

Contribution des modèles hydrologiques et des SIG à l'étude de l'impact de la variabilité climatique et du changement de l'occupation du sol sur les ressources en eau du bassin versant de la Volta en Côte d'Ivoire

[Contribution of hydrological models and GIS to the study of the impact of climate variability and land-use change on water resources of the Volta watershed in Côte d'Ivoire]

Germain Miessan ADJA¹, Jacques Edoukou DJEMIN², Franck-Armstrong Okon N'DRI², Fernand Koffi KOUAME²⁻³, and Jean BIEMI²⁻³

¹Section des Sciences de la Vie et de la Terre (SVT), Département des Sciences et Technologies, École Normale Supérieure (ENS) d'Abidjan, 08 BP 10 Abidjan 08, Côte d'Ivoire

²Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE), Université Félix Houphouët-Boigny (UFHB), Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (UFR-STRM), 22 BP 582 Abidjan 22, Abidjan, Côte d'Ivoire

³Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT), Université Félix Houphouët-Boigny (UFHB), Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (UFR-STRM), 22 BP 801 Abidjan 22, Abidjan, Côte d'Ivoire

Copyright © 2019 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The water resources of the Volta watershed in Côte d'Ivoire are often destined for human consumption and the development of agro-pastoral or industrial activities. This study aims to characterize climate variability and its consequences and to analyze the dynamics of land-use on the water resources of this basin, from hydrological models and GIS. Since the rainfall decline, observed during the years 1963 to 1970, several periods of drought have been observed and have caused the disappearance of plant species, some water bodies and some areas of groundwater recharge. The determined rainfall during the period 1936 to 2002 is 1102.86mm with only a surplus of 87.30mm of which 5.68% is destined for surface runoff and 2.23% for groundwater recharge. The flow rate of rivers from 1990 to 1993 is $1.39\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ with a drying up coefficient of $6.95\cdot 10^{-2}\text{ j}^{-1}$ and a mobilized water volume by aquifers of only 0.028km^3 . These parameters determine a low hydraulic potential of the basin. Dominated by tree savannah or shrubby savannah (81.17%) in 1990, the degradation of the vegetation cover of the basin has had adverse effects on water resources. However, until the year 2000, the regeneration of gallery forest and dense tree savannah (from 8.48% to 16.01%) will favor the reconstitution of some water bodies. Thus, for an effective rehabilitation of the environment, it will be necessary to reinforce the strategic plans for adaptation to climate variability.

KEYWORDS: Climate Variability, Land-Use, Water Resource, Volta Watershed, Côte d'Ivoire.

RÉSUMÉ: Les ressources en eau du bassin versant de la Volta en Côte d'Ivoire sont souvent destinées à la consommation humaine et au développement des activités agro-pastorales ou industrielles. Cette étude vise à caractériser la variabilité climatique et ses conséquences et à analyser la dynamique de l'occupation du sol sur les ressources en eau de ce bassin, à

partir des modèles hydrologiques et des SIG. Depuis la baisse pluviométrique constatée durant les années 1963 à 1970, des périodes de sécheresse ont été observées et ont provoqué la disparition d'espèces végétales, de certains points d'eau et de certaines zones de recharge des nappes. La pluviométrie déterminée sur la période 1936 à 2002 est de 1102,86mm avec seulement un excédent de 87,30mm dont 5,68% sont destinés à l'écoulement de surface et 2,23% à la recharge des nappes. Le débit des cours d'eau sur la période 1990 à 1993 est de $1,39\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ avec un coefficient de tarissement de $6,95.10^{-2} \text{ j}^{-1}$ et un volume d'eau mobilisé par les aquifères de seulement $0,028\text{km}^3$. Ces paramètres déterminent un faible potentiel hydraulique du bassin. Dominé par la savane arborée ou arbustive claire (81,17%) en 1990, la dégradation du couvert végétal du bassin a eu des effets néfastes sur les ressources en eau. Cependant, jusqu'en 2000, la régénération de la forêt galerie et de la savane arborée dense (de 8,48% à 16,01%) va favoriser la reconstitution de certains plans d'eau. Ainsi, pour une réhabilitation effective de l'environnement, il faudra renforcer les plans stratégiques d'adaptation à la variabilité climatique.

MOTS-CLEFS: Variabilité Climatique, Occupation du Sol, Ressource en Eau, Bassin Versant de la Volta, Côte d'Ivoire.

1 INTRODUCTION

La variabilité climatique est généralement un effet de conditions naturelles du milieu [1]. Cependant, souvent les activités anthropiques accélèrent le processus. Dans le domaine de l'environnement, ces fluctuations peuvent également entraîner de sérieuses perturbations sur la faune et la flore [2]. La variabilité climatique serait à l'origine de la baisse pluviométrique observée en Afrique de l'Ouest depuis 1970 [3] [4]. Cette baisse a eu un impact sur la modification du cycle de l'eau et a entraîné des effets néfastes directs ou induits importants sur l'environnement humain et naturel. L'un de ces effets néfastes est la diminution des ressources en eau disponibles. Selon [5], en Côte d'Ivoire, les changements hydro-climatiques ont entraîné un tarissement de la majorité des points d'eau de surface et de nombreux puits, par conséquent une baisse importante du niveau piézométrique des aquifères. La baisse des pluies a donc entraîné celle des ressources en eau de surface et souterraine et par conséquent la disponibilité en eau [6]. Cette réalité se vit sur toute l'étendue du territoire en particulier dans le Nord-Est où une portion du bassin versant de la Volta s'illustre en tant que principal hydro-système régissant les ressources en eau de la région. Le bassin versant de la Volta, couvrant six pays de l'Afrique de l'Ouest (Burkina-Faso, Côte d'Ivoire, Ghana, Bénin, Togo, Mali) [7], présente d'énormes potentialités en terres irrigables évaluées à 1.513.000 ha pour le développement d'activités agricoles. Les ressources en eau de ce bassin peuvent favoriser également l'approvisionnement en eau potable de plusieurs centaines de populations ainsi que l'essor du secteur industriel. Au niveau de la Côte d'Ivoire, les affluents de ce bassin regorgent de nombreux barrages agro-pastoraux. Cependant, il est soumis à d'énormes contraintes dont la diminution et la dégradation de la qualité des ressources en eau, la disparition accélérée de cours d'eau secondaires, l'assèchement des zones humides et la diminution de la biodiversité [1]. Le contexte de variabilité climatique et de mutations spatiales suscite une évaluation de son potentiel hydrique en vue d'une gestion quantitative des ressources en eau. La présente étude vise à caractériser la variabilité climatique et ses conséquences et à analyser la dynamique de l'occupation du sol sur les ressources en eau du bassin versant de la Volta au niveau de la Côte d'Ivoire. L'évaluation et la gestion efficace desdites ressources d'un territoire requièrent une connaissance approfondie des processus hydrologiques ou hydrogéologiques mis en jeu, ainsi que leurs échelles de temps et d'espace particuliers [8]. Pour ce faire, les outils numériques d'aide à la prise de décision sont utilisés. Ils permettent d'intégrer des données multi-sources et de faire des analyses pouvant tenir compte des contraintes très diversifiées pour une optimisation de la gestion des ressources en eau [9]. Parmi ces outils, les modèles hydrologiques ou hydrogéologiques qui occupent une place de choix dans la compréhension des processus et interactions dynamiques entre les paramètres environnementaux et physiographiques intervenant sur un hydro-système, sont retenus. L'intégration de données géo-spatiales provenant de la télédétection et des Systèmes d'Information Géographiques (SIG) a contribué au développement de certains modèles hydrologiques ou hydrogéologiques et à l'adaptation de modèles préexistants par l'exploitation efficace des informations dérivées. La modélisation spatialisée devient alors un "bon outil" pour la compréhension du fonctionnement d'un hydro-système et la prise en compte des modifications de certaines variables comme l'occupation et l'utilisation des sols.

1.1 PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Le bassin versant de la Volta est situé au Nord-Est au niveau de la Côte d'Ivoire, entre les latitudes $8^{\circ}60'$ et $9^{\circ}94'$ Nord et les longitudes $2^{\circ}57'$ et $3^{\circ}60'$ Ouest (Figure 1). C'est un bassin transfrontalier dont la partie ivoirienne circonscrit les régions du Boukani (Bouna) et du Gontougo (Bondoukou). Son principal cours d'eau qui le draine est le fleuve Volta Noir qui prend sa source au Burkina-Faso. Le relief y est peu accidenté avec des altitudes variant de 200 à 550m. Il est caractérisé par un climat de type tropical humide, particulièrement chaud et relativement sec avec un régime pluviométrique uni-modal [10], une saison pluvieuse de juin à octobre et une saison sèche de novembre à mai. La couverture végétale dense au Sud de la zone d'étude

s'éclaircit et passe à la savane arborée et arbustive au Nord. Le fleuve de la Volta présente un régime qui s'apparente au régime tropical de transition [10]. Ce régime est caractérisé par une crue généralement unique en août, septembre et octobre suivie d'une décrue rapide en novembre et décembre. Au cours de cette période, interviennent le tarissement et la longue période de basses eaux de janvier à mai. Le Nord-Est de la Côte d'Ivoire est irrigué par plusieurs affluents de la Volta noire dont les plus importants prennent leur source dans l'Ouest et les zones de hautes altitudes de cette région. Les populations en majorité paysannes s'adonnent aux cultures vivrières (igname, maïs, mil, sorgho, riz, arachide), maraîchères (tomate, aubergine, gombo et piment) et du coton. À ces cultures, s'ajoute l'arboriculture constituée par les vergers de manguiers et d'anacardiers. La production animale est constituée de bovins, d'ovins et de caprins. Les sols sont de type ferrugineux et ferralitique moyennement et fortement désaturés. Au plan géologique, la zone d'étude appartient au domaine protérozoïque (Baoulé-Mossi) constituée de formations birimiennes (schistes, arkoses...) et tarkwaiennes (grès, arkoses, conglomérats quartzophylliteux...). Au plan hydrogéologique, la région abrite des aquifères de socle.

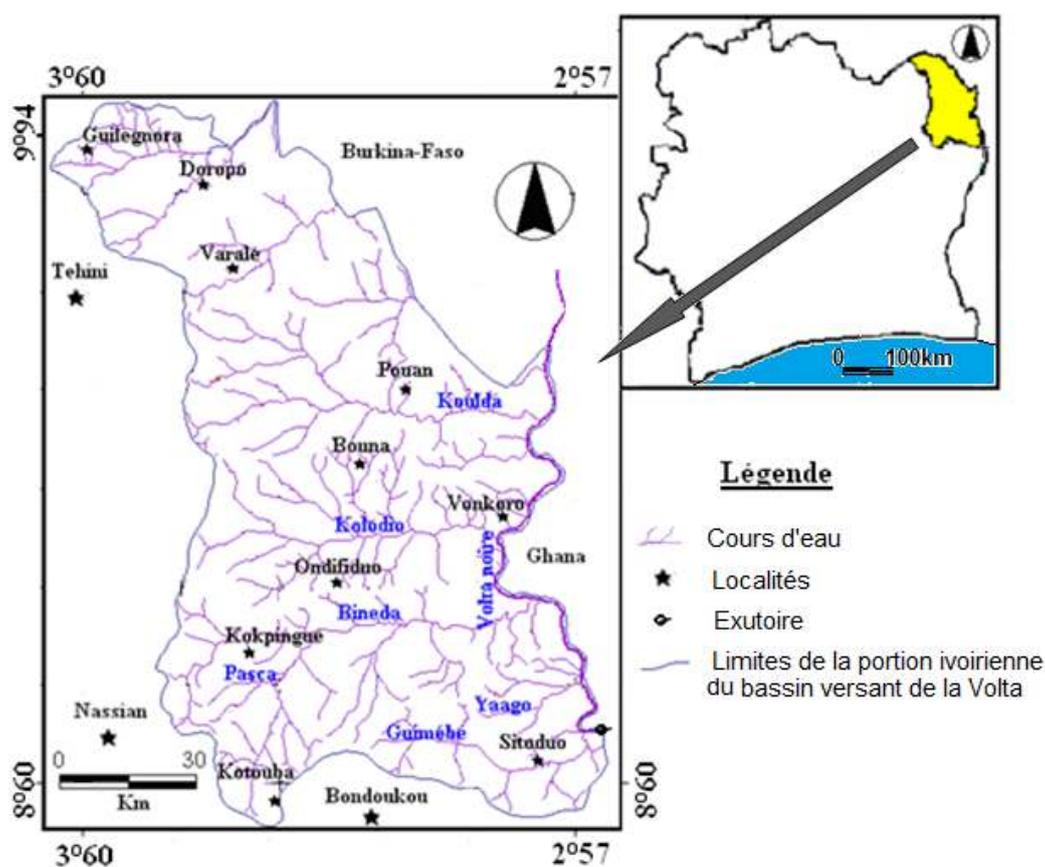


Fig. 1. Localisation de la zone d'étude

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 DONNÉES ET MATÉRIEL

Les données utilisées dans cette étude sont des données pluviométriques annuelles des stations hydrométriques des localités de Valaré, Bouna et Bondoukou sur la période 1936 à 2002, obtenues auprès de la Société de Développement Aéroportuaire et Météorologique (SODEXAM). Elles sont composées également de données hydrométriques qui concernent les moyennes mensuelles des débits des cours d'eau (période 1990-1993) mesurés à la station de jaugeage de la localité de Gbanlou (à Kokpingué). Elles sont obtenues auprès de la Direction des Ressources en Eau (DRE). À ces données, s'ajoutent aussi des données satellitaires composées d'images satellitaires et de Modèle Numérique d'Altitude de la zone d'étude. Les images satellitaires sont deux images mosaïquées Landsat TM ortho-rectifiées de format MrSID (Multi-resolution Seamless Image Database) datant de 1990 et de 2000, fournies par le site américain : <https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/>. D'une résolution

spatiale de 28,5m, ces images se composent des bandes spectrales TM7 (moyen infrarouge), TM4 (proche infrarouge) et TM2 (visible vert). Le MNA, avec une résolution spatiale de 90m, est fourni par le site américain : <ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version2/SRTM3/Africa> en format SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). La carte topographique du degré carré de Bouna, réalisée à l'échelle 1/200 000 par le Centre de Cartographie et de Télédétection (CCT) en 1996, a été utilisée pour reproduire le réseau hydrographique numérique. L'analyse de la variabilité hydro-pluviométrique et de l'évolution de l'occupation du sol a nécessité l'utilisation de plusieurs logiciels. Ainsi, le logiciel Khronostat 1.00 a été utilisé pour la détection éventuelle de rupture au sein des séries chronologiques de pluies. L'application du programme "Évaluation de la Variabilité Climatique" (EVC) a permis de faire le bilan hydrologique sur chaque station et de calculer les coefficients de tarissement et les volumes d'eau mobilisés par les aquifères. Le logiciel ENVI 4.3 a permis de faire la mosaïque des fichiers MNA et de traiter des images Landsat TM pour aboutir à l'élaboration de la carte d'occupation du sol de la zone d'étude. Le programme PCI Works V7.0 a été utilisé pour convertir le fichier de la carte d'occupation du sol au format ASCII. Ce format ASCII est acceptable par PHYSITEL 3.0 qui a permis de structurer les données d'occupation du sol.

2.2 MÉTHODES

La méthodologie de ce travail s'articule autour de la caractérisation de la variabilité climatique, ses conséquences et l'étude de la dynamique de l'occupation du sol sur les ressources en eau de la portion ivoirienne du bassin versant de la Volta.

2.2.1 CARACTÉRISATION DE LA VARIABILITÉ HYDRO-CLIMATIQUE

La caractérisation de la variabilité climatique sur la portion ivoirienne du bassin versant de la Volta est conduite par le calcul d'indices climatiques à l'aide du filtre non récursif passe-bas d'ordre 2 de HANNING et la détection de ruptures dans les séries hydro-climatiques. Concernant spécifiquement l'écoulement des cours d'eau, le bilan hydrologique est établi et le régime du tarissement et les volumes d'eau mobilisées sur le bassin sont déterminés.

2.2.1.1 CALCUL D'INDICES PLUVIOMÉTRIQUES À L'AIDE DU FILTRE PASSE-BAS NON RÉCURSIF DE HANNING D'ORDRE 2

Les indices pluviométriques permettent de mettre en évidence les périodes excédentaires et déficitaires au sein d'une série chronologique. Leur calcul dans ce travail est effectué par la méthode de HANNING (méthode des moyennes mobiles pondérées, centrées et réduites) qui est un filtre passe-bas non récursif d'ordre 2. Sa mise en œuvre est réalisée au moyen de l'équation 1 [11] présentée par [12]:

$$X_{(t)} = 0,06X_{(t-2)} + 0,25X_{(t-1)} + 0,38X_{(t)} + 0,25X_{(t+1)} + 0,06X_{(t+2)} \quad (1)$$

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

Où, $X_{(t)}$ est le total pluviométrique pondéré du terme t ;

$X_{(t-2)}$ et $X_{(t-1)}$ sont les totaux pluviométriques observés de deux termes qui précèdent immédiatement le terme t ;

$X_{(t+2)}$ et $X_{(t+1)}$ sont les totaux pluviométriques observés de deux termes qui suivent immédiatement le terme t .

Les totaux pluviométriques pondérés des deux premiers termes [$x_{(1)}$, $x_{(2)}$] et des deux derniers termes [$x_{(n-1)}$, $x_{(n)}$] de la série sont calculés au moyen des équations 2 à 5 :

$$x_{(1)} = 0,54x_{(1)} + 0,46x_{(2)} \quad (2)$$

$$x_{(2)} = 0,25x_{(1)} + 0,50x_{(2)} + 0,25x_{(3)} \quad (3)$$

$$x_{(n-1)} = 0,25x_{(n-2)} + 0,50x_{(n-1)} + 0,25x_{(n)} \quad (4)$$

$$x_{(n)} = 0,54x_{(n)} + 0,46x_{(n-1)} \quad (5)$$

Où, n est la taille de la série.

Pour mieux visualiser les périodes pluviométriques déficitaires et excédentaires, les moyennes mobiles sont centrées et réduites à l'aide de l'équation 6 :

$$y'_{(t)} = \frac{(x_{(t)} - m)}{s} \quad (6)$$

Où, \bar{m} est la moyenne de la série des moyennes mobiles pondérées ;
 s est l'écart-type de la série des moyennes mobiles pondérées.

2.2.1.2 DÉTECTION DE RUPTURES DANS LES SERIES HYDRO-CLIMATIQUES A PARTIR DU TEST DE PETTITT

Une "rupture" peut être définie de façon générale par un changement dans la loi de probabilité d'une série chronologique à un moment donné le plus souvent inconnu [13]. En climatologie ou hydrologie, ce changement marque une modification du régime pluviométrique ou hydrologique. L'une des méthodes réputées et couramment utilisée pour mener cette détection est le test de PETTITT [14]. La méthode BAYÉSIENNE DE LEE ET HEGHINIAN [15] est parfois utilisée.

- **TEST DE PETTITT**

C'est un test non-paramétrique dérivé du test de MANN-WHITNEY [16]. Pour ce test, l'absence de rupture dans la série (X_i) de taille N constitue l'hypothèse nulle. La mise en œuvre du test suppose que pour tout instant t compris entre 1 et N , les séries chronologiques (X_i) $i=1$ à t et $t+1$ à N appartiennent à la même population. La variable à tester est le maximum en valeur absolue de la variable $U_{t,N}$ définie par l'équation 7 :

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij} \quad (7)$$

Où, $D_{ij} = \text{sgn}(X_i - X_j)$ avec : $\text{sgn}=1$, si $X_i > X_j$;
 $\text{sgn}=0$, si $X_i = X_j$;
 $\text{sgn}=-1$ si $X_i < X_j$.

Au cas où l'hypothèse nulle est rejetée, une estimation de la date de rupture est donnée par l'instant t définissant le maximum en valeur absolue de la variable $U_{t,N}$.

- **METHODE BAYESIENNE DE LEE ET HEGHINIAN**

La méthode BAYÉSIENNE DE LEE ET HEGHINIAN [15] vise à confirmer ou à infirmer l'hypothèse d'un changement de moyenne dans la série. Elle consiste à déclarer la série stationnaire ou non en analysant la densité de probabilité a posteriori de la position du point de rupture. Il s'agit d'une approche paramétrique dont l'application sur une série nécessite une distribution normale des valeurs de celle-ci. L'absence de rupture dans la série constitue l'hypothèse nulle. La procédure repose sur le modèle (système d'équations) suivant :

$$X_i = \begin{cases} \mu + \varepsilon_i & i = 1, \dots, \tau \\ \mu + \delta + \varepsilon_i & i = \tau + 1, \dots, N \end{cases} \quad (8)$$

Où, les ε_i sont indépendants et normalement distribués, de moyenne nulle et de variance σ^2 ;
 τ représente la position de la rupture dans le temps ;
 δ l'amplitude du changement sur la moyenne.

- **CALCUL DES DEFICITS**

A la détection des ruptures hydro-climatiques s'associe le calcul de déficits. En effet, les variations moyennes de part et d'autre de la rupture permettent d'évaluer les déficits induits par ces ruptures. Ce déficit s'obtient à partir de l'équation 9 [17] :

$$D = \left(\frac{\bar{X}_j}{\bar{X}_i} - 1 \right) \times 100 \quad (9)$$

Où, \bar{X}_j représente la moyenne sur la période après la rupture ;
 \bar{X}_i est la moyenne sur la période avant la rupture ;
 D est le déficit exprimé en pourcentage (%).

2.2.1.3 BILAN HYDROLOGIQUE

L'expression classique du bilan hydrologique s'établit selon l'équation 10. L'établissement de ce bilan passe par la détermination de certains paramètres de l'équation 10 :

$$P = E + R + I \quad (10)$$

Où, P (mm) = précipitation ;

E (mm) = évaporation directe et la transpiration des plantes (évapotranspiration) ;

R (mm) = ruissellement de surface et hypodermique ;

I (mm) = infiltration.

La détermination de ce bilan se fait suivant la démarche de THORNWHAITE [18] qui est assortie de conditions ci-dessous :

- Si $P \geq ETP$, l'ETR est égale à l'etp : c'est une quantité d'eau (P-ETR) qui servira à la reconstitution des réserves du sol ;
- Si $P < ETP$, l'ETR va se réaliser non seulement sur la totalité des pluies mais encore sur les réserves du sol, de sorte que $ETR = P + RFU$ (où, RFU est la réserve facilement utilisable).

2.2.1.4 COEFFICIENTS DE TARISSEMENT ET VOLUMES D'EAU MOBILISÉS PAR LES AQUIFÈRES

L'étude du comportement des basses eaux sur le bassin versant a nécessité l'observation de l'évolution des débits moyens annuels d'eau écoulée, la détermination des coefficients de tarissement et des volumes d'eaux mobilisés par les aquifères sur la période 1990 à 1993. L'objectif ici était de montrer comment la relation eau de surface-eau souterraine a été affectée par un éventuel déficit pluviométrique. Pour le calcul des coefficients de tarissement et du volume d'eau mobilisé par les aquifères, la loi de MAILLET présentée par [19] et améliorée par la résolution dichotomique déjà appliquée par plusieurs auteurs dont [20], [21], [22] est utilisée. L'expression mathématique du coefficient de tarissement est donnée par l'équation 11 :

$$Q_t = Q_0 e^{-kt} \quad (11)$$

Où, Q_t ($m^3 \cdot s^{-1}$) est le débit à l'instant t (s) donné ;

Q_0 ($m^3 \cdot s^{-1}$) est le débit initial (au début du tarissement) ;

k (j^{-1}) est le coefficient de tarissement de maillet.

En régime non influencé, la courbe annuelle de tarissement exprime la vidange du réservoir souterrain. Ainsi, la quantité d'eau récupérée à la station de jaugeage correspond exclusivement aux volumes dynamiques mobilisés par l'ensemble des aquifères du bassin. Le volume d'eau écoulé V à chaque instant t est donné par l'équation (12) :

$$V = \int_0^t Q_0 e^{-kt} dt \quad (12)$$

Où, V est le volume d'eau écoulé en m^3 .

2.2.2 CARACTÉRISATION DE LA DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DU SOL

La caractérisation de la structure spatiale de la zone d'étude est faite à l'aide de la carte des pentes obtenue à partir du Modèle Numérique d'Altitude (MNA) et de la superposition du réseau hydrographique sur le MNA grâce au SIG. L'étude de l'évolution de l'occupation du sol est réalisée à partir d'images satellitaires. Les images satellitaires utilisées pour l'élaboration des cartes d'occupation du sol des années 1990 et 2000 ont d'abord subi un prétraitement qui a consisté à appliquer un certain nombre d'opérations telles que la correction radiométrique, la correction atmosphérique et la correction géométrique. La cartographie de l'occupation du sol s'est faite à partir de la classification supervisée par maximum de vraisemblance de chaque image Landsat TM en s'appuyant sur les travaux antérieurs de [10]. L'algorithme est basé sur la théorie probabiliste Bayésienne, qui suppose que les classes sont distribuées de façon gaussienne. Les pixels sont donc classés selon la probabilité d'appartenir à une classe donnée, sur la base des informations spectrales issues des parcelles d'entraînement [23]. L'analyste identifie des échantillons assez homogènes de l'image qui sont représentatifs des différents types de surfaces. Ces échantillons forment un ensemble de données-tests (sites de contrôle et d'entraînement). La sélection de ces données-tests est basée sur les connaissances de l'analyste, sa familiarité avec la région géographique et les types de surfaces présents sur l'image. Les

informations numériques pour chacune des bandes et pour chaque pixel de ces ensembles sont utilisées pour définir les classes et ensuite reconnaître des régions aux propriétés similaires à chaque classe.

3 RÉSULTATS

3.1 VARIABILITÉ DU CLIMAT SUR LA PORTION IVOIRIENNE DU BASSIN VERSANT DE LA VOLTA

3.1.1 FLUCTUATION DES INDICES PLUVIOMÉTRIQUES

Les différentes valeurs de ces indices permettent de déterminer les périodes humides, normales et sèches. Les variations interannuelles des indices pluviométriques, sur la période 1936-2002 aux stations de Bondoukou, Bouna et Valaré de la zone d'étude, sont caractérisées par une alternance d'années humides et sèches (Figure 2). Aucune période normale n'a été signalée sur l'ensemble de ces trois stations. L'analyse montre que :

- À la station de Bondoukou, située au Sud de la zone d'étude, une période humide et période sèche sont à distinguer avec une moyenne interannuelle de 1115,59mm. La période humide est définie de 1936 à 1970 avec une moyenne interannuelle de 1158,59mm, marquée par un excédent de 43mm. L'année 1963 est la plus arrosée avec une moyenne interannuelle de 1601,3mm. Cette période humide est caractérisée par deux années significativement sèches (1936 et 1937). Quant à la période sèche (de 1970 à 2002), une moyenne interannuelle de 1060,36mm a été enregistrée, soit un déficit de 55,23mm. Au cours de cette période sèche, il faut noter cependant quelques années pluvieuses (1980, 1984 et 1991) avec des précipitations moyennes interannuelles qui oscillent autour de 1408,53mm en moyenne ;
- À la station de Bouna, située au centre de la zone d'étude, deux périodes sèches alternent avec une période humide. La moyenne interannuelle de la série pluviométrique est de 1053,75mm. La première période sèche part de 1936 à 1947 avec une moyenne interannuelle de 951,25mm, soit un déficit de 102,50mm. Le caractère déficitaire de cette période sèche se remarque sur dix années déficitaires sur les 11 années définies. Cette première période sèche est suivie d'une période humide (de 1947 à 1965) caractérisée par une moyenne interannuelle de 1212,60mm correspondant à un excédent de 158,85mm. L'année 1959 est la plus arrosée (1934,8mm) avec une pluviométrie moyenne interannuelle largement au-dessus de la moyenne. Enfin, survient la deuxième période sèche (de 1965 à 2002) avec une moyenne interannuelle de 998,06mm marquée par un déficit de 55,69mm. Cette période sèche définie sur trente-sept (37) années comprend vingt-trois (23) années déficitaires (soit 62,16%) ;
- À la station de Valaré, située au Nord de la zone d'étude, la série pluviométrique a une moyenne interannuelle de 1062,98mm. Ici au contraire deux périodes humides alternent avec une période sèche. La première période humide (de 1936 à 1971) a enregistré une moyenne interannuelle de 1114,28mm, marquée par un excédent de 51,30mm. Cette période humide est caractérisée par des précipitations largement au-dessus de la moyenne interannuelle. L'année 1963 est la plus arrosée (1556mm) au cours de cette période. La période sèche qui survient par la suite de 1971 à 1995 a enregistré une moyenne interannuelle de 973,84mm, soit un déficit de 89,14mm. Cette période sèche est la plus sévère avec une fréquence plus longue de vingt-quatre (24) années consécutives. L'année 1983 a enregistré la pluviométrie la plus faible avec 657mm. La deuxième période humide (de 1995 à 2002) a une moyenne interannuelle de pluie de 1108,86mm correspondant à un excédent de 45,88mm. Cette période est pluvieuse dans son ensemble à l'exception de l'année 1996 avec une pluviométrie moyenne interannuelle de 945mm.

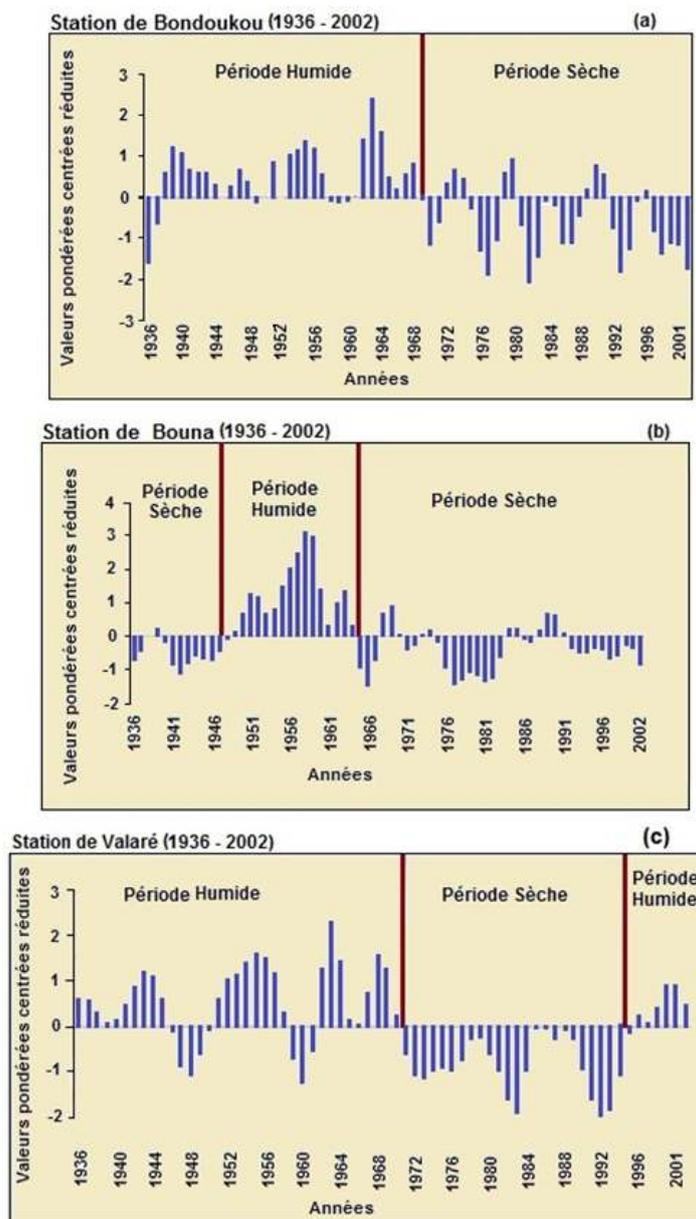


Fig. 2. Variations des moyennes mobiles pondérées de la pluviométrie aux stations pluviométriques de la zone d'étude sur la période 1936 à 2002

Une analyse de l'ensemble des graphes montre une baisse de la pluviométrie dans le bassin versant de la zone d'étude. Elle s'accroît de façon générale après les années 1960. Les périodes sèches sont plus marquées avec un déficit moyen de 51,39mm. Cette baisse de la pluviométrie réduit les apports d'eau aux eaux de surfaces, aux zones humides et aux eaux souterraines.

3.1.2 ANALYSE DES RUPTURES DANS LES SÉRIES PLUVIOMÉTRIQUES

Les résultats du test de PETTITT permettent d'identifier des ruptures dans les séries pluviométriques des stations de Bouna et de Valaré (Figure 3). Ces ruptures, équivalentes dans le cas présent à une diminution de la pluviométrie annuelle, ont été observées en 1963 (Bouna) à 90% et en 1970 (Valaré) à 99% au sein des séries pluviométriques avec un niveau de signification qui varie d'une station à une autre. Ce niveau de signification traduit ici l'importance réelle ou non d'un changement de la moyenne au sein des séries pluviométriques. D'après le test de PETTITT, la série pluviométrique à la station de Bondoukou est homogène car elle ne présente pas de rupture. Les résultats obtenus à partir de la méthode BAYÉSIENNE DE LEE et HEGHINIAN

au niveau de Bouna et de Valaré sont similaires à ceux obtenus avec le test de PETTITT. Cependant, selon cette méthode, une rupture dans la série pluviométrique de la station de Bondoukou a été observée en 1970.

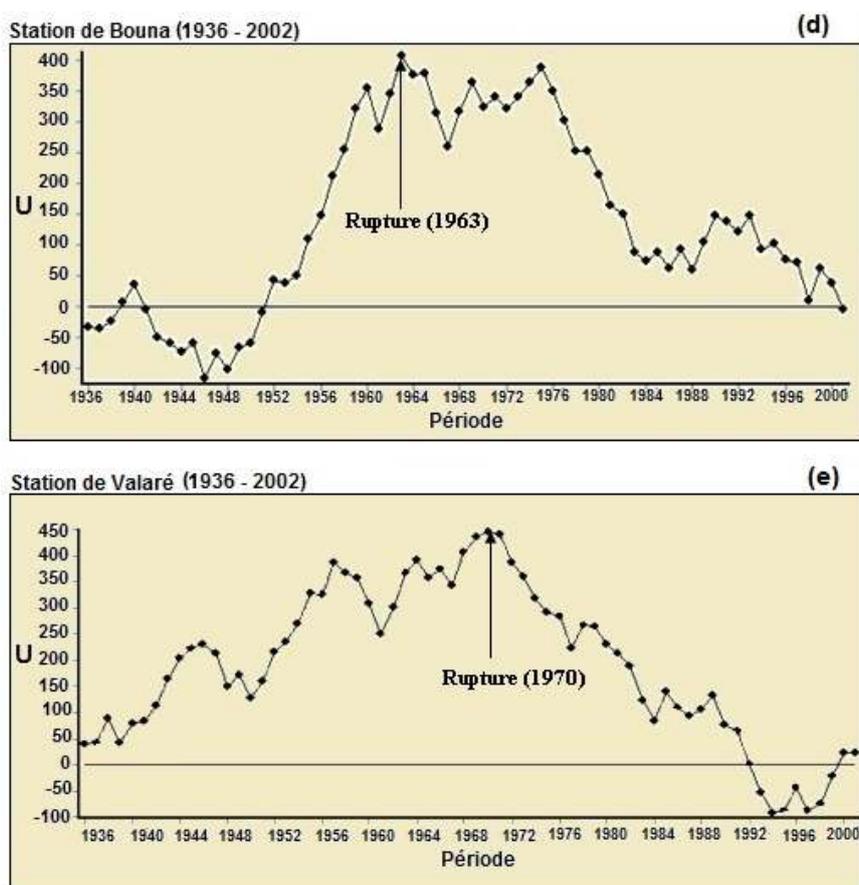


Fig. 3. Fluctuations de la variable U du test de Pettitt aux stations pluviométriques de Bouna et de Valaré sur la période 1936 à 2002

En somme, la procédure de détection de ruptures dans les séries pluviométriques des stations de la zone d'étude révèle des ruptures en 1963 à la station de Bouna et en 1970 aux stations de Bondoukou et de Valaré.

3.2 RÉGIME HYDROLOGIQUE

3.2.1 BILAN HYDROLOGIQUE

Les résultats du bilan hydrologique aux différentes stations de Bondoukou, de Bouna et de Valaré sur la période 1936 à 2002 sont consignés dans le tableau 1. L'analyse de ces résultats montre que les relevés pluviométriques moyens annuels sont inférieurs aux valeurs de l'évapotranspiration potentielle (ETP) déterminées. Dans ce cas, les plantes ne disposent pas suffisamment d'eau pour leur croissance complète. Elles ne se contentent que de l'évapotranspiration réelle (ETR) imposée par les conditions naturelles d'humidité du sol. Par conséquent, il peut en résulter une réduction du couvert végétal durant la période considérée. Ces relevés pluviométriques moyens annuels sont par contre supérieurs aux valeurs de l'évapotranspiration réelle. Ce qui implique des excédents respectifs de 98,50mm, 44,40mm et 119mm au niveau des trois stations considérées soit une moyenne de 87,30mm qui correspond à la pluie efficace moyenne de la zone d'étude. Cette valeur moyenne de la pluie efficace constitue 7,92% des précipitations moyennes annuelles (1102,86mm) dont 5,68% pour les écoulements de surface et seulement 2,23% pour les infiltrations directes destinée à la réalimentation des aquifères. Le calcul du bilan hydrologique a permis par ailleurs de distinguer deux grandes saisons au cours de l'année au niveau de la zone d'étude. La saison sèche définie du mois de novembre à mars, est caractérisée par un assèchement progressif des sols qui provoque le

flétrissement des végétaux, notamment les plantes herbacées jusqu'au début de la saison des pluies. Cette saison des pluies s'étend du mois d'avril à octobre avec des précipitations de plus en plus fréquentes qui vont plutôt favoriser les écoulements de surface au détriment des infiltrations pour la recharge des aquifères. Le déficit pluviométrique moyen enregistré dans la zone d'étude est de 651,44mm soit 59,07% des précipitations indiquant que cette zone est de moins en moins arrosée. Par conséquent, les ressources en eau de surface et souterraine pourraient diminuer significativement.

Tableau 1. Récapitulatif des paramètres du bilan hydrologique estimés aux stations pluviométriques de Bondoukou, de Bouna et de Valaré

Stations	Pluies (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	P-ETR (mm)	ETP-ETR (mm)	Écoulements (mm)	Infiltrations (mm)
Bondoukou	1175,76	1532	1077,26	98,5	454,74	78	20,5
Bouna	1070,94	1745	1026,54	44,4	718,46	37	7,4
Valaré	1061,87	1724	942,87	119	663,37	73	46
Moyennes	1102,86	1667	1015,56	87,30	651,44	62,67	24,63

3.2.2 ANALYSE DES ECOULEMENTS : DÉBITS D'EAU ÉCOULÉE, COEFFICIENTS DE TARISSEMENT ET VOLUMES D'EAU MOBILISÉS PAR LES AQUIFÈRES

Les résultats de ces différents paramètres obtenus après la rupture de 1963 ou de 1970 sur la période de 1990 à 1993 sont consignés dans le tableau 2. L'analyse de ce tableau montre que le débit d'eau écoulee à la station hydrométrique de jaugeage de Gbanlou dans la localité de Kokpingué est relativement élevé en 1991 par rapport aux autres années considérées. Ce débit est de $4,51\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ contre $0,78\text{m}^3.\text{s}^{-1}$, $0,08\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ et $0,18\text{m}^3.\text{s}^{-1}$. En effet, le débit moyen annuel d'eau écoulee déterminé est de $1,39\text{m}^3.\text{s}^{-1}$. Ce débit est faible car la période considérée s'inscrit dans une période de baisse pluviométrique. Les coefficients de tarissement moyens déterminés après la rupture de 1963 ou de 1970 sur la période de 1990 à 1993 varient de $2,73.10^{-2}$ à $9,92.10^{-2} \text{ j}^{-1}$. Le coefficient de tarissement le plus faible ($2,73.10^{-2} \text{ j}^{-1}$) est enregistré pendant l'année 1991 ou cours de laquelle le débit moyen annuel d'eau écoulee était le plus important. Le coefficient de tarissement moyen sur l'ensemble des quatre années considérées est de $6,95.10^{-2} \text{ j}^{-1}$. Les résultats du tableau 2 montrent que les volumes d'eau mobilisés par les aquifères au niveau de la zone d'étude varient entre $0,0022\text{km}^3$ et $0,0935\text{km}^3$ avec une moyenne de $0,028\text{km}^3$. Quand le coefficient de tarissement augmente, le volume d'eau mobilisé par les aquifères diminue. Le coefficient de tarissement étant proportionnel à la vitesse de vidange de la nappe, cela symbolise une sensibilité des nappes de la zone d'étude aux variations saisonnières dont la conséquence est la baisse du niveau piézométrique des aquifères.

Tableau 2. Évolution interannuelle des débits moyens annuels d'eau écoulee, du coefficient de tarissement et du volume d'eau mobilisé par les aquifères

Années	Débits moyens annuels d'eau écoulee ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)	Coefficients de tarissement moyens ($\times 10^{-2} \text{ j}^{-1}$)	Volumes d'eau mobilisés (km^3)
1990	0,78	9,6423	0,0122
1991	4,51	2,7346	0,0935
1992	0,08	5,4806	0,0022
1993	0,18	9,9287	0,0027
Moyennes	1,39	6,95	0,028

3.3 CARACTÉRISATION PHYSIOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE

3.3.1 CARACTÉRISATION GÉOMORPHOLOGIQUE

La zone d'étude est dominée dans son ensemble par de faibles pentes comprises entre 0 et 4,50% avec des pentes moyennes peu représentées variant de 4,50 à 8,11% (Figure 4). Les pentes fortes à très fortes (8,11 à 19,30%) sont très peu représentées au Nord-Ouest, à l'Ouest et à l'Est de la zone d'étude. Le couplage du réseau hydrographique au MNA permet d'identifier la structure interne de l'écoulement. La majeure partie de la zone d'étude a une altitude inférieure à 350m (Figure 4). Ces altitudes décroissent de l'Ouest vers l'Est, faisant de l'Est une zone plane avec, des altitudes variant de 0 à 250m. Le ruissellement des eaux pluviales s'effectue donc de l'Ouest vers l'Est qui pourrait constituer une zone à forte recharge des nappes. Les caractéristiques physiographiques démontrent que la zone d'étude peut être favorable à la fois à une bonne

infiltration des eaux issues des précipitations et à un bon écoulement des différents affluents vers le cours d'eau principal. Cependant, la baisse pluviométrique constatée a des répercussions sur les ressources en eau de cette région.

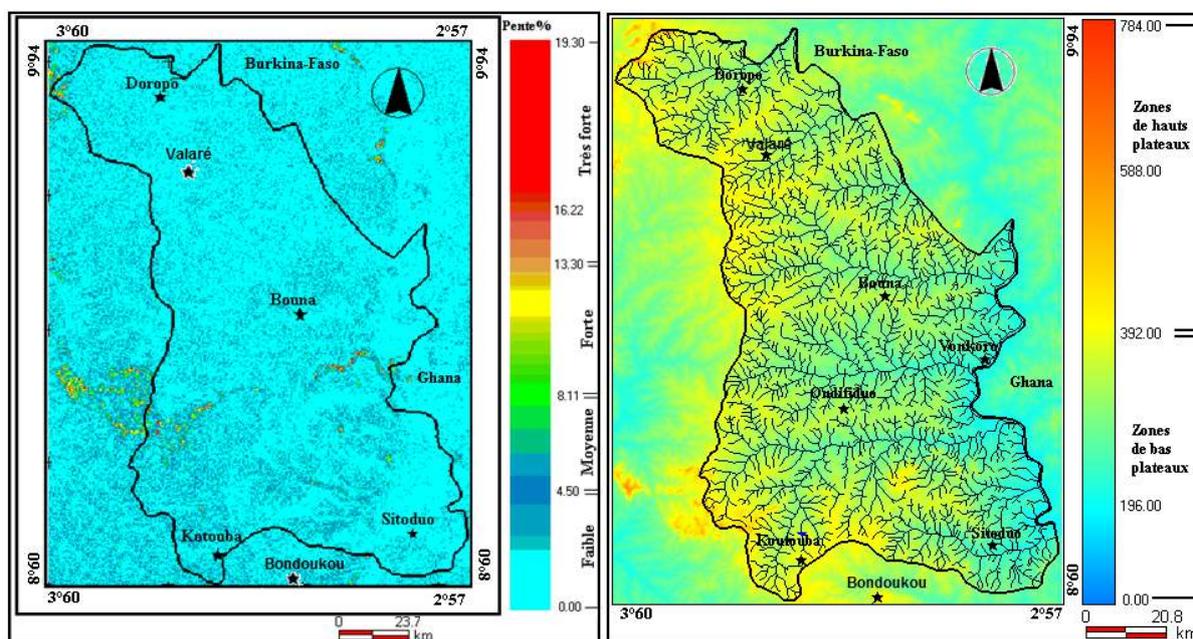


Fig. 4. Carte des pentes et carte MNA couplé au réseau hydrographique du bassin versant de la zone d'étude

3.3.2 CARACTÉRISATION SPATIALE DE L'ÉVOLUTION DE L'OCCUPATION DU SOL DE LA ZONE D'ÉTUDE

La Figure 5 présente les cartes d'occupation du sol du bassin versant de la partie ivoirienne du fleuve Volta respectivement en 1990 et 2000. Cette figure permet d'identifier six (6) termes d'occupation du sol : la forêt galerie, la savane arborée claire, la savane desséchée, les zones humides, les plans d'eau et les sols nus et zones urbaines. Les différentes superficies occupées par ces différents états de surfaces sont consignées dans le tableau 3. Les différentes cartes d'occupation du sol montrent une couverture végétale plus ou moins importante sur l'ensemble du bassin. L'analyse montre que :

- En 1990, la forêt galerie et la savane arborée et/ou arbustive dense occupaient seulement les zones de hautes altitudes de l'Ouest, du Nord-Ouest et du Sud-Ouest. Elles étaient très peu représentées au Centre, à l'Est et au Sud-Est avec une superficie de 817,47ha soit 8,48% du bassin. La savane arborée et/ou arbustive claire était fortement représentée sur l'ensemble du bassin avec une superficie de 7824,79ha soit 81,17%. Les zones de savane desséchée et/ou brûlée estimées à 194,73ha (2,02%), étaient faiblement disséminées sur l'ensemble de la zone d'étude et plus représentatives à l'Est et au Sud. Les sols nus et les zones urbaines étaient évalués à 30,85ha (0,32%). Les zones humides et les plans d'eau représentaient respectivement 409,70ha (4,25%) et 362,46ha (3,76%). Elles sont représentées au Sud-Ouest et moins perceptibles au Sud et à l'Est du bassin ;
- En 2000, la superficie de la forêt galerie et de la savane arborée et/ou arbustive dense a augmenté à 1543,36ha soit 16,01% de la superficie totale de la zone d'étude comparativement à la période 1990. Elles ne se limitent plus aux zones de l'Ouest mais couvrent également les zones de l'Est caractérisées de zones de faibles pentes favorables à l'infiltration. La savane arborée et/ou arbustive claire a diminué, sa superficie est passée à 7176,98ha (74,45%) soit une perte de 6,72% par rapport à l'année 1990. Par contre, la savane desséchée et/ou brûlée a augmenté, passant de 194,73ha en 1990 à 262,21ha en 2000. Cette savane s'observe au Centre, au Sud et au Sud-Est du bassin. Les sols nus et zones urbaines ont connu aussi une extension. La superficie est passée de 30,85ha à 93,51ha en 2000. Quant aux zones humides (155,20ha), elles connaissent une régression. Cependant, la superficie des plans d'eau qui était de 362,46ha en 1990 a augmenté et est passée à 408,74ha en 2000. La validation de la classification a été opérée par deux matrices de confusion. Les différents résultats statistiques avec une précision globale de 82,89% pour l'année 1990 et de 87,33% pour l'année 2000, attestent que la classification effectuée est satisfaisante.

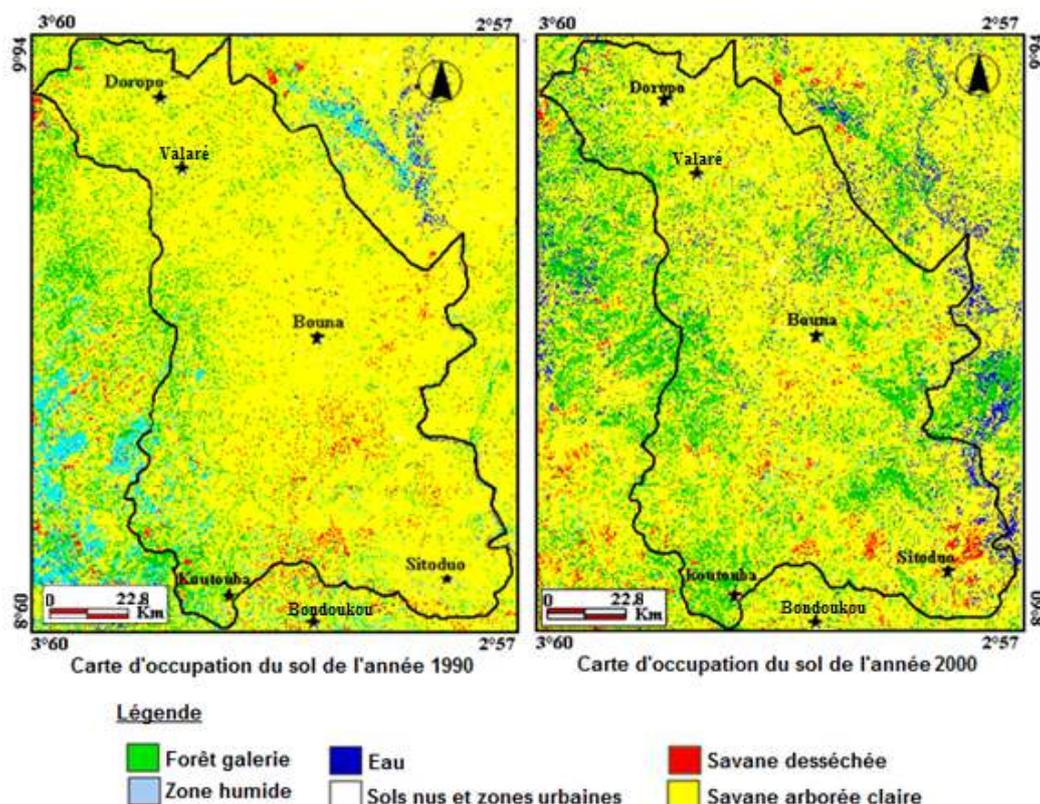


Fig. 5. Carte d'occupation du sol du bassin versant de la zone d'étude de 1990 et de 2000

Tableau 3. Superficies des unités d'occupation du sol en 1990 et en 2000 dans le bassin versant de la Volta

Types d'occupation	Superficies en 1990		Superficies en 2000	
	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)
Sols nus et zones urbaines	30,85	0,32	93,51	0,97
Plan d'eau	362,46	3,76	408,74	4,24
Zones humides	409,70	4,25	155,20	1,61
Savane desséchée et/ou brûlée	194,73	2,02	262,21	2,72
Savane arborée et/ou arbustive claire	7824,79	81,17	7176,98	74,45
Forêt galerie et savane arborée et/ou dense	817,47	8,48	1543,36	16,01

4 DISCUSSION

Les résultats obtenus à partir des tests statistiques de détection de rupture ont révélés des ruptures au sein des séries pluviométriques des stations de Bouna, Bondoukou et Valaré. Ces ruptures s'observent respectivement en 1963 et en 1970. Elles montrent que le bassin versant de la zone d'étude a connu également des fluctuations pluviométriques observées au cours de la décennie 1960-1970 en Afrique de l'Ouest et Centrale Sahélienne comme non Sahélienne. Ces résultats confirment la tendance à la baisse des précipitations constatée en Afrique de l'Ouest [24], [25], [26], [27], [28], [29] et particulièrement en Côte d'Ivoire [30], [31], [32], [33], [34]. Ces résultats sont en accord avec les travaux de [35] qui situent cette période de rupture dans le Nord de la Côte d'Ivoire à la fin des années 1960 et au début des années 1970. La baisse pluviométrique observée à partir de ces années, a provoqué une perturbation ou un raccourcissement des périodes pluvieuses par rapport aux périodes sèches comme constatés, en Côte d'Ivoire, par [21] aux stations de Man et de Danané, par [20] à la station de Guiglo et par [5] à la station de Daoukro. En effet, des périodes de sécheresse très marquées au cours des années 1968 à 1970, 1982 à 1983 et 1993 ont été signalées en Côte d'Ivoire par [36], [35], [34]. En accord avec ce qui précède, dans la zone d'étude, les épisodes de sécheresse les plus longs après la rupture ont été observés entre les années 1971 et 1995. Cette période a été révélée, par la plupart des études antérieures notamment celles de [37], [6], comme une période pluviométrique déficitaire. La baisse pluviométrique observée a eu un impact réel sur l'écoulement de surface et la recharge des aquifères de la zone d'étude. En effet, avec une pluviométrie moyenne annuelle de 1102,86mm déterminée sur la période 1936 à 2002 seulement 7,92% (pluie

efficace) sont destinés à la pérennisation des ressources en eau soit 5,68% pour l'écoulement de surface et 2,23% pour la recharge des nappes. Comparativement aux résultats de [37] avant (1665mm et 1695mm) et après (1322mm et 1265mm) rupture respectivement aux stations de Gagnoa et de Sassandra, la pluviométrie moyenne annuelle au niveau de la zone d'étude est plus faible. Cette différence s'explique par le fait que la zone d'étude, située au Nord-Est de la Côte d'Ivoire, est moins arrosée avec seulement deux grandes saisons (sèche et pluvieuse) par rapport aux régions du Sud-forestier où la pluviométrie est plus élevée. Cependant, les résultats de [5] après la rupture (1064,07mm et 1189,23mm), respectivement aux stations de M'Bahiakro-Dimbokro et d'Akacomoékro-Anuansué (région de Daoukro), montrent des tendances pluviométriques moyennes annuelles qui se rapprochent de celles de la zone d'étude. En effet, ces régions sont situées au Centre-Est du pays et au Sud-Ouest de la zone d'étude avec presque les mêmes conditions hydro-climatiques que celle-ci. Par ailleurs, la pluie efficace déterminée dans cette étude (7,92% des précipitations) est très faible par rapport à celle obtenue par [6] qui était de 17% des précipitations dont 7% pour l'écoulement de surface et 10% pour l'infiltration. Ces résultats démontrent un faible potentiel hydraulique du bassin versant de la zone d'étude. Ce faible potentiel hydraulique du bassin est également perçu au niveau des débits moyens d'eau écoulée des cours d'eau dont la moyenne sur les quatre années considérées est seulement de $1,39\text{m}^3.\text{s}^{-1}$. Ceci est dû au fait que la chronique considérée s'inscrit globalement dans la période sèche qui continue de sévir dans le bassin. Même en période humide, ce débit moyen ne pourra pas augmenter significativement à l'heure actuelle à cause de la baisse pluviométrique. En outre, les valeurs moyennes du coefficient de tarissement ($6,95.10^{-2} \text{ j}^{-1}$) et du volume d'eau mobilisé ($0,028\text{km}^3$) déterminées après la rupture, sur la période 1990 à 1993, démontrent effectivement que les ressources en eau du bassin de la zone d'étude s'amenuisent. En effet, le coefficient de tarissement moyen est plus élevé que les coefficients de tarissement obtenus par [5] après rupture (variant de $4,09.10^{-2} \text{ j}^{-1}$ à $4,91.10^{-2} \text{ j}^{-1}$) au niveau de la région de Daoukro. À contrario, le volume d'eau moyen mobilisé ($0,028\text{km}^3$) par les aquifères est faible comparativement aux volumes d'eau mobilisés obtenus par les mêmes auteurs (variant de 0,40 à $1,86\text{km}^3$). La différence entre les valeurs de coefficients de tarissement et de volumes d'eau mobilisés par les aquifères dans cette étude et celles des études antérieures citées précédemment atteste que la zone d'étude est plus affectée par la baisse pluviométrique. En effet, la diminution des précipitations favorise le réchauffement du climat qui se manifeste par des périodes sèches plus longues que les périodes pluvieuses. Ainsi, les différentes crises de sécheresse observées (1968 à 1970, 1982 à 1983 et 1993) après la rupture ont provoqué une diminution drastique des eaux souterraines notamment. Pour combler le déficit en eau des aquifères, on constate donc une certaine rapidité des échanges entre eaux de surface et eaux souterraines expliquant la hausse des coefficients de tarissement. Malheureusement, la réalimentation des aquifères ne constitue que 2,23% des précipitations d'où une faible mobilisation de volumes d'eau par ceux-ci. Aussi, la variabilité climatique constatée sur le bassin versant de la zone d'étude fragilise-t-elle les écosystèmes de forêt et de savane. Selon [38], la dynamique des écosystèmes est en relation directe avec les perturbations climatiques et les causes anthropiques. Lorsque ces perturbations climatiques se manifestent par des périodes de sécheresse prolongées, elles entraînent d'importantes pertes au niveau du couvert végétal comme ce fut le cas durant la période 1981-1983 et l'année 1993. En plus de la sécheresse, [34] a mentionné que la période 1982-1983 a été marquée par d'importants incendies de forêts et de plantations. L'action conjuguée des grandes sécheresses, des feux de brousse, des pratiques agricoles et de la coupe du bois a entraîné la disparition de certaines espèces végétales de la zone d'étude. La forêt galerie et la savane arborée et/ou dense (8,48%) ont alors régressé en faveur de la savane arborée et/ou arbustive claire (81,17%) et de la savane desséchée et/ou brûlée (2,02%) suivant la carte d'occupation du sol de l'année 1990. L'extension de la savane desséchée et/ou brûlée (de 67,48ha) ou les sols nus (de 62,66ha) privent les sols du bassin d'une couverture protectrice, d'où leur exposition aux agents de l'érosion que sont le ruissellement et les vents comme mentionnés par [39]. Ces phénomènes notamment les sécheresses ont incontestablement favorisé l'assèchement des terres donc la réduction des zones humides et des plans d'eau. En somme, la régression de la couverture végétale qui a occasionné la disparition de certaines zones de recharge des nappes et la baisse pluviométrique ont entraîné une diminution des ressources en eau souterraine du bassin. La carte d'occupation du sol de l'année 2000 révèle une dynamique de reconstitution ou de réhabilitation de l'environnement marquée par la régénération de la végétation et l'extension des plans d'eau. L'augmentation des superficies de forêt galerie et de savane arborée et/ou arbustive dense (8,48% en 1990 contre 16,01% en 2000) est le symbole de la reforestation du bassin. La régénération du couvert végétal peut être due aux cultures. C'est pour cette raison que [34] a affirmé qu'aux forêts, on devrait ajouter les plantations industrielles (café, cacao, hévéa etc.) qui constituent des couvertures végétales importantes. La reforestation du bassin a certainement favorisé la pérennisation des eaux de surface qui ont augmenté en superficie (de 3,76% en 1990 à 4,24% en 2000). La régénération environnementale est attribuable à la période humide qui survient après l'année 1995 comme l'indique la variation de la pluviométrie par la méthode des moyennes mobiles pondérées à la station de Valaré. Cependant, cette dynamique de reprise de la végétation est plus ou moins ralentie par l'extension de zones de savane desséchée ou brûlée (évaluée à 0,70% par rapport à l'année 1990) et des sols nus et des zones urbaines (0,32% en 1990 contre 0,97% en 2000). L'extension simultanée de ces zones est due à l'accroissement de la population qui va de plus en plus procéder à la mise en culture des terres. Au fil du temps, les sols nus et les zones urbaines deviennent favorables aux érosions dont le drainage des couches de terrains crée une accumulation et un engorgement des

plans d'eau et des zones humides. La diminution de la profondeur des cours d'eau par comblement progressif en matières organiques ou minérales provoque leur eutrophisation qui finit souvent par les assécher. Ce phénomène entraîne la disparition de certains affluents tertiaires voire secondaires.

Toutefois, il convient d'indiquer que les débits moyens annuels d'eau écoulée des eaux de surface, les coefficients de tarissement et les volumes d'eau mobilisés par les aquifères devraient être évalués sur toute la période avant et après la rupture comme l'ont déjà fait [5], [37], [6]. Ce qui permettrait de mieux apprécier l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau. Or, ces paramètres n'ont été déterminés que sur seulement quatre années après la rupture. Malgré ces insuffisances, les effets de la variabilité climatique qui se manifeste par le réchauffement du climat et par la baisse de la pluviométrie, sont bien perceptibles dans la zone d'étude à travers cette étude. C'est la raison pour laquelle, des stratégies d'adaptation sont mises en œuvre pour pérenniser de façon générale les ressources naturelles notamment les ressources en eau. Ainsi, la politique de reboisement des zones de savane desséchée ou brûlée, des sols nus doit être une priorité pour les décideurs locaux et nationaux. La sensibilisation de la population locale aux nouvelles techniques culturales (cultures intensives, arboriculture, cultures hors-sol...) par l'utilisation raisonnable de fertilisants doit être faite pour préserver les terres et le patrimoine forestier. Il faut donc arriver à restaurer l'équilibre des écosystèmes par la conservation ou la préservation des ressources naturelles.

5 CONCLUSION

Cette étude a permis de montrer, à partir des modèles hydrologiques et des SIG, que la variabilité climatique qui se manifeste en général par la baisse pluviométrique a un impact négatif sur les ressources en eau de la zone d'étude. La baisse pluviométrique constatée depuis les années 1963 ou 1970 va donc favoriser des périodes de sécheresse plus sévères jusqu'en 1995. Ces périodes de sécheresse ont eu des effets néfastes sur la couverture végétale qui se reconstitue peu à peu après cette date. Cette reconstitution du couvert végétal est néanmoins freinée par certaines pratiques agricoles qui dégradent les sols. Elle est limitée par le déficit pluviométrique constaté sur l'ensemble de la zone d'étude. En effet, le bilan hydrologique a présenté une baisse de la pluviométrie moyenne interannuelle (1102,86mm) par rapport à l'évapotranspiration potentielle moyenne interannuelle (1667mm). Il ressort de ce bilan que seulement 87,30mm (soit 7,92%) des précipitations constituent l'excédent moyen annuelle et dont seulement 24,63mm (soit 2,23%) sont destinés à l'alimentation des nappes du bassin et 62,67mm (soit 5,68%) destinés à l'écoulement de surface. Par conséquent, le module annuel moyen des débits des cours d'eau déterminé sur la période 1990 à 1993 est faible soit $1,39\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ avec un coefficient de tarissement moyen élevé de $6,95.10^{-2} \text{ j}^{-1}$ et un volume d'eau moyen mobilisé par les aquifères de seulement $0,028\text{km}^3$. En somme, le potentiel hydraulique du bassin est faible et est très sensible aux variations saisonnières. De plus, de 1990 à 2000, l'état de surface a subi une évolution notable. Des perturbations liées aux activités anthropiques et à la variation saisonnière ont entraîné une régression de la savane arborée et/ou arbustive claire (de 81,17% à 74,45%) et des zones humides (4,25% à 1,61%) avec une extension de la savane desséchée et/ou brûlée (de 2,02% à 2,72%) et des sols nus et des zones urbaines (de 0,32% à 0,97%). Cependant, il faut noter une régénération de la forêt galerie et de la savane arborée et/ou dense (de 8,48% à 16,01%) au dépend de la savane arborée et/ou arbustive claire. Cette reconstitution de la végétation va certainement favoriser l'extension des plans d'eau (de 3,76% à 4,24%) et pourrait également améliorer les conditions de recharge des nappes. Cette dynamique de réhabilitation de l'environnement devrait se poursuivre par le renforcement, par les décideurs publics et privés, des stratégies d'adaptation (reboisement, cultures intensives, arboricultures...) à la variabilité climatique. L'équilibre écologique dans la zone d'étude passe par l'engagement de tous les intervenants qui devront avoir un objectif commun, celui de préserver les ressources naturelles notamment les ressources en eau.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient vivement le Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT) de l'Université Félix Houphouët-Boigny (UFHB) d'Abidjan (Côte D'Ivoire) pour son soutien financier et matériel pour la réalisation de ce travail.

REFERENCES

- [1] M. Niasse, A. Afouda et A. Amani, Réduire la vulnérabilité de l'Afrique de l'Ouest aux impacts du climat sur les ressources en eau, les zones humides et la désertification : éléments de stratégie régionale de préparation et d'adaptation, *UICN*, Gland, Suisse et Cambridge, Royaume-Uni, xviii + 71 p, 2004.
[Online] Available: <https://portals.iucn.org/library/efiles/documents/Climate-impactsFprelims.pdf> (January 20, 2009)
- [2] E. Servat, Préface, Recueil des posters de la *conférence internationale ABIDJAN'98*, pp. 3-4, 1998.
- [3] S. E. Nicholson, J. Kim, and J. Hoopingarner, Atlas of African rainfall and its inter-annual variability, *Department of meteorology*, Florida State University Tallahassee, USA, 1988.
- [4] L. Le Barbé, T. Lebel, and D. Tapsoba, "Rainfall variability in West Africa during the years 1950- 1990," *Journal of climate*, vol. 15, pp. 187-202, 2002.
- [5] F. Kanohin, M. B. Saley et I. Savané, "Impacts de la Variabilité Climatique Sur Les Ressources en Eau et Les Activités Humaines en Zone Tropicale Humide: Cas de la Région de Daoukro en Côte D'Ivoire," *European Journal of Scientific Research*, ISSN 1450-216X, vol. 26, no. 2, pp. 209-222, 2009.
- [6] A. B. Yao, B. T. A. Goula, Z. A. Kouadio, A. K. Kouakou et S. Sambou, "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," *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, vol. 19 pp. 136-157, 2012.
- [7] JICA (Japan International Cooperation Agency), Plan directeur de Gestion intégrée de ressources en eau en République de Côte d'Ivoire, *Rapport final*, 101 p, 2001.
- [8] V. P. Singh, "Effect of spatial and temporal variability in rainfall and watershed hydrology characteristics on streamflow hydrograph," *Hydrological processes*, vol. 11, pp. 1649-1669, 1997.
- [9] J. Dupont, J. Smits, A. N. Rousseau, A. Mailhot, and G. Gangbazo, "Utilisation des outils d'aide à la décision pour la gestion de l'eau," *Revue des Sciences de l'Eau*, Numéro spécial, pp. 5-18, 1998.
- [10] S. Coulibaly, L'imagerie spatiale haute résolution pour l'étude de la dynamique et la caractérisation hydrodynamique de l'occupation du sol dans le Nord-Est de la Côte d'Ivoire : Bouna, *Mémoire de DEA Université de Cocody*, Abidjan (Côte d'Ivoire), 62 p, 2002.
- [11] P. D. Tyson, T. G. J. Dyer, and M. N. Mametse, "Security changes in South African rainfall: 1880 to 1972," *Quart J. Roy. Met. Soc.*, 101: pp. 817-833, 2005.
- [12] A.A. Assani, "Analyse de la variabilité temporelle des précipitations (1916-1996) à Lumbashi (Congo-Kinshassa) en relation avec certains indicateurs de la circulation atmosphérique (oscillation australe) et océanique (el niño/ la niña)," *Bulletin Sécheresse* vol. 10, no. 4, pp. 245-252, 1999.
- [13] H. Lubès-Niel, J. M. Masson, E. Servat, J. E. Paturel, B. Kouamé et J. F. Boyer, Caractérisation de fluctuations dans une série chronologique par application de tests statistiques, *Étude bibliographique, Programme ICCARE*, Rapport no. 3, ORSTOM, Montpellier, France, 1994.
- [14] A. N. Pettitt, "A non-parametric approach to the change-point problem," *Appl. Statistics*, vol. 28, no. 2, pp. 126-135, 1979.
- [15] A. F. S. Lee and S. M. Heghinian, "A shift of the mean level in a sequence of independent normal random variables: A Bayesian approach," *Technometrics*, vol. 19, no. 4, pp. 503-506, 1977.
- [16] ENFA, Test de Mann-Whitney, Bulletin n°21 du groupe PY-MATH, 34 p, 2012.
<http://r2math.enfa.fr/wp-content/uploads/sites/8/2012/10/21-5-mann-whitney.pdf>
- [17] B. S. Ardoïn, Variabilité hydro-climatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne, *Thèse de Doctorat* de l'Université de Montpellier II (France), 440p, 2004.
- [18] C. W. Thornthwaite, Mesure de l'évapotranspiration potentielle, Hydrogéologie du centre du bassin de Paris, *Mémoire BRGM*, no. 98, 531 p, 1954.
- [19] M. El-Ouafi, "Tarisement et vidange des eaux de la Liane (Nord de la France)," *Hydrol. continent*, vol. 8, no. 2, pp.103-112, 1993.
- [20] K.M. Coulibaly, Évaluation du bilan hydrologique, de la variabilité climatique et du tarissement des cours d'eau par l'application de méthodes mathématiques dans le bassin versant du fleuve Sassandra (région de Buyo en Côte d'Ivoire), *Mémoire de DEA* de l'Université Abobo-Adjamé, Abidjan, Côte D'Ivoire 80 p, 1997.
- [21] I. Savané, K. M. Coulibaly, and P. Gioan, "Variabilité climatique et ressources en eaux souterraines dans la région semi-montagneuse de Man," *Sécheresse*, vol. 12, no. 4, pp. 231-237, 2001.
- [22] I. Savané, K. M. Coulibaly and P. Gioan, "Étude comparative de trois méthodes de calcul du coefficient de tarissement des cours d'eau," *Sécheresse*, vol. 14, no. 1 pp. 37-42, 2003.
- [23] R. Caloz and C. Collet, Système d'Information Géographique et de traitement numérique d'image, *Précis de télédétection*, PUQ/AUPELF, Sainte-Foy, Québec, Canada, vol. 3, 386p, 2001.

- [24] P. Hubert et J. P. Carbonel, "Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'Ouest," *Journal of Hydrology*, vol. 95, pp. 165-183, 1987.
- [25] P. Hubert, J. P. Carbonnel et A. Chaouche, "Segmentation des séries hydrométriques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest," *Journal of Hydrology*, vol. 110, pp. 349-367, 1989.
- [26] G. Mahé et J. C. Olivry, "Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale de 1951 à 1989," *Sécheresse*, vol. 6, no. 1, pp.109-117, 1995.
- [27] J. E. Paturol, E. Servat, B. Kouamé, H. Lubès, M. Ouedraogo and J. Masson, "Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea, Part 2: An integrated regional approach," *Journal of Hydrology*, vol. 191, pp. 1-15, 1997.
- [28] M. Ouedraogo, E. Servat, J-E. Paturol, H. Lubès-Niel et J. M. Masson, Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit autour des années 1970 en Afrique de l'Ouest et Central non sahélienne, *Water Resources Variability in Africa during the XXth century*, Abidjan, Côte d'Ivoire, LAHS Publ., no 252, pp. 315-321, 1998.
- [29] E. Servat, J. E. Paturol, H. Lubès-Niel, B. Kouamé, J.M. Masson, M. Travaglio et B. Marieu, "De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'ouest et centrale non sahélienne," *Revue des Sciences de l'Eau*, vol. 12, no. 2, pp. 363-387, 1999.
- [30] J. Biémi, Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahéliens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : hydro-structurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire), *Thèse de Doctorat d'État Ès-Sc. Nat.*, Université d'Abidjan, Côte d'Ivoire, 479 p, 1992.
- [31] I. Savané, Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odienné (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire), Apport de la Télédétection et d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale, *Thèse de Doctorat d'État*, Université Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, 396 p, 1997.
- [32] K. F. Kouame, Hydrogéologie des aquifères discontinus de la région semi-montagneuse de Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire). Apport des images satellitaires et des méthodes statistiques et fractales à l'élaboration d'un système hydrogéologique à référence spatiale, *Thèse de Doctorat de 3^{ème} Cycle*, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire 200 p, 1999.
- [33] J. P. Jourda, Méthodologie d'application des techniques de Télédétection et du Concept de l'hydrotechnique spatiale : cas des zones tests de la Côte d'Ivoire, *Thèse de Doctorat d'État*, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, 430p.
- [34] A. M. Kouassi, 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 Doctorat* de l'Université de Cocody, 214 p, 2007.
- [35] Y.T. Brou, Climat, mutation socio-économique et paysages en Côte d'Ivoire, *Mémoire de synthèse des activités scientifiques présenté en vue de l'obtention de l'habilitation à diriger des recherches*, Université des Sciences et Techniques de Lille, France, 212 p, 2005.
- [36] T. Brou, E. Servat et J.E. Paturol, Activités humaines et variabilité climatique: cas du sud -forestier ivoirien, *IAHS*, 252, pp. 365-373, 1998.
- [37] T. D . Soro, N. Soro, Y. M-S. Oga, T. Lasm, G. Soro, K. E. Ahoussi et J. Biémi, "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, pp. 55-73, 2011.
- [38] M. Mainguet, Les Pays secs, Environnement et Développement – éd *Ellipses, collection Carrefours*, Paris, France 160 p, 2003.
- [39] H. Sawadogo, N. P. Zombre, L. Bock et D. Lacroix, "Évolution de l'occupation du sol de Ziga dans le Yatenga (Burkina Faso) à partir de photos aériennes," *Revue Télédétection*, vol. 8, no. 1, pp. 59-73, 2008.