEZ, C. LOUMAGNE, CL. 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)165-184.
- [5] - Y. HUNDECHA and 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) 281-295.
- [6] - 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.
- [7] - M. AYADI, Z. BARGAOUI, « Modélisation des écoulements de l'oued Miliane par le modèle CEQUEAU ». *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 43.(5), (1998) 741-758.

- [8] - 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. (1972) 171-189: Environnement Canada (Ottawa, 9-12 mai 1972).
- [9] - J. M. AVENARD, M. ELDIN, G. GIRARD, J. SIRCOULON, P. TOUCHEBEUF, J. L. GUILLAUMET, E. ADJANAHOON et A. PERRAUD, « Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire ». Mémoire ORSTOM, N° 50, Paris : (1971) 391 p.
- [10] - [10]- G. MORIN et P. PAQUET, Modèle hydrologique CEQUEAU, INRS-ETE, rapport de recherche no R000926, (2007) 458p.
- [11] - C.W THORNTHWAITE, The climate of North America according to a new classification. *Geog. Rev.* 21 (4): (1931) 633-55.
- [12] - J. E. NASH and J.V. STUTCLIFFE, «River flow forecasting through conceptual models, part 1: a discussion of principles». *Journal of Hydrology*, 10(3), (1970) 282-290.
- [13] - V. ANDREASSIAN, 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.
- [14] - R. P. RUDRA, W.T. DICKINSON, and E.L. VON EUW, « The importance of precise rainfall inputs in nonpoint source pollution modeling ». *Trans. ASAE* 36: (1993) 445–450.
- [15] - VL. LOPES, «On the effect of uncertainty in spatial distribution of rainfall on catchment modelling». *Catena* 28: (1996) 107–119.
- [16] - [16]- I. CHAUBEY, C. T. HAAN, S. GRUNWALD and J. M. SALISBURY, - Uncertainty in the model parameters due to spatial variability of rainfall. *J. Hydrol.* 220 (1999) 48–61.
- [17] - 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) 287 p.
- [18] - 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.
- [19] - 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.

- [20] - 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.
- [21] - 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) 333 p.
- [22] - A. MARCHANDISE, « Analyse et modélisation hydrologique de l'évènement exceptionnel des 8 et 9 septembre 2002 sur le bassin versant du Gardon d'Anduze. Mémoire de DEA, Université Joseph Fourier, Grenoble, (2003) 70 p.
- [23] - MINISTERE 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.
- [24] - 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.
- [25] - S. BRENT et A. A. PAUL, « Les effets des coupes forestières sur l'écoulement des bassins versants selon le pourcentage de coupe ». Centre de recherche sur les bassins forestiers Nexfor/Bowater (2002).
- [26] - 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) 84-98.
- [27] - 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.
- [28] - 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), 452p.