

**ANALYSE DE LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE ET QUANTIFICATION DES RESSOURCES EN EAU EN ZONE TROPICALE HUMIDE : CAS DU BASSIN VERSANT DE LA LOBO AU CENTRE-OUEST DE LA CÔTE D'IVOIRE**

**A. B. YAO<sup>1</sup>, B. T. A. GOULA<sup>1</sup>, Z. A. KOUADIO<sup>1</sup>, K. E. KOUAKOU<sup>1</sup>,  
A. KANE<sup>2</sup> et S. SAMBOU<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Laboratoire Géosciences et Environnement, Université d'Abobo-Adjamé,  
02 BP 801 Abidjan 02, Côte d'Ivoire*

<sup>2</sup>*Ecole doctorale Eau, Qualité et usage de l'Eau, Université Cheikh Anta Diop,  
BP 5005 Dakar-Fann, Sénégal*

---

\* Correspondance, e-mail : [y\\_berth@yahoo.fr](mailto:y_berth@yahoo.fr)

## **RÉSUMÉ**

La baisse de la pluviométrie au cours de ces dernières décennies et la diminution des apports en eau de surface qu'elle entraîne ont pénalisées de nombreux projets de développement liés à l'eau dans le bassin du fleuve Sassandra. Du fait de l'accroissement de la demande en eau sur ce bassin, il se pose aujourd'hui un problème d'adéquation entre les ressources disponibles et les besoins actuels. Dans ce contexte, l'évaluation précise des ressources en eau de chacun de ses sous-bassins est indispensable à l'utilisation rationnelle de cette ressource. A cet effet, la présente étude vise à évaluer les ressources en eau du bassin versant de la Lobo dans un contexte de variabilité climatique.

L'analyse des données de pluies a permis d'identifier des ruptures en 1966 à Gagnoa et en 1972 à Daloa. Ces ruptures ont engendré un déficit respectif de 11 % et de 15 %. Pour les débits, la rupture est identifiée en 1969 à Nibéhibé. Les résultats du bilan hydrologique mettent en évidence une forte perte en eau sur le bassin. Les apports pluviométriques sont estimés à 15,58 milliards de m<sup>3</sup> dont, seulement 1,21 milliards de m<sup>3</sup> représentent le ruissellement et 1,40 milliards de m<sup>3</sup> constituent la recharge des nappes d'eau souterraine.

**Mots-clés :** *variabilité climatique, bilan hydrologique, ressources en eau, bassin versant de la Lobo, Côte d'Ivoire*

**ABSTRACT****CLIMATIC VARIABILITY ANALYSIS AND QUANTIFICATION OF WATER RESOURCES IN THE HUMID TROPICS : CASE OF LOBO WATERSHED AT WEST-CENTRAL OF CÔTE D'IVOIRE**

The rainfall decrease during the recent decades and surface water contribution decline which is led have penalized many development project in the watershed of Sassandra. With the water need growing on this watershed, available resources are no longer sufficient for the uses. In this context, a fair assessment of available water resources of each sub-watershed allows a rational management of these resources. For that purpose, the present study makes an evaluation of water resources in sub-watershed of the Lobo.

Statistic methods applied on rainfall series have showed breaks in 1966 (Gagnoa) and 1972 (Daloa). These breaks have caused a deficit respective to 11 % and 15 %. The flow rate data have also been analyzed. Indices hydrometrics results showed a break in 1969 (Nibéhibé). GR4J model use has permitted to assess hydrological budget parameters. These results allow to understand the significant loss of water on the sub-watershed of the Lobo. Annual rainfall contribution is 15,58 billions m<sup>3</sup> which only 1,21 billion m<sup>3</sup> is volume of flow and 1,40 billion m<sup>3</sup> represents groundwater recharge.

**Keywords :** *climatic variability, hydrological budget, water resources, watershed of the Lobo, Côte d'Ivoire.*

**I - INTRODUCTION**

Le bassin versant de la Lobo est situé dans le domaine forestier de la Côte d'Ivoire. A l'instar des autres régions forestières du pays, ces territoires constituent une zone par excellence de production de fève de café et de cacao. Dans les décennies 1960-1980, les vastes mouvements de colonisation foncière vont conduire à un accroissement démographique rapide [1] à cause de la main-d'œuvre considérable que nécessite cette culture exploitée de façon traditionnelle. Du fait de ces activités agricoles, ce patrimoine forestier va considérablement régresser [2] entraînant une baisse régulière des précipitations locales. Parallèlement à cette baisse locale des précipitations, les études sur les fluctuations climatiques montrent une baisse généralisée de la pluviométrie tant en Afrique de l'Ouest que sur la quasi-totalité du pays [3-8]. Cette baisse des pluies a entraîné celle des ressources en eau de surface et souterraine et par conséquent des disponibilités en eau. La principale conséquence de l'amenuisement de ces ressources est la pénurie d'eau constatée depuis quelques années au niveau des grandes villes ivoiriennes. Pour faire face à cette pénurie, d'importants travaux d'aménagements ont été réalisés en s'appuyant sur le réseau hydrographique. Ainsi, les eaux de surface constituent la principale

source d'approvisionnement en eau des populations ivoiriennes. C'est le cas des principales villes du bassin versant de la Lobo. Cependant, ces eaux de surface, traitées par la Société de Distribution d'Eau de Côte d'Ivoire (SODECI) ne desservent pas toutes les populations, surtout celles qui vivent en milieu rural. Le taux d'accès à l'eau potable des populations étant de 73 % en milieu urbain et de 50% en milieu rural [9]. On s'aperçoit que malgré les efforts consentis à l'échelle nationale, des difficultés demeurent car l'eau potable n'est pas encore accessible à tous. Cette insuffisance est accentuée par l'environnement géologique constitué par le socle cristallin.

En effet, il s'agit essentiellement de roches cristallines qui ne sont pas toujours aptes à contenir des aquifères productifs. La pression des besoins de plus en plus croissants sur les ressources en eau, dans ce contexte marqué par une tendance générale déficitaire, implique la planification et la mise en œuvre d'actions de développement en matière de gestion de ces ressources. Le premier secteur d'intérêt de la gestion des ressources en eau est l'estimation quantitative de cette ressource et ceci à l'échelle du bassin versant qui constitue le domaine privilégié des études hydrologiques. Une telle étude n'a pu être menée jusqu'à présent sur le bassin versant de la Lobo. L'objectif de cette étude est d'évaluer la disponibilité de l'eau sur le bassin de la Lobo. La démarche adoptée pour atteindre ce but consiste à analyser la variabilité interannuelle des pluies et des débits par le calcul des indices centrés réduits et par l'application du test de détection de rupture de Pettitt [10]. Cette approche consiste également à la simulation des écoulements des eaux par l'utilisation du modèle GR4J et à établir le bilan hydrologique du bassin.

## II - MATÉRIEL ET MÉTHODES

### II-1. Présentation de la zone d'étude

La rivière Lobo est un affluent du fleuve Sassandra. Son bassin hydrographique est situé au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire entre 6°2 et 7°55 de Longitude Ouest et 6° et 6°55 de Latitude Nord (*Figure 1*). La Lobo prend sa source dans la région de Séguéla, draine une superficie de 12 745 Km<sup>2</sup> et parcourt 355 Km avec un périmètre de 530 Km. Le relief du bassin, peu contrasté et peu varié est dominé par les plateaux de 200 m à 400 m d'altitude [11]. Les formations géologiques qui couvrent le bassin sont celles du Précambrien moyen dominées essentiellement par les granites, auxquels s'ajoutent quelques intrusions de schiste et de flysch. Le régime climatique est celui du domaine Guinéen caractérisé par un régime équatorial et subéquatorial à deux maxima pluviométriques. Le mois de Juin représente le pic de la grande saison pluvieuse et celui de septembre le pic de la petite saison des pluies. Les deux maxima sont séparés par un ou deux mois plus ou moins pluvieux. Le paysage est composé de forêt dense humide semi-décidue à

forêt défrichée mésophile. Les sols rencontrés sont de type ferrallitique fortement ou moyennement désaturés.

Les activités économiques sont assez diversifiées, cependant l'agriculture reste la principale activité génératrice de revenu. Elle occupe la majorité des populations. La dynamique agricole est basée essentiellement sur les cultures de rente pérennes (café, cacao, hévéa, palmier à huile), les cultures vivrières et les maraîchers. Le système agricole au départ extensif, évolue aujourd'hui vers une agriculture beaucoup plus intensive du fait de la raréfaction des terres cultivables [12]. L'élevage est une activité secondaire de la région. La population du bassin est estimée à 1194413 habitants [13] soit une densité de 94 habitants au Kilomètres carré. L'approvisionnement en eau potable des populations est assuré par les systèmes d'adduction d'eau de la SODECI pour les grands centres urbains et par le système d'hydraulique villageoise (HV) et d'hydraulique villageoise améliorée (HVA) pour les autres localités.

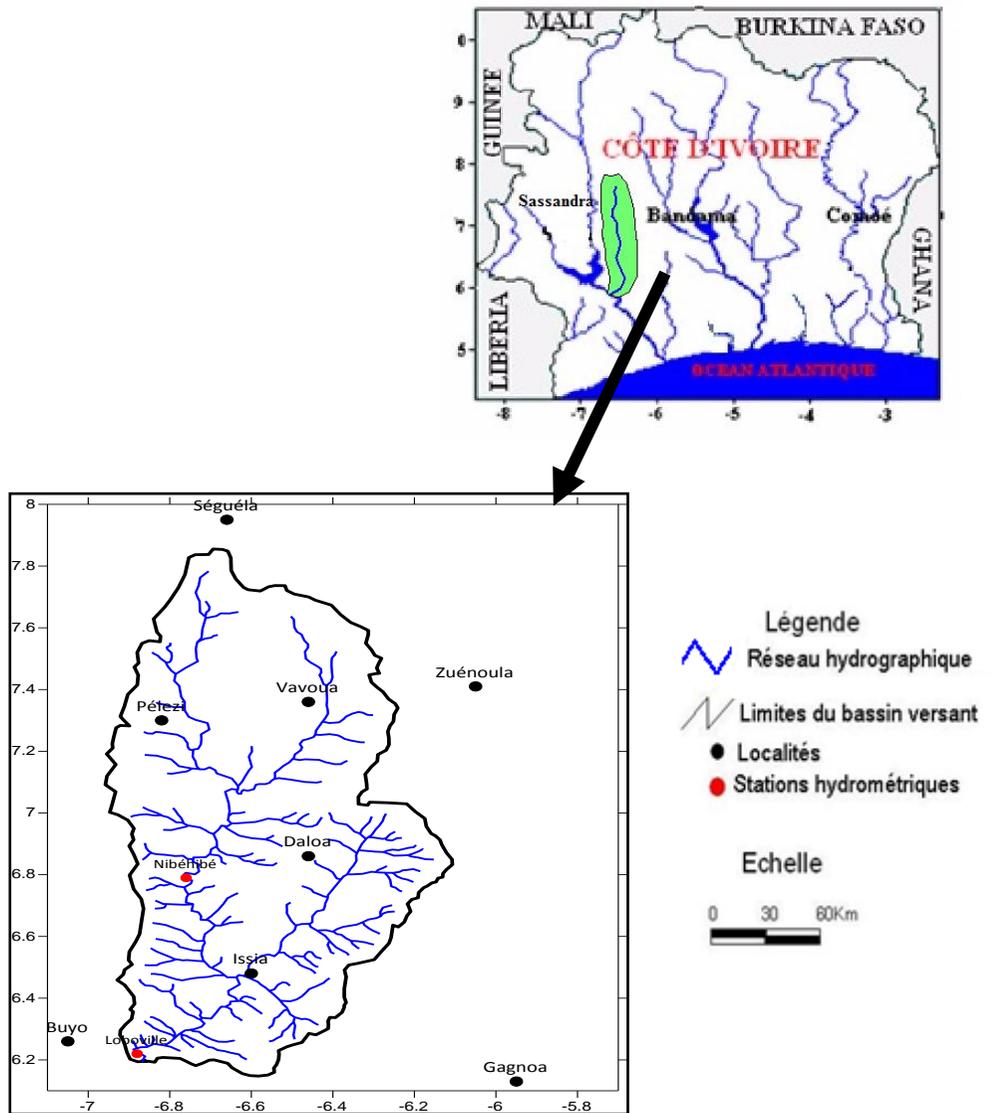
## **II-2. Données, Matériel et Méthodes**

### ***II-2.1. Données et matériel***

Les données climatologiques utilisées proviennent de la Société de Développement et d'Exploitation Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM), section Météorologie. Ce sont les données de pluies journalières de huit postes pluviométriques situés sur le bassin et de celles issues du voisinage immédiat. La taille des observations varie d'une station à une autre, les périodes d'observation se situent entre 1919 et 2008. Les paramètres climatiques tels que la température, l'insolation, l'humidité relative, la vitesse du vent et de l'évapotranspiration potentielle (ETP) observées à la station de Daloa ont également été collectés. Les périodes de mesures varient globalement entre 1981 et 2008. Les données hydrométriques collectées proviennent de la Sous Direction de l'Hydrologie, structure sous tutelle de la Direction de l'Hydraulique Humaine (DHH).

Le bassin ne dispose que de deux stations hydrométriques. Les débits journaliers et les modules mensuels sont disponibles sur la période 1961-2010 pour la station de Nibéhibé et 1988-2010 pour la station de Loboville. Les stations de Daloa et de Gagnoa ont été sélectionnées pour suivre la variabilité temporelle des précipitations parce qu'elles disposent d'une série longue et de bonne qualité.

L'analyse de la variabilité hydropluviométrique a nécessité l'utilisation de plusieurs logiciels. Les données pluviométriques du bassin étant de plusieurs générations, une homogénéisation a été réalisée avec le logiciel Hydraccess 4.2. Ce traitement a également permis de reconstituer les données manquantes à l'échelle annuelle. La chronique opérationnelle obtenue est ensuite soumise au traitement statistique avec le logiciel Khronostat<sup>TM</sup> 1.01 pour la détection d'éventuel changement de stationnarité dans les différentes séries.



**Figure 1 :** Localisation du bassin versant de la Lobo

L'application du programme EVC a permis de calculer les coefficients de tarissements et volumes d'eau mobilisés par les aquifères. La représentation graphique des résultats obtenus est réalisée sous Excel 2007. L'estimation de certains paramètres du bilan hydrologique tels que le ruissellement et l'évapotranspiration réelle (ETR) a été réalisée par l'utilisation du modèle GR4J. Dans le cadre de ce traitement le logiciel CROPWAT 8.0 a été utilisé pour le calcul de l'ETP journalière.

## II-2-2. Méthodes

### II-2-2-1. Méthodes d'analyse de la variabilité hydropluviométrique

Le calcul des indices pluviométriques et hydrométriques par les méthodes de Nicholson [14] et du filtre non récursif passe-bas de Hanning d'ordre 2 permettent de mettre en évidence les périodes excédentaires et déficitaires au sein d'une série chronologique. L'indice de Nicholson se définit comme une variable centrée réduite exprimée par l'équation suivante :

$$I_i = \frac{(X_i - \bar{X})}{\sigma} \quad (2.1)$$

avec :

$I_i$  : indice annuelle de la variable pluviométrique ou hydrologique

$X_i$  : module annuelle de la variable enregistrée au cours de l'année  $i$

$\bar{X}$  : moyenne interannuelle de la variable sur la période d'étude

$\sigma$  : Ecart type de la série hydroclimatique sur la période d'étude

Pour la méthode du Filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2, on procède d'abord au filtrage des données pour éliminer les variations saisonnières. Ce filtre est effectué au moyen des équations recommandées [15]. Selon cette méthode, chaque terme de la série est calculé de la manière suivante :

$$X_t = 0,06x_{t-2} + 0,25x_{t-1} + 0,38x_t + 0,25x_{t+1} + 0,06x_{t+2} \quad (2.2)$$

$$3 \leq t \leq (n - 2)$$

avec :

$x_{t-2}$  et  $x_{t-1}$  : totaux des écoulements observés de deux termes qui précèdent immédiatement le terme  $x_t$  ;

$x_{t+2}$  et  $x_{t+1}$  : totaux des écoulements observés de deux termes qui suivent immédiatement le terme  $x_t$

Les totaux des écoulements pondérés des deux premiers ( $X_1, X_2$ ) et des deux derniers  $X_{n-1}, X_n$  termes de la série sont calculés au moyen des expressions suivantes ( $n$  étant la taille de la série) :

$$X_1 = 0,54x_1 + 0,46x_2 \quad (2.3)$$

$$X_2 = 0,25x_1 + 0,50x_2 + 0,25x_3 \quad (2.4)$$

$$X_{(n-1)} = 0,25x_{(n-2)} + 0,50x_{(n-1)} + 0,25x_{(n)} \quad (2.5)$$

$$X_n = 0,54x_n + 0,46x_{(n-1)} \quad (2.6)$$

Pour mieux visualiser les périodes de déficit et d'excédent d'écoulement, les moyennes mobiles sont centrées et réduites au moyen de la formule suivante :

$$Y'_t = \frac{(X_t - m)}{\sigma} \quad (2.7)$$

où :

$m$  : est la moyenne de la série des moyennes pondérées et  $\sigma$  l'écart type de la série des moyennes mobiles pondérées.

Une vérification de la stationnarité des séries hydropluviométriques a été également effectuée par le test de Pettitt pour identifier les années charnières de changement de moyenne [10]. Ce test a été choisi parce qu'il est le plus robuste [4,16,17]. Pour les variables hydro-climatiques dont la série chronologique présente une rupture, on calcul les déficits pluviométriques et hydrométriques [18].

### II-2-2-2. Méthodes d'étude d'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau

Cette méthode consiste à rechercher une relation de cause à effet entre les précipitations et les débits produits au niveau des stations de contrôle du bassin sur des périodes similaires. En effet, la représentation graphique sur un même axe de temps des données de pluie (la cause) à celles de débit (l'effet) et cela aux différentes échelles temporelles permet de déterminer l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau de surface [8]. L'analyse a été réalisée à l'échelle annuelle par l'observation des valeurs centrées réduites des précipitations, de débits et des volumes d'eau mobilisés par les aquifères.

### II-2-2-3. Estimation des paramètres du bilan hydrologique

#### II-2-2-3-1. Structure et fonctionnement du modèle GR4J

Le modèle hydrologique GR4J « **G**énie **R**ural à 4 paramètres **J**ournaliers » est un modèle conceptuel global. Développé par le Cemagref d'Antony, GR4J se présente sous forme d'un tableur Excel et simule à pas de temps journalier des valeurs de débit à partir de données de la pluie moyenne du bassin P (mm), d'évapotranspiration potentielle ETP (mm) et des débits Q (m<sup>3</sup>/s). Le modèle possède deux réservoirs régulés par quatre paramètres à optimiser afin d'approximer au mieux la transformation de la pluie en débit. Il intègre notamment des hydrogrammes unitaires et une fonction d'échange en eau permettant de réguler les échanges avec l'extérieur du bassin (*Figure 2*). Ces réservoirs sont :

- un réservoir de production qui régit la fonction de production (réservoir sol S);
- un réservoir de routage régissant la fonction de transfert (réservoir de routage R).

La fonction de production assure la neutralisation entre la pluie et l'ETP et la répartition quantitative de l'eau dans le modèle. Elle équilibre au mieux le bilan en

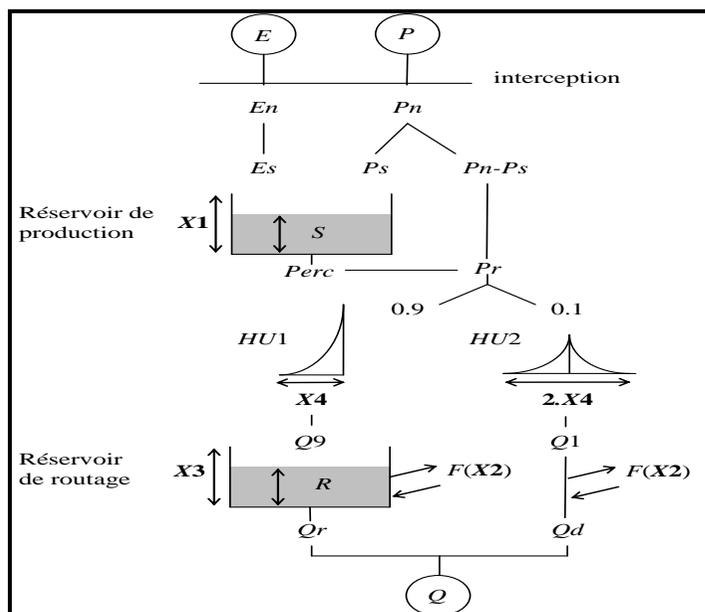
volume du bassin versant et traduit sa plus ou moins bonne aptitude à produire des écoulements. Le réservoir de production est régi par les paramètres  $X1$  et  $X2$ :

- $X1$ : la capacité maximale du réservoir de production (mm) ;
- $X2$ : le coefficient d'échanges souterrains (mm).

Quant à la fonction de routage, elle contrôle la répartition temporelle de l'eau qui alimente l'écoulement.  $X3$  et  $X4$  sont les paramètres qui régissent le réservoir de routage :

- $X3$  : la capacité maximale du réservoir de transfert (mm) ;
- $X4$ : le temps de base des hydrogrammes unitaires (j).

L'utilisation du modèle GR4J dans cette étude a pour objectif de simuler les écoulements à Loboville compte tenu des nombreuses lacunes présentes dans les observations de débits et d'estimer l'évapotranspiration réelle (ETR) afin d'établir le bilan hydrologique du bassin. Les données de débits journaliers de cette station sont disponibles sur la période 1988-2008. La pluie moyenne journalière du bassin est calculée par la méthode du Krigeage à l'aide du logiciel Hydraccess sur la période 1988-2008. Les données de l'ETP journalière ont été calculées à partir des paramètres climatiques de la station de Daloa, seule station synoptique située sur le bassin par la méthode de Penman Monteith-FAO.



**Figure 2** : Structure et mode de fonctionnement du modèle GR4J (Perrin et al., 2003)

L'expression de l'ETR pour un jour considéré dans la modélisation GR4J est donnée par l'expression suivante :

$$ETR = (ETP - E_n) + E_s \quad (2.8)$$

$E_s$  : Fraction d'évaporation retirée du réservoir de production

$ETP - E_n$  : Fraction de l'évaporation perdue lors de l'interception

Le bilan hydrologique est établi selon l'équation générale suivante :

$$P = Q + ETR + I \quad (2.9)$$

avec :

P : précipitation (mm)

Q : lame d'eau ruisselée (mm)

ETR : évapotranspiration réelle (mm)

I : lame d'eau infiltrée (mm)

### II-2-2-3-2. Calage et validation du modèle

La procédure de calage a consisté à déterminer les paramètres du modèle reproduisant au mieux les débits observés. L'optimisation de GR4J s'opère au travers de la fonction solveur de la feuille Excel. Les paramètres du modèle retenus sont les paramètres pour lesquels, les critères de qualité sont optimaux. Une fois, le calage réalisé, on procède à la validation du modèle qui consiste à tester le jeu de paramètres obtenu sur des données différentes de celles ayant servi au calage. Le calage et la validation du modèle GR4J ont été réalisés respectivement sur les périodes 1998-2000 et 1990-1996 avec une année de mise en route du modèle. Le critère de qualité choisit pour suivre cette optimisation est le critère de Nash (Q).

### II-2-2-3-3. Critère de qualité

La performance du modèle est vérifiée par une comparaison des débits calculés et observés à travers un critère de qualité. Le critère le plus connu et le plus utilisé avec les modèles conceptuels pluie-débit est celui de Nash [19] qui s'exprime par l'équation suivante :

$$Nash (Q) = 100 \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{calc,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \right] \quad (2.10)$$

$Q_{obs}$  et  $Q_{calc}$  sont les débits observés et calculés au pas de temps  $i$

$\bar{Q}_{obs}$  est la moyenne des débits observés sur la période considérée

Dans la pratique, on estime que la simulation est de mauvaise qualité lorsque le critère de Nash est faible (<60 %) ; elle est acceptable lorsqu'il est compris entre 60 % et 80 %, parfaite lorsqu'il est supérieur à 90 %.

### III - RÉSULTATS ET DISCUSSION

#### III-1. Résultats

##### III-1-1. Variabilité climatique

###### III-1-1-1. Variabilité interannuelle des pluies et des débits

L'évolution des indices de Nicholson associée à l'élimination saisonnière au moyen du Filtre de Hanning (*Figure 3*) montre que la variabilité pluviométrique du bassin est marquée par deux périodes climatiques bien tranchées. Une période à pluviométrie excédentaire observée sur les périodes 1943-1972 pour la station de Daloa et sur la période 1943-1965 pour la station de Gagnoa où le climat est globalement humide. Les périodes 1973-2008 (Daloa) et 1966-2002 (Gagnoa) sont caractérisées par des indices pluviométriques déficitaires correspondent à une longue période sèche. Au niveau de la station de Daloa, la sécheresse entamée se poursuit jusqu'à la fin de la période d'observation. Cependant, la station de Gagnoa présente depuis 2002, une ébauche de retour de la période humide.

La variabilité hydrométrique étudiée à Nibéhibé à travers l'évolution des indices centrés réduits doublée par le filtrage de Hanning permet de distinguer les périodes de fluctuations des modules annuels de débits suivantes :

- une période excédentaire de 1962 à 1969 marquée par une abondance des écoulements, indique une période humide ;
- une période déficitaire de 1970 à 1994 correspond à une période sèche marquée par une forte baisse des écoulements de la rivière notamment dans les années 1983-1984 ;
- une période excédentaire de 1995-2010 annonce un retour de l'humidité à la fin de la période d'observation.

###### III-1-1-2. Détection de ruptures dans les séries hydropluviométriques

L'application du test de Pettitt a permis d'identifier des ruptures dans les séries pluviométriques (*Tableau I*). L'hypothèse nulle d'absence de rupture a été rejetée aux seuils de confiance de 99 %, 95 % et 90 %. Ces ruptures ont été identifiées en 1972 (Daloa) et en 1966 (Gagnoa). L'identification de ces années de ruptures permet de distinguer deux périodes de fluctuations pluviométriques sur le bassin. Une période globalement humide avant 1972 (Daloa) et 1966 (Gagnoa) et une période sèche après ces dates. Contrairement à la pluviométrie, la série de débit étudiée ne présente aucune rupture majeure. En effet, l'hypothèse nulle d'absence de rupture est acceptée pour les trois seuils de confiance.

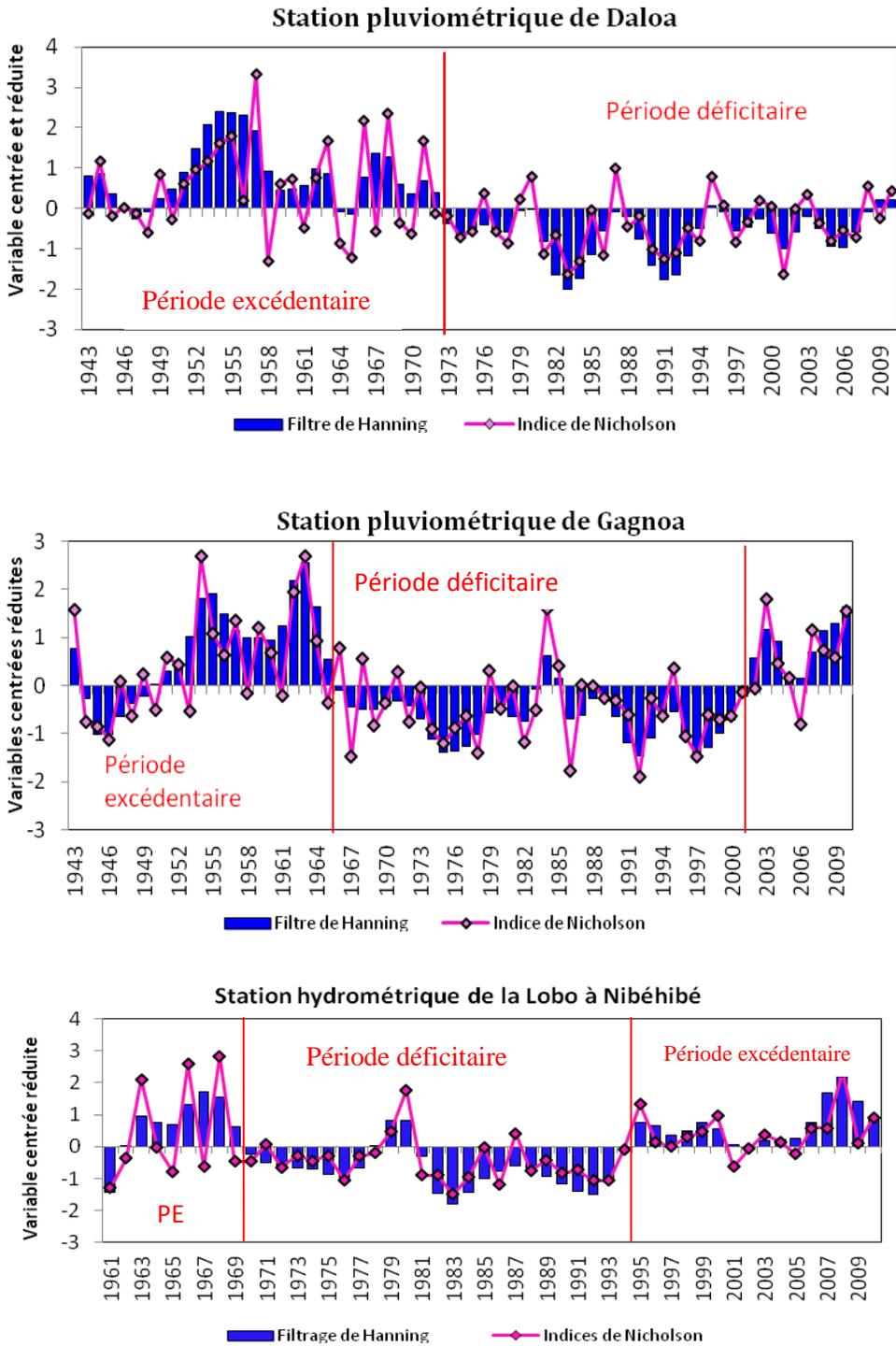


Figure 3 : Variabilité interannuelle des pluies (1943-2010) et des débits (1961-2010)

**Tableau I : Résultats du test de rupture de Pettitt (1979)**

Type de station	Nom de la station	Taille de la série (ans)	Année de rupture
Station pluviométrique	Daloa	68	1972
	Gagnoa	68	1966
Station hydrométrique	Nibéhibé	50	Absence de rupture

### III-1-1-3. Ampleur de la sécheresse

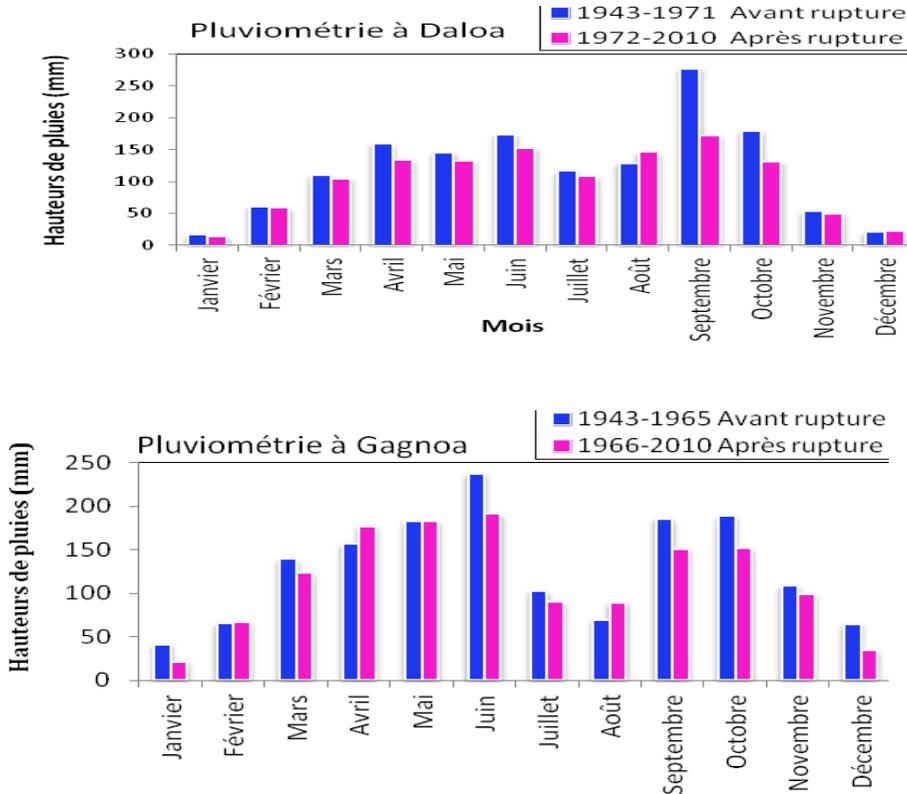
La pluie moyenne annuelle avant 1972 (Daloa) et 1966 (Gagnoa) était respectivement de 1437 et 1545 mm (*Tableau II*). Après ces dates, elle est passée à 1212 et 1366 mm respectivement entre 1973 et 2010 pour la station de Daloa et 1967 et 2010 pour la station de Gagnoa. Ceci correspond à un déficit 15 % (Daloa) et 11 % (Gagnoa). La baisse des précipitations est plus accentuée à l'intérieur du bassin par rapport au Sud.

**Tableau II : Déficit pluviométriques du bassin sur la période (1943-2010)**

Type de station	Nom de la station	Année de rupture	Moyenne avant rupture	Moyenne après rupture	Déficit (%)
Pluviométrique	Daloa	1972	1437,4	1212,6	-15,6
	Gagnoa	1966	1545,3	1366,1	-11,6
Hydrométrique	Nibéhibé	Absence de rupture	-	-	-

### III-1-1-4. Variabilité mensuelle des pluies

Les fluctuations mensuelles de la pluviométrie avant et après la rupture ont été analysées (*Figure 4*) afin de mieux caractériser les effets de la récession pluviométrique sur le milieu naturel et les activités socio-économiques au niveau du bassin versant de la Lobo. L'analyse des graphes montre que la distribution des précipitations mensuelles avant et après la rupture reste similaire. Ces variations indiquent que la succession des saisons ne connaît pas de changement significatif.



**Figure 4 :** Variation moyenne mensuelle interannuelle des précipitations avant et après rupture

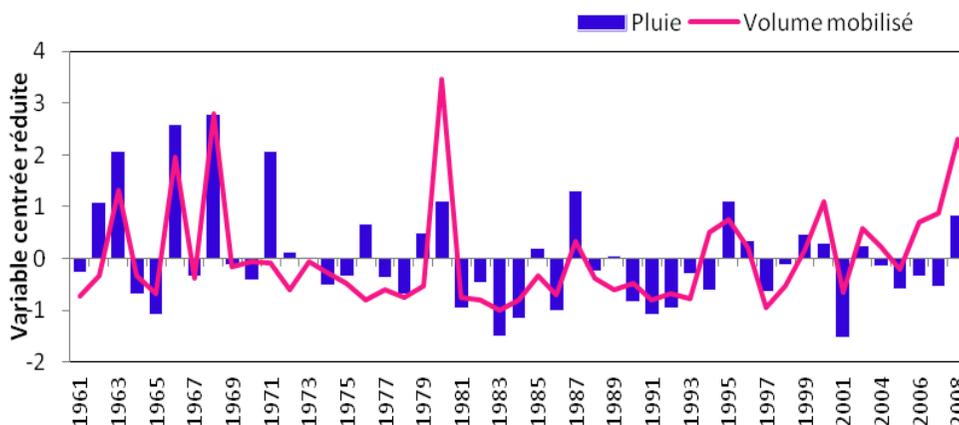
La différence notable réside dans le fait que les quantités d'eau précipitées après la rupture sont relativement en baisse quelques soient les saisons. Néanmoins, on constate qu'au mois d'Août la pluviométrie après rupture est supérieure à celle d'avant rupture aux niveaux des deux stations. L'observation générale montre que les mois les plus pluvieux (Septembre et Octobre) sont les plus affectés par la baisse de la pluviométrie. Les mois secs sont plus ou moins affectés par la baisse de la pluviométrie.

*III-1-1-5. Impact de la variabilité pluviométrique sur les ressources en eau*

*III-1-1-5-1. Sensibilité du régime hydrologique aux variations annuelles des pluies*

L'évolution comparée des indices pluviométriques et hydrométriques montre une coévolution des deux variables (Figure 5). L'analyse du graphique montre que les indices de pluies et de débits se superposent dans l'ensemble, quelque soit l'état d'humidité. Ainsi, aux années de déficits pluviométriques correspondent

globalement des années déficitaires en écoulement. Ceci permet de distinguer une période humide (1961-1971) et une période sèche (1972-1993). Toutefois, sur la période 1994-2010, on constate que l'incidence pluviométrique est peu observable. En effet, la réponse hydrologique du bassin est globalement excédentaire alors que la pluviométrie est restée déficitaire dans l'ensemble.



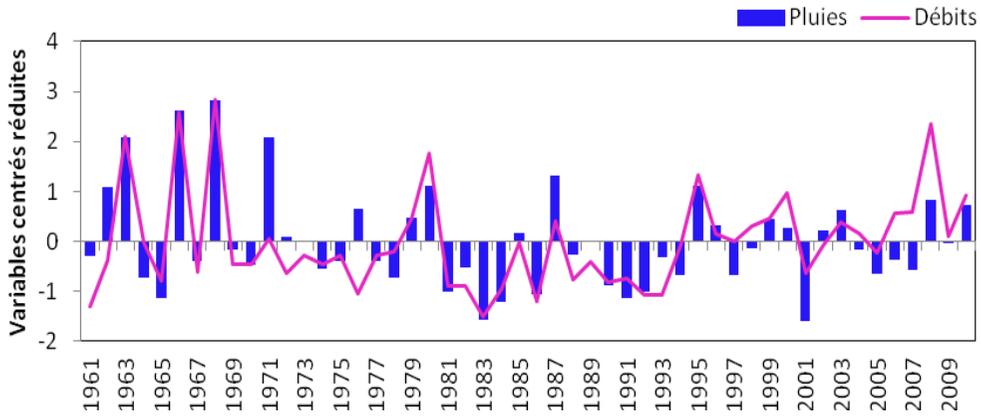
**Figure 5 :** Sensibilité du régime hydrologique de la Lobo aux variations annuelles de la pluie à Nibéhibé sur la période 1961-2010

### III-1-1-5-2. Influence de la variabilité pluviométrique sur les ressources en eau souterraine

Les indices de pluies et de volumes d'eau mobilisés par les aquifères ont été également comparés (*Figure 6*) sur la période 1961-2009. L'analyse des courbes montre que la pluie et les volumes d'eau mobilisés par les aquifères évoluent dans le même sens. Cependant, quelques particularités sont à noter :

- en 1971 et 1987, la recharge des nappes a été faible par rapport à l'excédent pluviométrique observé
- en 1980, on note une forte restitution des nappes malgré la médiocre disponibilité pluviométrique.

Toute fois, les années de déficits pluviométriques correspondent globalement à celles des déficits en volumes d'eau mobilisés. Ces observations sont les mêmes pour les années d'excédent pluviométrique et de volume d'eau mobilisé par les aquifères ; excédents pluviométrique et volume mobilisé évoluent pratiquement dans les mêmes proportions, surtout en période humide (1961-1969). En somme, ces résultats montrent que l'alimentation des aquifères du bassin se fait essentiellement par les eaux de pluies.

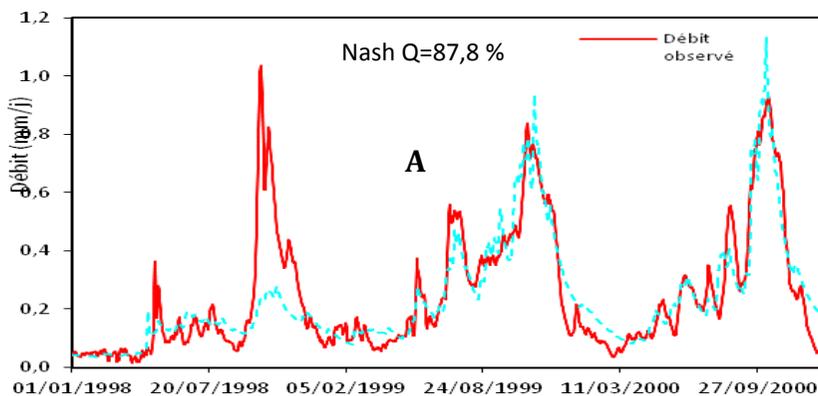


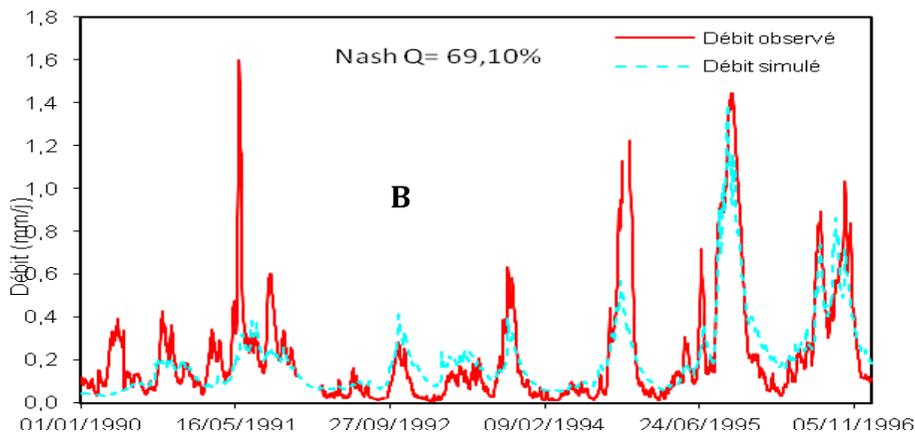
**Figure 6 :** Variabilité pluviométrique et du volume mobilisé par les aquifères à Nibéhibé

### III-1-2. Quantification des ressources en eau

#### III-1-2-1. Calage et validation du modèle GR4J

Le graphique de l'évolution des hydrogrammes calculés et observés (Figure 7) présente une bonne simulation des débits avec des coefficients de Nash de 87,80 % (calage) et 69,10 % (validation). Ces critères de Nash sont supérieurs à 60 %, les résultats de la modélisation sont donc satisfaisants. L'analyse du graphique montre que la dynamique des écoulements est bien respectée. Néanmoins, il faut noter que le modèle n'arrive pas à reproduire correctement les étiages ; les écarts observés étant dû au fait que le critère de Nash suivi est celui qui donne de l'importance aux débits élevés. Il ressort également une sous estimation des débits simulés pendant la période de contrôle du modèle, à ce niveau les débits de pointes ne sont pas reproduits.





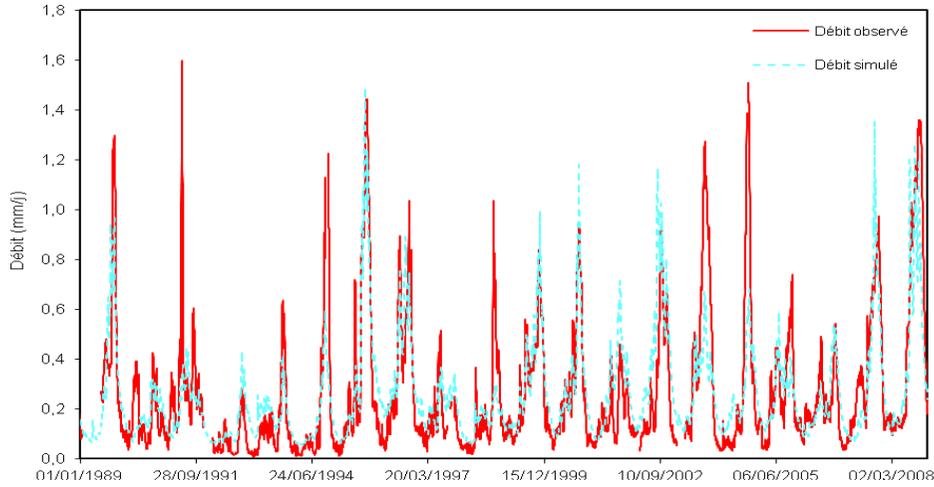
**Figure 7 :** Hydrogrammes observés et simulés en calage (A) et validation (B) à Loboville

### III-1-2-2. Résultats de la simulation des écoulements et bilan hydrologique du bassin

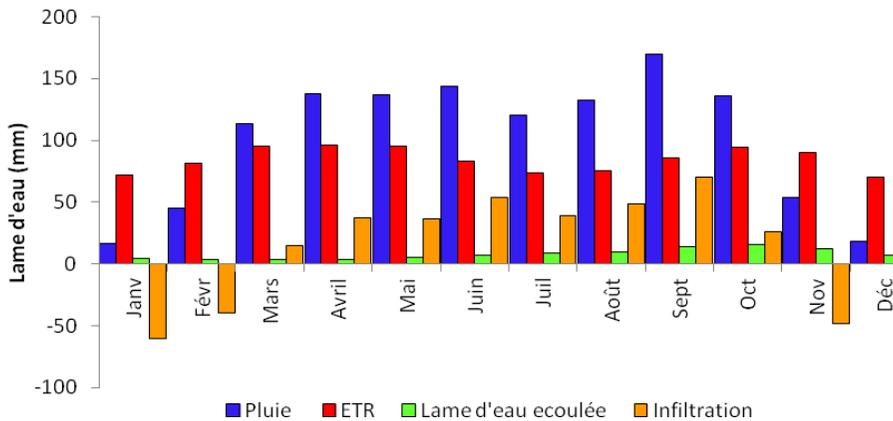
Le résultat graphique de la simulation des débits sur toute la période d'observation (1989-2008) (Figure 8) montre un assez bon synchronisme entre les lames d'eau calculées et observées. Bien que la reconstitution des hydrogrammes puisse être qualifiée d'acceptable dans son ensemble, les débits de pointe des hydrogrammes simulés sont sous-estimés, mais l'écart demeure acceptable.

L'observation de l'évolution saisonnière des termes du bilan (Figure 9) montre que la recharge des eaux souterraines varie en fonction des saisons de l'année. De Novembre à Février, l'infiltration est négative ; durant cette période qui correspond à la saison sèche, les hauteurs relativement faibles de la pluviométrie ne déterminent pas de surplus disponible pour la recharge des nappes d'eau souterraines.

Les écoulements sont quasi nuls et la demande évaporatoire définie par l'ETR reste supérieure aux précipitations durant cette période. De Mars à Octobre, les précipitations sont supérieures à l'ETR, l'infiltration devient positive ; le potentiel d'alimentation des nappes lié à l'importance de la pluviométrie, est maximal avec un pic observé en Septembre. Les écoulements prennent naissance avec la saison pluvieuse, leur évolution est similaire à celle des infiltrations. Cependant, le maximum des écoulements s'observe au mois d'Octobre. L'observation générale du graphique montre que sur le bassin de la Lobo, les infiltrations sont plus importantes que les écoulements durant toutes les saisons favorisant ainsi une bonne potentialité en eau souterraine.



**Figure 8 :** Hydrogrammes observés et simulés sur la période 1989-2008



**Figure 9 :** Variation saisonnière des paramètres du bilan hydrologique sur la période 1989-2008

Le bilan hydrologique moyen annuel établi sur la période 1989-2008 (Tableau III) montre que les apports pluviométriques annuels du bassin de la Lobo sont en moyenne de 15,58 milliards de m<sup>3</sup>. De cet important volume d'apport pluviométrique, seulement 1,21 milliards de m<sup>3</sup> transigent à la station Loboville soit 7 % de cet apport. Le volume annuel disponible pour l'alimentation des aquifères est de 1,40 milliards de m<sup>3</sup> en moyenne (soit 10 % des précipitations). La perte réelle en eau du bassin représente 83 % des précipitations. La pluie efficace constitue 17 % des précipitations dont 7 % pour l'écoulement et 10 % pour l'infiltration.

**Tableau III** : Bilan hydrologique moyen annuel du bassin de la Lobo sur la période 1989-2008

Paramètres du bilan	Lame d'eau en mm.an <sup>-1</sup>	Volume × 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> .an <sup>-1</sup>
Pluie (P)	1219,88	15,55
Evapo-transpiration réelle (ETR)	1014,2	12,93
Lame d'eau ruisselée (Q)	95,03	1,21
Infiltration totale (I)	110,65	1,41

### III-2. Discussion

L'étude de la variabilité climatique a permis de déceler des ruptures dans les séries pluviométriques en 1966 à Gagnoa et 1972 à Daloa. Ces résultats sont en accord avec ceux des travaux réalisés en Afrique de l'Ouest en général [5,16,17,20,21] et en Côte d'Ivoire en particulier [4,7,8,12,22]. Ces dates de rupture s'insèrent bien dans l'intervalle des résultats définis par ces travaux. Les déficits pluviométriques calculés par rapport aux années de ruptures identifiées sont compris entre 10 % et 20 % conformément aux travaux réalisés en Côte d'Ivoire [17]. Contrairement aux séries pluviométriques, la série de débits de la Lobo à Nibéhibé ne présente aucune rupture majeure. Selon cet auteur [5] l'absence de rupture est liée à la courte période d'observation des débits à cette station. En somme, la stationnarité du régime hydrologique de la Lobo s'écarte de la logique générale qui admet que les ruptures hydrométriques interviennent à la suite des ruptures pluviométriques [23]. En effet, la longueur de la série hydrométrique étudiée (1961-2008) pourrait être à l'origine de ce résultat [20].

La variation mensuelle des précipitations (avant et après rupture) a montré que la succession des saisons climatiques du bassin n'est pas affectée par la variabilité naturelle du climat, le changement constaté réside dans le fait que les quantités d'eau précipités après rupture sont relativement en baisse quelques soient les saisons. Ce résultat vient en complément à d'autres travaux effectués sur le bassin versant du N'Zi [24]. Cependant, les conclusions de cette même étude indiquent qu'il existe une tendance au raccourcissement de la saison des pluies. C'est également le cas des stations pluviométriques dont la variabilité hydroclimatique a été étudiée dans le Centre-Est de la Côte d'Ivoire [25]. Des résultats similaires ont été obtenus au Bénin [26] sur le bassin du Niger.

L'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau a été analysé par l'étude des relations pluie-débit et pluie-volume d'eau mobilisés par les aquifères. Sur la base de ces relations, il est clair que la variabilité hydrologique est calquée sur la variabilité pluviométrique [8,27]. Les résultats ont montré une incidence directe des déficits pluviométriques sur l'évolution hydrologique du cours d'eau.

On ne peut prétendre évaluer de façon précise les ressources en eau du bassin compte tenu des données insuffisantes (absence de mesures piézométriques et isotopiques), mais simplement nous proposons par cette étude des ordres de grandeur. L'utilisation du modèle GR4J a permis d'évaluer les principaux paramètres du bilan hydrologique. Les apports pluviométriques moyens du bassin de la période 1989-2008 sont estimés à  $15,58 \text{ Mm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$  pour une aire de réception de  $12745 \text{ Km}^2$  avec une ressource disponible constituée de  $1,21 \text{ Mm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$  de ressource mobilisable et de  $1,40 \text{ Mm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$  comme ressource renouvelable.

Le bassin est caractérisé par une importante perte en eau estimée à  $12,95 \text{ Mm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$  ( $1014,2 \text{ mm} \cdot \text{an}^{-1}$ ) soit 83 % des apports pluviométriques. L'évapotranspiration réelle (ETR) est un terme clé du bilan hydrologique. De la précision de son estimation, dépend celle du bilan hydrologique. Il est donc nécessaire de souligner que, le modèle GR4J a pour vocation est de simuler les écoulements de façon robuste et donc n'a pas fait l'objet de validation spécifique sur ce paramètre important. Cependant, la grandeur prise par ce paramètre lors de cette étude se situe dans une logique acceptable. En effet, la quantification de l'ETR par le modèle HYDROTEL appliqué sur le bassin du N'Zo [28] a donnée une valeur de  $1099,2 \text{ mm} \cdot \text{an}^{-1}$ ; celle du modèle CEQUEAU est de  $1434,8 \text{ mm} \cdot \text{an}^{-1}$  sur le bassin de l'Agneby. Par ailleurs, il faut noter que l'ETR reste conditionnée par la disponibilité en eau (sol et plante) et par les résistances aérodynamique et stomatique du milieu d'étude.

Ainsi, dans la zone sahélienne, une estimation des paramètres du bilan hydrologique sur le bassin versant expérimental de Barogo (Burkina Faso) a donnée une valeur de  $558 \text{ mm} \cdot \text{an}^{-1}$  [29]. Une étude plus complète, intégrant les caractéristiques physiographiques des bassins (nature géologique du substratum, les grands types de sols qui le constituent, le couvert végétal, la pente et les indices de compacité ainsi que l'occupation du sol) a donné une valeur de  $863,6 \text{ mm} \cdot \text{an}^{-1}$  [30]. L'infiltration ( $110,65 \text{ mm} \cdot \text{an}^{-1}$ ) obtenue dans cette étude constitue une approche globale de la capacité de recharge des aquifères du bassin ; en effet, le modèle GR4J ne prend pas en compte les états de surface et les prélèvements d'eau du bassin, de telle sorte que les  $1,40 \text{ Mm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$  de ressource renouvelable intègrent les pompages réalisés dans la nappe.

#### **IV - CONCLUSION**

L'analyse de la variabilité hydrométrique et pluviométrique du bassin versant de la Lobo a montré que la sécheresse pluviométrique entamée depuis 1972 à la station de Daloa se poursuit jusqu'à nos jours. Cependant, l'incidence de cette baisse pluviométrique est peu observable sur les écoulements puisque les indices de débits calculés montrent un excédent hydrométrique depuis 1994. L'analyse des variations de la pluviométrie moyenne mensuelle avant et après rupture montre que

la variabilité pluviométrique se manifeste par une baisse importante des quantités d'eaux précipitées avec un déficit de 15 %. Cette récession pluviométrique se répercute également sur les écoulements souterrains. En effet, les volumes mobilisés par les aquifères présentent une évolution calquée sur ceux des précipitations.

L'évaluation des ressources en eau de surface a été abordée par la mise en œuvre du modèle hydrologique conceptuel global GR4J. Les valeurs prises par le critère de Nash au calage et à la validation ont montrées que le modèle intègre bien les particularités du bassin. Ainsi, la simulation des débits sur la période 1989-2008 a permis d'estimer les principaux termes du bilan hydrologique. Les apports pluviométriques annuels du bassin de la Lobo sont en moyenne de 15,58 milliards de m<sup>3</sup>. De cet important volume d'apport pluviométrique, seulement 1,21 milliards de m<sup>3</sup> transitent à la station Loboville soit 7 % de cet apport. Le volume annuel disponible pour l'alimentation des aquifères est de 1,40 milliards de m<sup>3</sup> en moyenne (soit 10 % des précipitations). Le bilan hydrologique établi a permis de mettre en évidence une énorme perte en eau sur le bassin de la Lobo. L'évapotranspiration réelle est estimée à 12,95 milliards de m<sup>3</sup> an<sup>-1</sup>, soit 83 % des apports pluviométriques.

## RÉFÉRENCES

- [1] - T. Y. Brou, E. Servat, J. E. Paturel, 1998 - Contribution à l'analyse des interrelations entre activités humaines et variabilité climatique : cas du sud forestier ivoirien. Académie des sciences/Elsevier, Paris (France), t.327, série II a, pp.833-838.
- [2] - C. Noufou, 1998 - Déforestation et activités agricoles en cote d'ivoire: recherche d'un nouvel équilibre. Thèse de Doctorat, Faculté des études supérieures de l'Université Laval, 159p.
- [3] - P. Hubert, J. P. Carbonel, 1993 - Segmentation des séries annuelles de débit de grands fleuves africains. *Bulletin de liaison du CIEH*, 92, p 3-10.
- [4] - J. E. Paturel, E. Servat, B. Kouamé, J. F Boyer, N. H. Lubès et J. M. Masson, 1996. Procédures d'identification de ruptures dans des séries chronologiques Modification du régime pluviométrique en Afrique de l'Ouest non sahéenne. *International Association of Hydrology Sciences*, 234, pp.99-110.
- [5] - B. S. Ardoin, 2004. Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahéenne. Thèse de Doctorat de l'Université de Montpellier II (France), 440p.
- [6] - B. T. A. Goula, I. Savane, B. Konan, V. Fadika, G. B. Kouadio, 2006. Impact de la variabilité climatique sur les ressources hydriques des bassins de N'Zo et N'Zi en Côte d'Ivoire (Afrique tropicale humide). *Vertigo*, 7(1), 12p.

- [7] - A. M. Kouassi, 2007. Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit et ses impacts sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. Thèse de l'Université de Cocody, 210p.
- [8] - K. E. Kouakou, B. T. A. Goula, I. Savané, 2007. Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau de surface en zone tropicale humide : Cas du bassin versant transfrontalier de la Comoé (Côte d'Ivoire - Burkina Faso). *European Journal of Scientific Research*, 16 (1), pp.31-43.
- [9] - Ministère du Plan et du Développement, 2009 Stratégie de relance du développement et de réduction de la Pauvreté (DSRP), 180p.
- [10] - A. N. Pettitt, 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, 28 (2), pp.126-135.
- [11] - J. M. Avenard, 1971. Aspect de la géomorphologie in : Milieu naturel de Côte d'Ivoire. Mémoire ORSTOM, Paris, France, 50, pp.8-73.
- [12] - Y. T. Brou, 2005. Climat, mutations socio-économiques et paysages en Côte d'Ivoire. Mémoire de synthèse des activités scientifiques. Habilitation à Diriger des Recherches, Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 212p.
- [13] - Institut National de la Statistique. Recensement général de la population et de l'habitat 1998. Volume III : Données Sociodémographiques et économiques des localités. Tome 1 : Résultats définitifs par localité. Région du Haut Sassandra.
- [14] - S. E. Nicholson, 1980. The nature of rainfall fluctuation in subtropical West Africa, *Monthly Weather Review*, 108, pp.473 -487.
- [15] - P. D. Tyson, T.G.J. Dyer, M.N. Mametse, 2005. Security changes in South Africa rainfall: 1880 to 1972. *Quart J Roy Met Soc*, 101, pp817-833.
- [16] - H. Lubès-Niel, J. M. Masson, J. E. Paturel., E. Servat, 1998. Variabilité climatique et statistique. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. *Rev. Sci. Eau*, 11(3), pp.383-408.
- [17] - E. Servat, J. E. Paturel, N. H. Lubès-Niel, B. Kouamé, J. M. Masson, M. Travaglio, B. Marieu, 1999. De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne. *Revue des Sciences de l'Eau*, 12 (2), pp.363-387.
- [18] - G. Mahé et J. C. Olivry, 1995. Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale de 1951 à 1989, *Sécheresse*, 6 (1), pp.109-117.
- [19] - J. E. Nash, J. V. Sutcliffe, 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I: a discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10, pp.282-290.
- [20] - M. Ouédraogo, J.E. Paturel, G. Mahé, E. Servat, 2002. Conséquences des déficits pluviométriques observés depuis le début des années 1970 en Afrique de l'Ouest et Centrale : Normes hydrologiques, gestion et planification des ressources en eau. *IAHS Pub. N° 274*, pp149-156.

- [21] - D. Sighomnou, 2004. Analyse et redéfinition des régimes climatiques et Hydrologiques du Cameroun : perspectives d'évolution des ressources en eau. *Thèse de Doctorat d'Etat Université de Yaoundé 1*, Cameroun, 290p.
- [22] - T. D. Soro, N. Soro, Y M-S. Oga, T. Lasm, G. Soro, K. E. Ahoussi, J. Biémi, 2011. La variabilité climatique et son impact sur les ressources en eau dans le degré carré de Grand-Lahou (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire), *Physio-Géo*, Vol. 5, pp55-73.
- [23] - Z. A. Kouadio, 2011. Dynamique de l'occupation du sol et comportement hydrologique. Cas des bassins versants côtiers de l'Agnéby et du Boubo, Thèse Unique de Doctorat de l'Université d'A bobo-Adjamé, Côte d'Ivoire, 188p.
- [24] - A. M. Kouassi, K. F. Kouamé, Y. B. Koffi, K. B. Djé, J. E. Paturel, S. Oularé, 2010. Analyse de la variabilité climatique et de ses influences sur les régimes pluviométriques saisonniers en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. *Cybergéo: European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage*, 513, 29p.
- [25] - M. Koita, 2010. Caractérisation et modélisation du fonctionnement hydrodynamique d'un aquifère fracturé en zone de socle. Région de Dimbokro-Bongouanou (Centre Est de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat de l'Université de Montpellier II (France), 220p.
- [26] - Expedit Wilfrid Vissin ., 2007. Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger. Thèse de Doctorat de l'Université de Bourgogne (France), 267p.
- [27] - P. Valimba, H. H Simon, E. Servat, D. Hughes, 2005. Changing flows in Southern Africa and its relationships to rainfall variations. Colloque impacts et variabilité climatique Montpellier 2005, pp19.
- [28] - K.F. Kouamé, M. Bernier, D.L. Goné, M.B Saley, R. Lefebvre, N. Soro, A. Koudou, 2007. Intégration de données 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 de Télédétection*, Vol 7, n°1-2-3-4, pp.217-235.
- [29] - F. Milville, 1991. Etude hydrodynamique et quantification de la recharge des aquifères en climat soudano-sahélien: application à un bassin expérimental au Burkina Faso, *IAHS Publ.*, 199, pp.311-328.
- [30] - J. Wellens, M. Diallo, D. Dakouré, N.F Compaoré., 2007. Renforcement structurel de la capacité de gestion des ressources en eau pour l'agriculture dans le bassin du Kou. Rapport Technique 1, APEFE-DRI/CGRI, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, 127 p.