

Hydroclimatologie et dynamique de l'occupation du sol du bassin versant du Haut Bandama à Tortiya (Nord de la Côte d'Ivoire)

Tanina Drissa Soro, Bernard Djè Kouakou, Ernest Ahoussi Kouassi, Gbombélé Soro, Amani Michel Kouassi, Konan Emmanuel Kouadio, Marie-Solange Oga Yéi and Nagnin Soro

Volume 13, Number 3, December 2013

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/1026870ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec à Montréal
Éditions en environnement VertigO

ISSN

1492-8442 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Soro, T. D., Kouakou, B. D., Kouassi, E. A., Soro, G., Kouassi, A. M., Kouadio, K. E., Yéi, M.-S. O. & Soro, N. (2013). Hydroclimatologie et dynamique de l'occupation du sol du bassin versant du Haut Bandama à Tortiya (Nord de la Côte d'Ivoire). *VertigO*, 13(3).

Article abstract

This present study performed in the upper Bandama catchment at Tortiya station in Northern Côte d'Ivoire aims to improve our knowledge on hydroclimatic and land cover in order to lead to a better water resources management. It is based on the exploitation of rainfall and runoff data and satellite images. Thus application of statistic tests (Pettitt, Lee, Heghinian) highlights changes in rainfall regime during the 1970s. This modification reveals a decrease of 12 % and 22 % in rainfall depending on the stations (16.5 % in average) causing a stronger decrease in runoff (62.5 %) at Tortiya station. Depletion coefficients become very high (more than $8 \cdot 10^{-2} \text{ j}^{-1}$) after the 1970s. Groundwater recharge decreases with an average effective infiltration of 212 mm in decade 1980-1989 and 184 mm in the decade 1990-1999. In the same time, diachronic study of land cover of satellite images from November 1986 (TM sensor) and January 2000 (ETM+ sensor) on test area of watershed allowed to obtain a trend of land cover. The main observed changes are the increase of habitats (+3.1 %), bare soil (+6.64 %) and crops areas (+21.60 %) and inversely a reduction of the area covered by savannah (-29 %) and forests (-1.38 %). These modifications led to changes on hydrological behaviour of catchment.



**Tanina Drissa Soro, Bernard Djè Kouakou, Ernest Ahoussi Kouassi,
Gbombélé Soro, Amani Michel Kouassi, Konan Emmanuel Kouadio,
Marie-Solange Oga Yéi et Nagnin Soro**

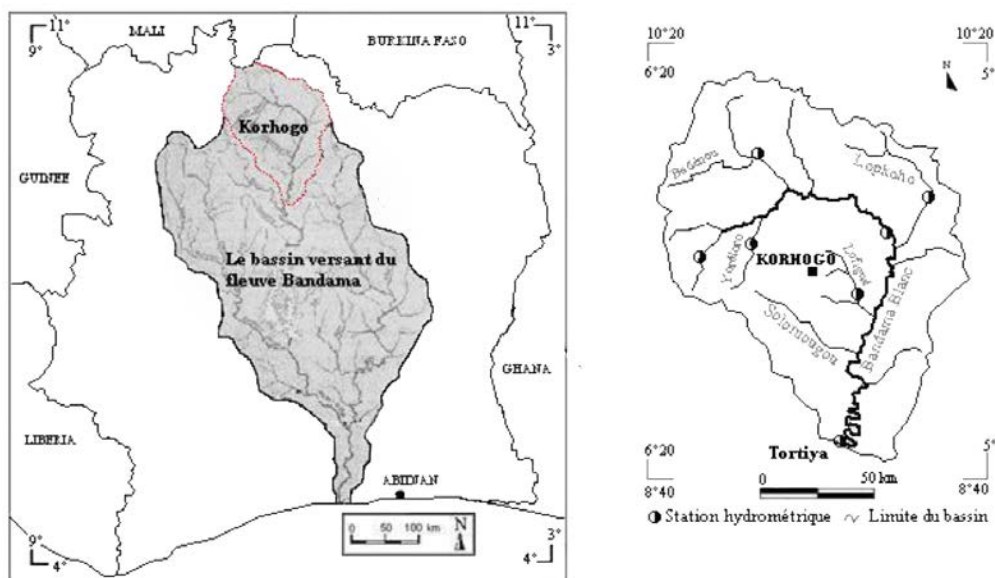
Hydroclimatologie et dynamique de l'occupation du sol du bassin versant du Haut Bandama à Tortiya (Nord de la Côte d'Ivoire)

Introduction

- 1 Le changement climatique et son influence sur l'environnement et la société sont au cœur des préoccupations politiques et scientifiques actuelles (Dezetter et *al.*, 2008). Pour une région déjà fragilisée par les sécheresses telle que l'Afrique de l'Ouest, cette question est vitale.
- 2 En effet, la zone ouest-africaine a enregistré une des sécheresses les plus importantes du vingtième siècle au cours des années 1970-1990. La dépendance d'une majeure partie de l'agriculture vis-à-vis de cultures pluviales en fait un territoire particulièrement vulnérable à de tels changements de régime pluviométriques. Parallèlement, l'occupation du sol évolue selon les fluctuations climatiques et les habitudes d'exploitation des terres agricoles. Elle est une variable fondamentale pour la planification régionale ainsi que pour l'étude et la compréhension de l'environnement (Foody, 2002 *in* Sarr, 2010). En outre, cette thématique est devenue incontournable dans la plupart des inventaires cartographiques et de suivi des phénomènes environnementaux (Ouattara et *al.*, 2006).
- 3 Le bassin versant du Haut Bandama à Tortiya en Côte d'Ivoire, région à vocation agricole, s'intègre parfaitement dans la situation présentée plus haut. Dans ces milieux soudano-sahéliens de Côte d'Ivoire, les activités agricoles, garanties de la sécurité alimentaire (OMM, 2001) des populations se développent au rythme de la disponibilité saisonnière des ressources en eau. C'est pourquoi la présente étude vise à appréhender la relation entre l'hydroclimatologie et l'occupation du sol.

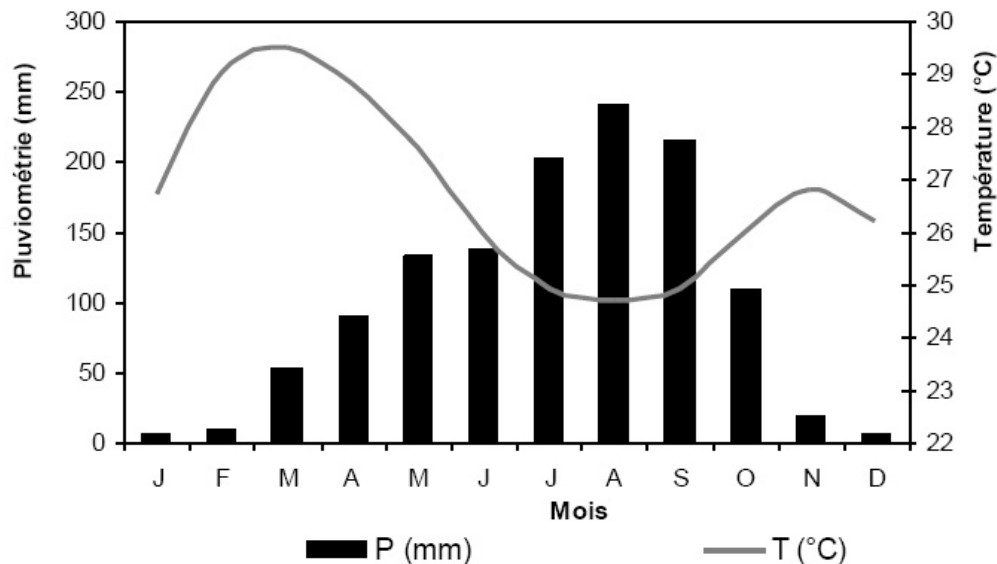
Présentation de la zone d'étude

- 4 Le bassin versant du Haut Bandama à Tortiya est un sous-bassin du Bandama Blanc. Il se situe entre les longitudes 5° et 6°20' Ouest et les latitudes 8°40' et 10°20' Nord (figure 1). Il s'étend sur les degrés carrés de Korhogo, Katiola, Niellé, Tengréla et Boundiali et couvre une superficie estimée à 14 500 km². La plus grande partie de cette superficie (86 %) est centrée sur le degré de Korhogo.

Figure 1. Localisation de la zone d'étude / Location of study area.

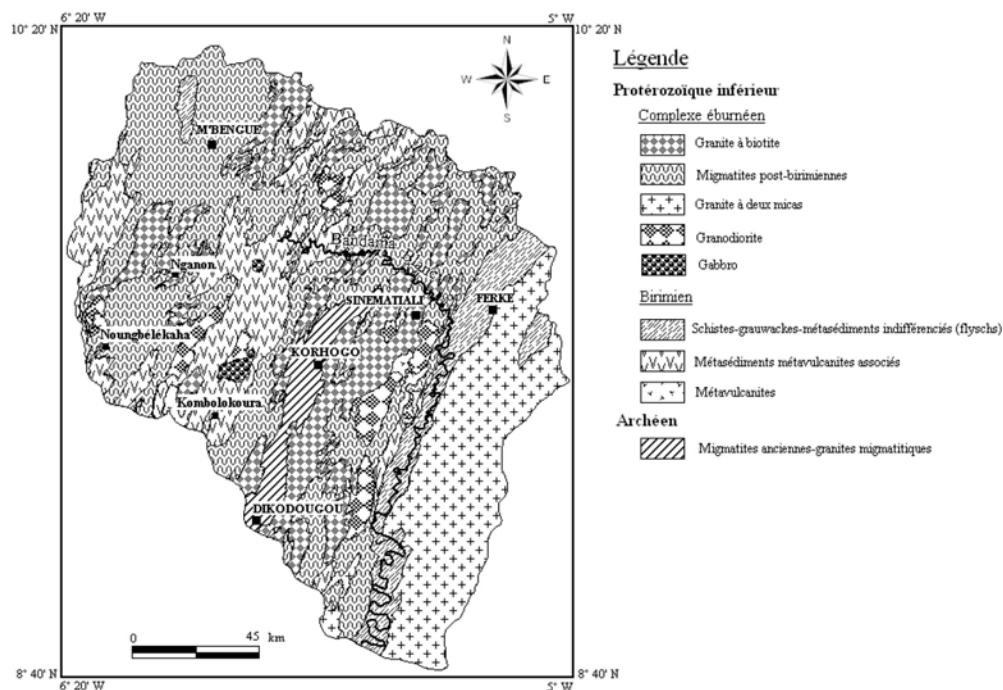
- 5 Dans son ensemble, le bassin est un vaste plateau caractérisé par des surfaces aplanies dont l'altitude varie entre 300 et 400 mètres. Toutefois, cette monotonie du plateau est interrompue par des dômes granitiques à l'allure d'inselbergs (Géomines, 1982).
- 6 Le bassin est largement drainé par le Bandama et ses principaux affluents (Solomougou, Lopkoho, Yoréloro, Lafigué, Badéno, etc). Le réseau hydrographique apparaît comme un dense chevelu de cours d'eau surtout en saison des pluies (Jourda, 2005). Il est à tendance curviligne et parfois rectangulaire. La forme de réseau la plus répandue dans la zone est le réseau de forme dendritique (Jourda, 2005). Dans la zone de Korhogo, il existe plusieurs petits barrages agropastoraux sur de nombreux affluents du Bandama. L'agriculture est l'activité principale suivie de l'élevage.
- 7 Le climat du bassin est de type soudanien (régime tropical de transition) à deux saisons contrastées : une saison des pluies de mai à octobre et une saison sèche de novembre à avril avec une pluviométrie moyenne annuelle évaluée à 1230 mm (période 1950-2000). Le régime hydrologique est calqué sur celui des précipitations. On y distingue une période de faibles écoulements (étiage) allant de novembre à avril et une période de forts écoulements (crue) allant de mai à octobre. La crue la plus importante est enregistrée en septembre avec un débit de 300 m³/s.
- 8 L'humidité relative moyenne mensuelle varie entre 35 et 79 %. Les valeurs d'insolation s'étalent de 160,6 heures (mois de juillet) à 273,8 heures (mois de janvier). La moyenne des températures mensuelles enregistrées sur la période 1972-2000 est de 26,6 °C. Toutefois, les plus fortes valeurs sont obtenues au cours de la saison sèche avec un pic en mars (29,5 °C) et les plus faibles valeurs au cours de la période pluvieuse avec un minimum en août (24,7 °C) (figure 2)

Figure 2. Diagramme ombro-thermique de la station synoptique de Korhogo de 1972 à 2000 / Ombro-thermal diagram of Korhogo snotpic station from 1972 to 2000.



9 Le bassin est constitué en grande partie de sols ferrallitiques moyennement et fortement désaturés. On rencontre, à côté de ces derniers, un complexe de sols ferrallitiques faiblement désaturés et des sols bruns eutrophes tropicaux dérivés de roches basiques (Perraud, 1971).
 10 Au plan géologique, la faible intensité du métamorphisme permet de distinguer deux grands groupes de formations (Arnould, 1961) : les formations d'origine sédimentaire et celles d'origine volcanique et très accessoirement éruptive (figure 3).

Figure 3. Carte géologique du bassin versant du Haut-Bandama à Tortiya au 1/200 000 / Geological map of Haut Bandama watershed at Tortiya to scale 1/200000 (modified, from Géomines, 1982).



Source : Modifiée à partir de Géomines (1982)

11 Les roches d'origine sédimentaire comprennent essentiellement des schistes variés et des micaschistes associés à des grauwaches pour former un flysch. Les roches d'origine volcanique sont représentées par des « roches vertes » (feutrage d'amphibole, d'albite, de chlorite et d'épidote), c'est-à-dire des roches volcaniques basiques ou éventuellement neutres auxquelles s'ajoutent quelques roches basiques grenues.

Matériel et méthodes

Hydroclimatologie

Données de l'étude

- 12 Les données hydroclimatiques comprennent les données pluviométriques et hydrométriques au pas de temps journalier et mensuel. Les données pluviométriques utilisées sont celles des stations de Korhogo, Ferkessédougou, Ouangolodougou, Boundiali, Tafiré et Niakaramandougou. Elles s'étendent sur la période 1950-2000 et proviennent de la Société de développement et d'exploitation aéroportuaire, aéronautique et météorologique (SODEXAM) qui est le principal gestionnaire sur le territoire ivoirien. Également, les données de température provenant de la station synoptique de Korhogo ont été utilisées et étendues à l'ensemble du bassin. Ces données de température sont obtenues aussi auprès de la SODEXAM.
- 13 Les données de débits de huit (8) stations hydrométriques ont servi à l'étude. Ces dernières ont été fournies par la Direction de l'hydrologie, sous-direction de la Direction de l'hydraulique humaine. Seules les données hydrométriques de la station de Tortiya (exutoire) ont été utilisées pour l'étude des variations climatiques, car présentant la plus longue série (1962-1994). Les données des autres stations, d'étendues variées, mais incluses dans la période 1962-1994, ont été utilisées pour combler les lacunes dans la série de Tortiya.

Critique des données

- 14 Des lacunes ont été remarquées dans les séries chronologiques des pluies et de débits pendant certaines années ou des mois d'une année. L'utilisation de ces données à l'état brute est source d'erreurs. Il est donc indispensable de corriger ces données avant leur traitement.

Corrections des données pluviométriques

- 15 Les données pluviométriques sont bonnes dans l'ensemble, mais comportent quelques lacunes surtout pour les postes de Tafiré et Niakaramandougou. Le comblement des données manquantes à une station a été effectué à partir des valeurs provenant de la station voisine ayant fonctionné durant le mois manquant. La formule la plus simple pour combler, sans erreur majeure les lacunes des séries, est de remplacer la valeur manquante par une moyenne pondérée par la tendance mensuelle des stations (Musy et Laglaine, 1992 : cité par Riad, 2003). C'est ainsi que les données mensuelles manquantes pour la station de Ferkessédougou au cours des années 1981, 1982, 1994 et 1995 ont été comblées avec celles de la station d'Ouangolodougou. Les données manquantes des mois d'octobre (1966), mai (1967), novembre et décembre (1979) et janvier et février (1980) à la station de Boundiali ont été reconstituées à l'aide des données de la station de Korhogo aéroport.
- 16 La méthode des doubles masses (doubles cumuls) a été utilisée afin de vérifier l'homogénéité des séries de l'ensemble du réseau de postes pluviométriques.
- 17 Le principe de cette méthode graphique consiste à vérifier l'homogénéité des valeurs mesurées de la station à tester en les corrélant avec celles de référence. Cette opération permet de tester l'homogénéité et de critiquer les données brutes du réseau pluviométrique. Cette comparaison utilise, au pas de temps choisi, non pas les valeurs observées, mais leur cumul (Meylan et Musy, 1998 in Riad, 2003). Dans notre cas, le test du double cumul a montré que les données des différentes stations pluviométriques sont homogènes avec de très forts coefficients de corrélation.

Correction des données hydrométriques

- 18 Dans la littérature, plusieurs techniques existent pour reconstituer les données manquantes. Dans le cas de stations hydrométriques placées sur un même cours d'eau (transposition géographique, conservation des volumes, etc.), on peut utiliser des critères de proportionnalité analogues. Les méthodes basées sur l'analyse des régressions linéaires et des corrélations (relation pluie-pluie ou pluie-débit, relations interpostes) peuvent également être utilisées à cet effet (Musy et Higy, 2003) in Koffi (2007). Dans notre étude, nous avons utilisé la méthode du critère de proportionnalité analogue pour reconstituer les données de débits de la station de Tortiya. Les différentes surfaces des sous-bassins ont été calculées et les rapports ont été utilisés (voir équations).

$$\frac{Q_{Tortiya}}{S_{Tortiya}} = \frac{Q_{Tawara}}{S_{Tawara}}$$

(1)

$$Q_{Tawara} = 0,37 \cdot Q_{Tortiya}$$

(2)

$$Q_{Tawara} = 14,6 \cdot Q_{Séguékiélé} \quad (3)$$

$$Q_{Séguékiélé} = 0,025 \cdot Q_{Tortiya}$$

(4)

- 19 En régime tropical, les débits d'étiage sont très faibles, voire nuls, et peuvent être remplacés, très souvent, par les moyennes interannuelles sans avoir recours à des corrélations mensuelles ou aux débits journaliers (Ardoin-Bardin, 2004). Cette méthode a été utilisée en complément de la première.

Méthodes d'étude de la variabilité climatique

Filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2 ou méthode des moyennes mobiles pondérées

- 20 Une meilleure observation des fluctuations interannuelles s'obtient en éliminant les variations saisonnières. Dans ce cas, les totaux pluviométriques annuels sont pondérés en utilisant les équations suivantes recommandées par Assani (1999) :
- 21 pour $3 \leq t \leq (n-2)$ (5)
- 22 où est le total pluviométrique pondéré du terme t, et sont les totaux pluviométriques de deux termes qui précèdent immédiatement le terme t, et et sont les totaux pluviométriques observés de deux termes qui suivent immédiatement le terme t.
- 23 Les totaux pluviométriques pondérés des deux premiers termes et des deux derniers termes de la série sont calculés au moyen des expressions suivantes (n étant la taille de la série) :

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

(6)

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

(7)

$$X_{(n-1)} = 0,25x_{(n-2)} + 0,50x_{(n-1)} + 0,25x_{(n)} \quad (8)$$

$$X_{(n)} = 0,54x_{(n)} + 0,46x_{(n-1)} \quad (9)$$

- 24 Les indices centrés et réduits des hauteurs pluviométriques annuelles pondérées obtenues sont calculés pour mieux distinguer les périodes de déficit et d'excédent pluviométriques.
- 25 Les séries de débits sont soumises aux mêmes procédures de calculs que les séries pluviométriques.

Tests statistiques de détection de rupture

- 26 Il existe dans la littérature plusieurs méthodes de détection de ruptures des séries chronologiques (test de Pettitt, statistique de Buishand, procédure bayésienne de Lee et Heghinian, segmentation de Hubert). Dans cette étude, nous avons retenu le test de Pettitt et la méthode bayésienne de Lee et Heghinian pour leur puissance et robustesse ainsi que leur utilisation courante dans de nombreux travaux.

Test de Pettitt

- 27 Le test de Pettitt (1979) est non paramétrique. Il dérive du test de Mann-Whitney. L'absence d'une 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 définie par :

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij} \quad (6)$$

où :

$$D_{ij} = \text{sgn}(X_i - X_j) \quad = \text{avec } \text{sgn}(X)$$

si $X > 0$; 0 si $X = 0$ et -1 si $X < 0$.

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 $U_{t,N}$

Méthode bayésienne de Lee et Heghinian

- 28 La méthode bayésienne de Lee et Heghinian (1977) vise à confirmer ou à infirmer l'hypothèse d'un changement de moyenne dans la série. L'absence de rupture dans la série constitue l'hypothèse nulle. La procédure repose sur le modèle suivant :

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

Où les ε_i sont indépendants et normalement distribués, de moyenne nulle et de variance σ^2 .

Les variables τ , μ , δ et σ sont des paramètres inconnus. τ et δ représentent respectivement la position de la rupture dans le temps et l'amplitude du changement sur la moyenne. La méthode fournit donc la probabilité que la rupture se produise au moment τ dans une série où on suppose a priori qu'il y a effectivement un changement à un moment indéterminé.

Calcul des variations moyennes

- 29 Pour les variables hydroclimatiques dont la série chronologique présente une rupture, il est intéressant de calculer les variations moyennes de part et d'autre de la rupture en appliquant, comme Ardoin-Bardin (2004), la formule suivante :

$$D = \frac{\bar{x}_j}{\bar{x}_i} - 1 \quad (10)$$

Où

$$\bar{x}_j$$

représente la moyenne sur la période après la rupture ;

$$\bar{x}_i$$

la

moyenne sur la période avant la rupture.

Tracé des isohyètes

- 30 Connaissant la pluviométrie P en plusieurs points (stations) de coordonnées (X ; Y), on l'extrapole sur toute la zone d'étude à l'aide du logiciel Surfer 8.0 par la méthode du

krigeage linéaire. Cette méthode permet d'avoir une idée de l'évolution spatio-temporelle de la pluviométrie sur la zone d'étude.

Étude du tarissement des cours d'eau et des volumes mobilisés par les aquifères

Calcul du coefficient de tarissement : loi de Maillet et méthode dichotomique

31 Pour le calcul du coefficient de tarissement, c'est la méthode de Maillet améliorée par
résolution dichotomique et proposée par Savané et *al.* (2003) que nous avons utilisée. Elle est
basée sur la loi de Maillet dont l'expression mathématique est la suivante :

$$32 \quad Q_t = Q_0 e^{-kt} \quad (11)$$

33 Où :

34 Q_t = débit à l'instant t donné ;

35 Q_0 = débit initial (débit au début du tarissement) ;

36 k = coefficient de tarissement de Maillet.

37 Dans la méthode dichotomique, on estime que la courbe annuelle de tarissement est
l'expression de la vidange du réservoir souterrain.

38 La quantité d'eau récupérée à la station de jaugeage correspond exclusivement aux volumes
dynamiques (V) mobilisés par l'ensemble des aquifères du bassin. L'équation du coefficient
de tarissement (k) s'écrit :

$$\frac{e^{-kt}}{k} + \frac{V}{Q_0} - \frac{1}{k} = 0 \quad (12)$$

Évaluation du volume mobilisé par les aquifères

39 Le volume mobilisé par l'ensemble des aquifères est donné par l'équation :

$$V_{\text{mobilisé}} = \int_0^{+\infty} Q_0 e^{-kt} dt = \frac{Q_0}{k} \quad (13)$$

40 Q_0 est exprimé en m^3/s et k en jours^{-1} . Q_0 est multiplié par 86 400 pour la compatibilité des
unités.

Évaluation de la recharge des aquifères

41 C'est la méthode classique de Thornthwaite qui a été utilisée compte tenu des données
disponibles. Seules les valeurs d'excédent appelé encore infiltration efficace ont été retenues
à la fin du bilan hydrique de chaque station durant les différentes périodes.

Dynamique de l'occupation du sol

Données et outils

42 Les images satellitaires optiques utilisées proviennent des capteurs TM (Thematic Mapper) et
ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) de Landsat. Elles se répartissent en quatre scènes
(197-053, 197-054, 198-053 et 198-054) centrées sur la ville de Korhogo. Elles ont été acquises
le 16 novembre 1986 pour le capteur TM et le 16 janvier 2000 pour le capteur ETM+. Ces
images sont fournies gratuitement par le site américain : <http://glovis.usgs.gov> :8080/
esdi et ont toute une résolution spatiale de 30 m.

43 Outre ces images, la carte topographique du degré carré de Korhogo au 1/200 000 établie par
l'Institut Géographique National (IGN) de France en 1979 a été utilisée.

44 Le traitement des images s'est fait grâce au logiciel ENVI 4.1 et le logiciel Paint a servi à la
perfection des cartes obtenues.

Méthodologie

45 La méthode de comparaison diachronique de classification a été utilisée comme dans les
travaux de Hoang et *al.* (2008) pour détecter les changements d'occupation des sols. Le

principe de cette méthode est basé sur la classification de deux scènes acquises à des dates différentes. Les principales étapes sont la correction géométrique des images, l'amélioration de leur qualité et la classification proprement dite.

46 En ce qui concerne la première étape (la correction géométrique), nous n'y avons pas eu recours, car les images Landsat TM et ETM+ ont été déjà corrigées selon le système de projection UTM WGS (84) Zone 30 Nord.

Amélioration du contraste des images

47 Quatre (4) scènes images couvrent entièrement la zone d'étude. Pour des problèmes liés à la qualité (présence de nuages) et aux dates communes, nous avons abandonné les images des scènes 198-053 et 198-054. Une zone test commune aux scènes 197-053 et 197-054 de 1986 et 2000 et ne présentant pas de contraste a été retenue pour l'étude. Elle est comprise entre les longitudes 4° 55' et 6° 4' ouest et les latitudes 9° 25' et 10° 20' nord.

48 L'analyse en composantes principales (ACP) et l'indice de végétation (NDVI) ont été mis en œuvre pour sélectionner les meilleures bandes spectrales d'une part et augmenter le contraste sol-végétation d'autre part.

49 Plusieurs compositions colorées ont été réalisées dans le but d'associer les canaux qui véhiculent le maximum d'informations. En effet, les capteurs TM et ETM+ disposent de sept bandes spectrales, allant du visible à l'infrarouge thermique. Ce nombre important de canaux permet d'essayer de multiples combinaisons de trois (3) canaux pour obtenir des synthèses en couleurs additives mettant en évidence les différents thèmes. Pour l'image de 1986, la composition colorée issue des canaux 3, 4 et 7 a été retenue. Quant à l'image de 2000, la composition colorée des canaux 2, 3 et 1 a donné le meilleur résultat.

Classification

50 Elle comprend le choix des parcelles d'entraînement et la classification supervisée *a priori*.

Choix des parcelles d'entraînement

51 Les parcelles d'entraînement constituent la base des traitements pour la classification. Le choix de ces parcelles se fait grâce au travail de terrain, aux documents cartographiques et à l'interprétation visuelle des images en composition colorée.

52 Ces parcelles ont été localisées et tracées sur les compositions colorées qui représentent mieux la vérité terrain. Leurs contours ont été délimités en évitant les pixels de bordure afin de limiter la variabilité intraparcellaire.

Classification supervisée

53 On retrouve au sein de la classification supervisée plusieurs types de classifications (classification hypercube, classification par la Distance minimum, classification par la Distance de Mahalanobis, classification par le Maximum de vraisemblance...). Nous avons utilisé la classification supervisée par l'algorithme du maximum de vraisemblance, car elle a donné de bons résultats au cours des travaux de plusieurs auteurs parmi lesquels (N'guessan, 1990 ; Bigot et al., 2005 ; Kouamé et al., 2007 ; Koné et al., 2007 ; Hoang et al., 2008, Tapboda et Fotsing, 2010). La classification assistée par maximum de vraisemblance consiste à classer les pixels en fonction de leur ressemblance avec les comptes numériques d'objets géographiques de référence préalablement déterminés sur l'image (parcelles d'entraînement) et validés par les relevés de terrain. Le profil numérique des parcelles d'entraînement est alors supposé représentatif du profil numérique de l'ensemble de la classe de l'image.

54 La validation des classifications a été réalisée à l'aide d'outils statistiques que sont la matrice de confusion et l'indice Kappa. Selon Chalifoux et al.(2006), l'indice Kappa s'étend de 0 à 1 et se divise en cinq catégories : accord très faible de 0 à 0,20 ; accord faible de 0,21 à 0,40 ; accord modéré de 0,41 à 0,60 ; accord substantiel de 0,61 à 0,80 ; accord presque parfait de 0,81 à 1.

Analyse statistique

55 Pour l'analyse de la dynamique de l'occupation du sol, nous avons en plus du calcul des variations, évalué le taux moyen annuel d'expansion spatiale en utilisant l'une des formules

appliquées par Bernier (1992) cité par Oloukoi et *al.* (2006). Ici, la variable considérée est la superficie (S). Ainsi, pour S₁ et S₂, correspondant respectivement à la superficie d'une catégorie d'occupation du sol à la date t₁ et t₂, le taux d'expansion spatiale moyen annuel (T) est évalué à partir de la formule suivante :

$$T = \frac{(\ln S_2 - \ln S_1)}{t \ln e} \times 100 \quad (14)$$

56 OÙ : t est le nombre d'années d'évolution ;

57 ln le logarithme népérien ;

58 e la base des logarithmes népériens.

Résultats

Variabilité hydroclimatique

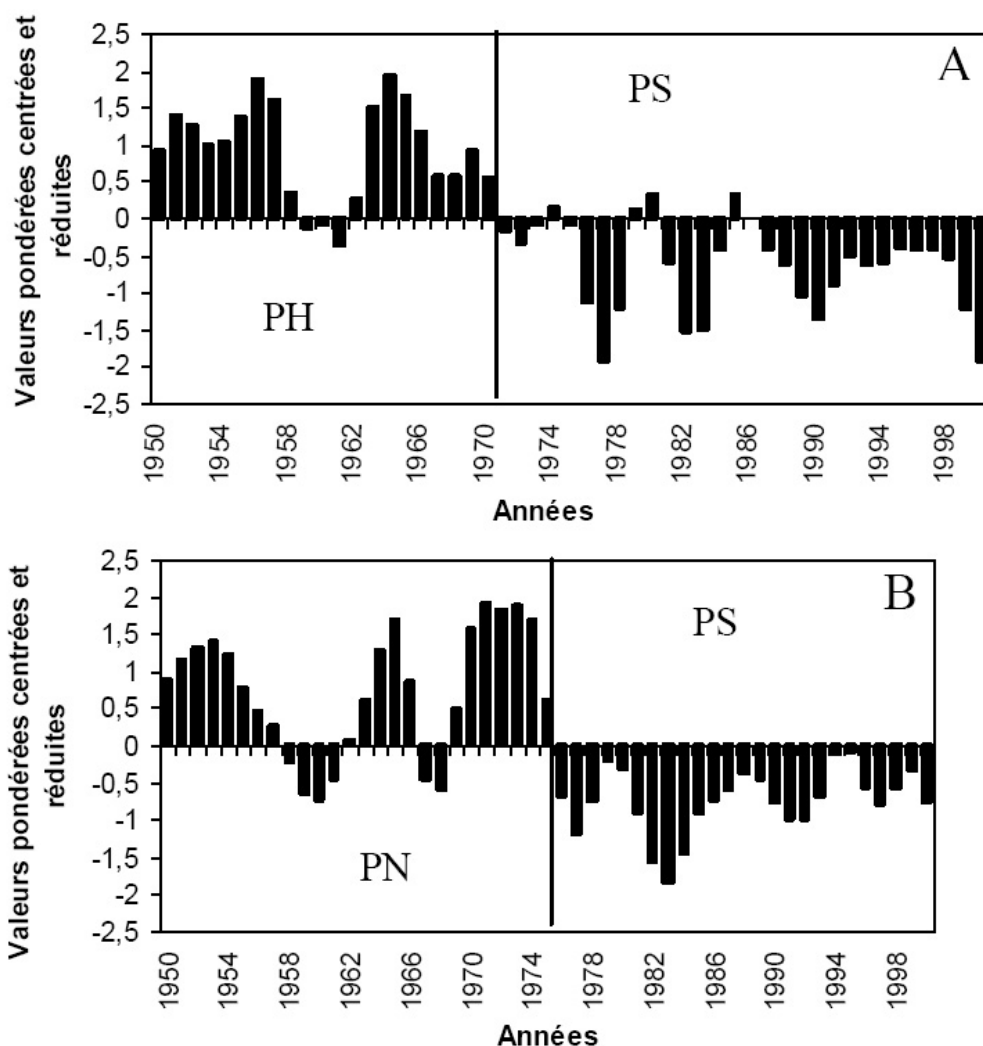
59 L'application des indices centrés réduits en particulier le filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2 a permis de suivre les fluctuations climatiques du bassin. Elles sont marquées par une succession de périodes humides (PH) entre 1950 et 1970 et de périodes sèches (PS) après l'année 1970 pour la plupart des stations pluviométriques. Pour la station de Boundiali, on note une période normale allant de 1950 à 1975 suivie d'une période sèche (1976-2000).

60 À côté de ces différentes périodes, des tendances à la reprise des pluies s'observent à partir des années 1996, 1998 et 1999 respectivement pour les stations de Tafiré, Ferkessédougou et Niakaramandougou. Le tableau 1 récapitule ces résultats et la figure 4 illustre le découpage obtenu aux stations de Korhogo et Boundiali.

Tableau 1. Différentes tendances obtenues par l'application des moyennes mobiles pondérées (1950-2000) / Different tendencies obtained by application of mobile means pondered (1950-2000)

Station	Période humide	Période sèche	Période normale
Korhogo	1950-1970	1971-2000	-
Ferkessédougou	1950-1970 ; 1998-2000	1971-1997	-
Ouangolodougou	1950-1970	1971-2000	
Boundiali	-	1976-2000	1950-1975
Tafiré	1950-1968 ; 1996-2000	1969-1995	-
Niakaramandougou	1950-1967 ; 1999-2000	1968-1998	-

Figure 4. Évolution interannuelle de la pluviométrie avec les indices centrés réduits des totaux pluviométriques annuels pondérés (A) à la station de Korhogo et (B) à la station de Boundiali au cours de la période 1950-2000 / Interannual rainfall evolution with index centered and reduced of total precipitations (A) to Korhogo station and (B) to Boundiali station during 1950-2000.



61 L'application des tests de rupture a permis de situer les périodes qui marquent une modification du régime climatique au sein des séries chronologiques. Les ruptures se situent majoritairement entre 1968 et 1970 au niveau du bassin (tableau 2). Les déficits pluviométriques ont été calculés de part et d'autre de la rupture. Les résultats montrent que les déficits pluviométriques se situent entre 12 % (Niakaramandougou) et 22 % (Ouangolodougou et Niakaramandougou) avec une moyenne de 16,5 % pour l'ensemble du bassin (tableau 2). On remarque que les déficits pluviométriques les plus importants sont enregistrés à Ouangolodougou et Boundiali et le plus faible à Niakaramandougou dans la partie sud du bassin.

Tableau 2. Rupture et déficits pluviométriques des stations du bassin (1950-2000) / Breaks and rainfall deficits of catchment stations (1950-2000).

Station	Année de rupture	Moyenne avant rupture (mm)	Moyenne après rupture (mm)	Variation (%)
Korhogo	1970	1405	1218	-13
Ferkessédougou	1970	1401	1161	-17
Ouangolodougou	1970	1300	1011	-22
Boundiali	1975	1674	1299	-22
Tafiré	1968	1206	1047	-13

Niakaramandougou	1968	1225	1072	-12
------------------	------	------	------	-----

62 Quant aux séries hydrométriques, le filtre passe-bas de Hanning a mis en évidence une période humide (PH) allant de 1962 à 1974 suivie d'une période sèche (PS) de 1975 à 1994. Les modules avant et après rupture sont respectivement 101,6 m³/s et 38,1 m³/s avec un déficit de 62,5 % (tableau 3).

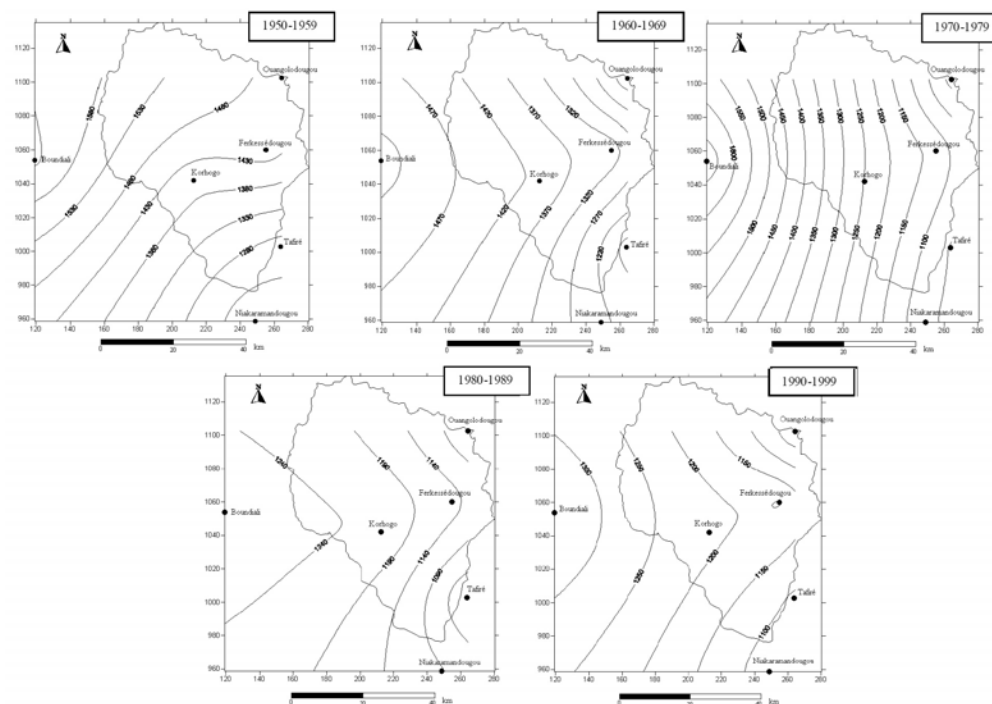
Tableau 3. Déficit hydrométrique de la station de Tortiya (1962-1994) / Hydrometrical deficit of Tortiya station (1962-1994).

Station	Référence	Module annuel avant rupture (m ³ /s)	Module annuel après rupture (m ³ /s)	Variation (%)
Tortiya	1974	101.6	38,1	-62,5

Variabilité spatio-temporelle des précipitations

63 L'évolution spatio-temporelle des pluies du bassin a été étudiée au cours de cinq décennies (figure 5). L'analyse des cartes isohyètes montre un gradient de pluviométrie de direction est-ouest croissant. Les décennies 1950-1959 et 1960-1969 sont les plus humides comme en témoignent respectivement les valeurs des isohyètes 1530 mm et 1470 mm rencontrées sur le bassin. La décennie 1970-1979 apparaît avec un tracé régulier des courbes isohyètes. Toutefois, au cours de cette décennie, la pluviométrie du bassin est en nette régression. Cette régression est soulignée par l'apparition de l'isohyète 1250 mm aux environs de Korhogo.

Figure 5. Évolution spatio-temporelle des isohyètes du bassin au cours de cinq décennies / Spatio-temporal evolution of isohyets of catchment during five decades.



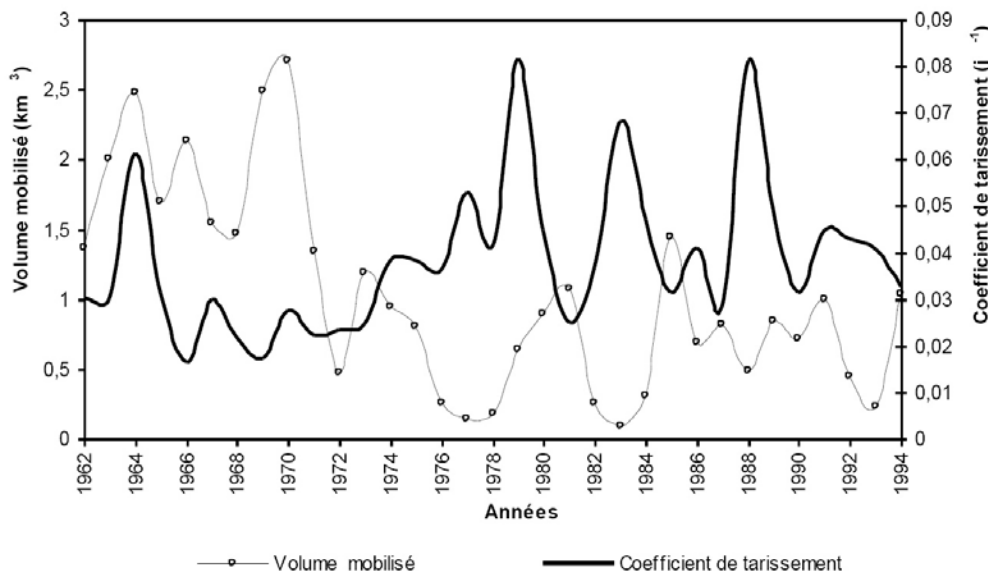
64 Les décennies 1980-1989 et 1990-1999 sont les plus déficitaires. Au cours de celles-ci, on remarque un tracé irrégulier des isohyètes. L'apparition de l'isohyète 1300 mm aux environs de Boundiali et le glissement de l'isohyète 1250 mm à l'ouest de Korhogo traduisent la baisse de la pluviométrie au cours de ces deux dernières décennies.

Tarissement des cours d'eau, volumes mobilisés par les aquifères et infiltrations efficaces

Variation des coefficients de tarissement et des volumes mobilisés

65 La figure 6 montre l'évolution des coefficients de tarissement et des volumes mobilisés annuels calculés sur la période 1962-1994 pour la station de Tortiya (exutoire).

Figure 6. Évolution du coefficient de tarissement et du volume mobilisé du Bandama à Tortiya au cours de la période 1962-1994 / Evolution of recession coefficients and mobilized volume of Bandama at Tortiya during 1962-1994.



66 Une variation importante du coefficient de tarissement et du volume mobilisé ressort de l'analyse des graphes de cette figure 6. Les valeurs du coefficient de tarissement se situent entre $1,63 \cdot 10^{-2} \text{ j}^{-1}$ et $8,16 \cdot 10^{-2} \text{ j}^{-1}$ avec une moyenne de $3,84 \cdot 10^{-2} \text{ j}^{-1}$. Quant aux volumes mobilisés, les valeurs vont de $0,08 \text{ km}^3$ à $2,71 \text{ km}^3$. On remarque que le coefficient de tarissement et le volume mobilisé varient en sens inverse l'un de l'autre à partir de 1972. Autrement dit, lorsque le coefficient de tarissement augmente, le volume mobilisé diminue et vice-versa. Les plus fortes valeurs du tarissement interviennent après les années 1970 plus précisément en 1979 ($8,16 \cdot 10^{-2} \text{ j}^{-1}$), 1983 ($6,8 \cdot 10^{-2} \text{ j}^{-1}$) et 1988 ($8,12 \cdot 10^{-2} \text{ j}^{-1}$).

Évaluation de la recharge des nappes

67 Pour mieux apprécier les variations de la recharge, le bilan hydrique a été évalué pour chaque station du bassin sur les deux dernières décennies 1980-1989 et 1990-1999. Les résultats récapitulatifs des valeurs de la pluviométrie et de l'infiltration efficace (i.e.) encore appelée excédent sont consignés dans le tableau 4.

Tableau 4. Évolution de la pluviométrie et de l'infiltration efficace du bassin / Rainfall and net infiltration evolution in catchment.

Station	1972-2000		1980-1989		1990-1999	
	P(mm)	i.e.(mm)	P(mm)	i.e.(mm)	P(mm)	i.e.(mm)
Korhogo	1222	232	1236	279	1211	219
Ferkessédougou	1259	278	1162	217	1203	249
Ouangolodougou	1012	143	1049	173	1012	137
Boundiali	1487	486	1267	307	1351	368
Tafiré	1056	110	999	134	1092	104
Niakaramandougou	1084	83	1094	162	1072	28

Légende : i.e. : infiltration efficace net infiltration

68 L'analyse du tableau 4 montre que d'une manière générale, l'infiltration efficace et la pluviométrie évoluent dans le même sens au niveau du bassin au cours des deux dernières décennies à l'exception de la station de Tafiré. Au cours de ces deux décennies (1980-1989 et 1990-1999), on remarque que l'infiltration efficace est en baisse pour les stations de Korhogo (-21,50 %), Ouangolodougou (-20,81 %), Tafiré (-22,39 %) et Niakaramandougou (-82,72 %). Par contre, pour les stations de Ferkessédougou et Boundiali, on enregistre respectivement une augmentation de l'infiltration efficace de (+14,75 %) et (+19,87 %).

Occupation du sol

Analyse de la précision thématique des produits cartographiques

69 Les tableaux 5 et 6 montrent pour chacune des classes, le niveau de fiabilité moyen et les principales confusions observées. Dans l'ensemble, les résultats sont similaires avec des précisions globales de 86,51 % et 86,57 % respectivement pour l'image de 1986 et 2000. Les indices Kappa sont presque parfaits allant de 0,82 (1986) à 0,84 (2000).

Tableau 5. Matrice de confusion de la classification de l'image Landsat TM de 1986. Confusion matrix of classification from Landsat TM image of 1986.

		Pixels de vérification						
		Eau	Habitats	Sols nus	Cultures	Cultures irriguées	Savane arborée	Forêts
Pixels affectés (classification)	Eau	91,16	0	1,55	0,08	0,07	0,19	0,06
	Habitats	0,24	76,76	2,48	1,05	0,52	0	4,62
	Sols nus	2,77	0,69	75,47	2,55	1,91	1,10	0,91
	Cultures	1,26	21,30	11,49	93,54	1,32	0,04	2,74
	Cultures irriguées	1,21	0,69	3,73	0,08	85,43	0,82	9,36
	Savane arborée	2,28	0	1,55	2,33	2,72	93,93	23,71
	Forêts	1,07	0,55	3,73	0,38	8,02	3,92	58,60
Total	100	100	100	100	100	100	100	

Tableau 6. Matrice de confusion de la classification de l'image Landsat ETM+ de 2000 / Confusion matrix of classification from Landsat ETM+ image of 2000.

		Pixels de vérification						
		Eau	Habitats	Sols nus	Cultures	Cultures irriguées	Savane arborée	Forêts
Pixels affectés (classification)	Eau	80,96	0	0	0	0	0	3,5
	Habitats	4,95	87,09	1,29	4	0,07	0,61	0,11
	Sols nus	0,79	0,27	67,40	3,82	0,22	3,91	0,55
	Cultures	2,52	11,15	20,94	88,94	0,29	2,24	0,44
	Cultures irriguées	8,82	1,17	7,25	2,75	98,92	0,31	9,08
	Savane arborée	1,17	0,32	2,48	0,39	0,36	90,78	4,05
	Forêts	0,79	0,55	0,64	0,10	0,14	2,15	82,28
Total	100	100	100	100	100	100	100	

Analyse des confusions thématiques

70 D'une manière générale, la précision cartographique obtenue pour les classes d'occupation identifiées est bonne ; car, dépassant 70 %. Cependant, au niveau de l'image de 1986, la classe forêts a une précision de 58,60 %. Quant à l'image de 2000, la classe sols nus ou dégradés enregistre une précision de 67,40 %. Les classes eau, habitats, cultures, cultures irriguées et savane arborée sont bien classées. Les thèmes les plus mal classés sont sols nus ou dégradés et forêts. Toutefois, des confusions ont été notées entre certaines classes d'occupations du sol.

71 Au niveau de l'image de 1986, la plus forte confusion (23,71 %) se situe entre forêts et savane. Cette confusion peut s'expliquer par le fait que ces deux entités se comportent du point de vue radiométrique de la même manière, c'est-à-dire qu'elles ont la même réflectance. À côté de cette valeur de 23,71 %, on note une confusion de 21,30 % entre la classe cultures et habitats. Elle serait due également à la similarité des réflectances entre ces deux thèmes.

72 Pour l'image de 2000, la plus forte confusion se situe entre les classes sols nus ou dégradés et cultures (20,94 %). Une explication plausible de cette confusion serait liée au fait que se situant en saison sèche, les zones de cultures desséchées (sans activité chlorophyllienne) ou débroussaillées se comportent radiométriquement comme des sols nus.

Analyse de l'évolution de l'occupation du sol de 1986 à 2000

73 L'analyse qualitative de la dynamique de l'occupation du sol passe par la présentation de la carte de 1986 et celle de 2000 (Figures 7 et 8). Les modifications spatio-temporelles qui ont lieu au cours de ces quinze années s'observent clairement. Le fait notable est la disparition de la savane arborée au profit des cultures et des sols nus ou dégradés. Ces modifications s'apprécient quantitativement par les superficies et les taux d'expansion spatiale moyens annuels de chaque classe d'occupation du sol (Tableau 7).

Figure 7. Carte d'occupation du sol de la zone test en 1986. Land cover map of the test area in 1986.

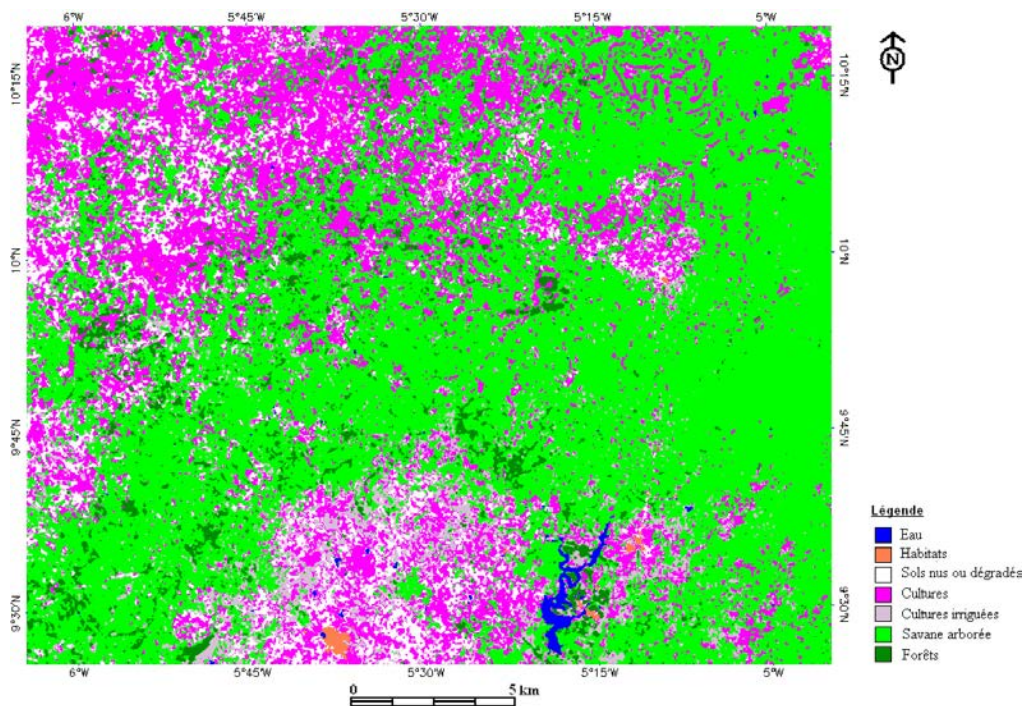
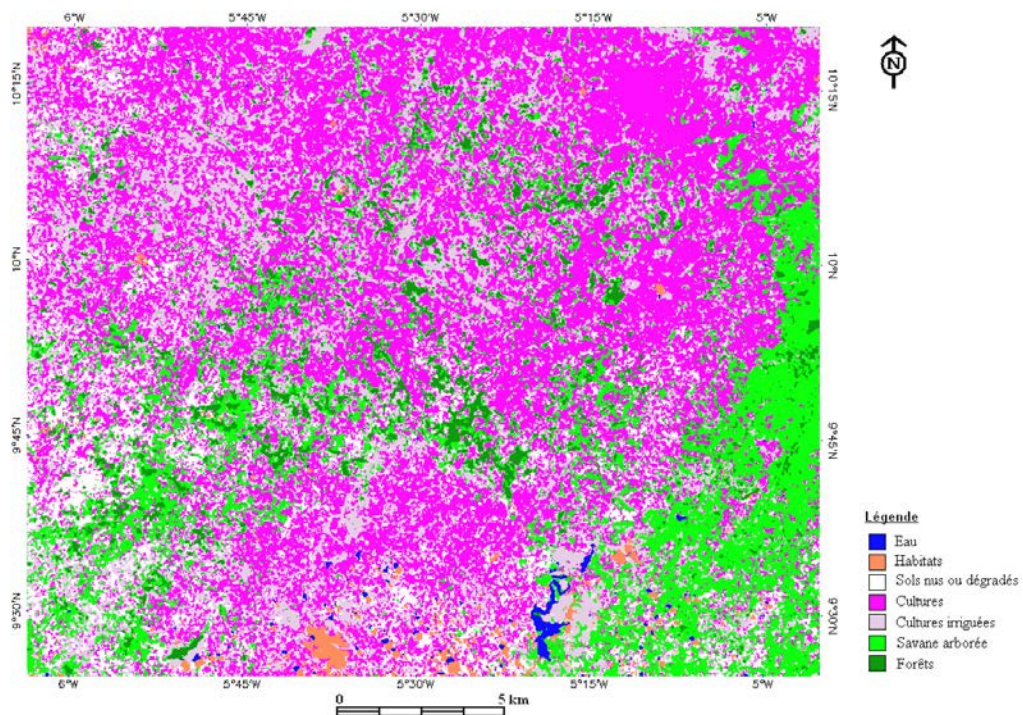


Figure 8. Carte d'occupation du sol de la zone test en 2000 / Land cover map of the test area. in 2000.



74 L'analyse du tableau 7 montre que le taux des retenues d'eau est passé de 1,86 % en 1986 à 0,91 % en 2000 soit une réduction de 0,95 %. La classe habitats enregistre une augmentation

de 3,1 % passant ainsi de 0,88 % en 1986 à 3,98 % en 2000. Le taux des sols nus ou dégradés varie de 13,34 % en 1986 à 19,98 % en 2000, soit une hausse de 6,64 %. Les cultures et les cultures irriguées passent respectivement de 18,87 % à 29,75 % et de 6,45 % à 17,17 % entre 1986 et 2000. Le taux d'accroissement est de 10,88 % pour les cultures et 10,72 % pour les cultures irriguées. Quant à la savane arborée, son taux d'occupation est passé de 46,01 % en 1986 à 17,01 % en 2000, ce qui correspond à une réduction de 29 %. Les forêts enregistrent une baisse d'occupation de 1,38 % passant ainsi de 12,59 % en 1986 à 11,21 % en 2000.

Tableau 7. Évolution des zones d'occupation du sol au niveau de la zone test entre 1986 et 2000. Evolution of land cover areas of test zone between 1986 and 2000.

Classes d'occupation du sol	Année 1986		Année 2000		Variation (%)	Taux d'expansion spatiale moyen annuel (%)
	Superficie (km ²)	Proportion (%)	Superficie (km ²)	Proportion (%)		
Eau	237,92	1,86	116,29	0,91	-0,95	-5,11
Habitats	112,37	0,88	508,59	3,98	+3,1	10,78
Sols nus ou dégradés	1705,07	13,34	2553,19	19,98	+6,64	2,88
Cultures	2411,02	18,87	3801,67	29,75	+10,88	3,25
Cultures irriguées	824,33	6,45	2194,11	17,17	+10,72	6,99
Savane arborée	5878,98	46,01	2172,38	17,01	-29	-7,11
Forêts	1609,03	12,59	1432,49	11,21	-1,38	-0,83

75 De façon générale, on constate que les taux d'occupation des classes habitats, sols nus ou dégradés, cultures et cultures irriguées ont augmenté entre 1986 et 2000. Cette augmentation s'est opérée principalement au détriment de la savane arborée et des forêts qui ont régressé. De vastes superficies autour des centres urbains ne comportent plus que de sols cultivés. Il y a donc un passage des zones naturelles vers les zones anthropisées dû globalement en grande partie à l'augmentation de la pression humaine.

Discussion

Variabilité hydroclimatique du bassin

76 L'application du filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2 a permis de dégager les différentes tendances au sein des séries hydroclimatiques. Elles sont marquées généralement par une alternance de périodes sèches et humides. Les périodes humides se situent avant les années soixante-dix (1970). Les dates de rupture données par les tests statistiques sont comprises entre 1968 et 1970 et coïncident avec les découpages donnés par le filtre passe-bas. Ces ruptures marquent ainsi une modification du régime pluviométrique. L'impact de ces modifications du régime pluviométrique est traduit par des déficits pluviométriques allant de 12 à 22 %. Les résultats obtenus sont en accord avec les travaux de nombreux auteurs dans la sous-région ouest-africaine entre autres Paturel *et al.* (1998), Ardoin-Bardin (2004) et en particulier en Côte d'Ivoire (Savané *et al.*, 2001 ; Goula *et al.*, 2006 ; Soro *et al.*, 2006) qui ont trouvé des ruptures autour des années 1970 dans les séries pluviométriques.

77 Au niveau de la série hydrométrique de Tortiya, la rupture est intervenue en 1974. Le déficit d'écoulement qui en est résulté est de 62,5 % soit environ le triple de celui des précipitations. Ce résultat est similaire à celui obtenu par Olivry (2002), qui note que les débits du fleuve Niger à Koulikoro (Mali), à sa sortie de la zone soudanienne, diminuent de 60 % après 1970 du fait d'une diminution de 30 % de la pluviométrie. Dans le même ordre d'idée, Mahé *et al.* (2000) et Mahé (2009) soulignent une baisse de plus de 80 % des débits du Bani à Douna au Mali depuis les années 1950, conséquences de la diminution persistante des pluies depuis 1970.

78 En dehors de la zone ouest-africaine, les effets de la variabilité climatique ont atteint l'Afrique du Nord. En Algérie, les travaux de H. Meddi et M. Meddi (2009) montrent une baisse des précipitations annuelles qui dépasse 36 % dans la région de Mascara et à l'extrême ouest.

Dans le même ordre d'idée, en Australie, les travaux de Daniell (2009) montrent que les changements et la variabilité climatique ont entraîné une sévère sécheresse au cours de la période 1996-2007. Cette sécheresse a provoqué des restrictions en eau pour plus de 90 % de la population, perturbé la production agricole, réduit la provision de l'élevage et entraîné la faillite de certaines fermes agricoles (Daniell, 2009). De même, de grandes portions du territoire australien ont vu leurs écoulements d'eau de surface s'arrêter ou diminuer (Daniell, 2009).

Tarissement des cours d'eau, volumes mobilisés et recharges des nappes

- 79 L'étude du tarissement montre une tendance à la croissance des coefficients de tarissement après les années 1970. Des études menées par certains auteurs en Afrique de l'Ouest dont Bricquet et *al.*(1997), Mahé et *al.*(2000) ont abouti à la même conclusion. Cette augmentation du coefficient de tarissement a été signalée sur des cours d'eau ivoiriens par certains auteurs, dont Savané et *al.*(2001), à la station de Flampleu sur le bassin du Cavally et Saley (2003) dans la région de l'ouest montagneux. Dans le même ordre d'idée, Goula et *al.*(2006) et Kouassi (2007) notent une augmentation du coefficient de tarissement dans le bassin versant du N'zi. Pour le dernier auteur, les coefficients de tarissement varient entre $2,78 \cdot 10^{-2} \text{ j}^{-1}$ et $3,91 \cdot 10^{-2} \text{ j}^{-1}$ avant 1968, identifiée comme l'année de rupture au sein des séries hydrométriques.
- 80 Les travaux de Bricquet et *al.*(1997) ont montré que le tarissement s'est considérablement accéléré depuis les années 70 conduisant à une vidange rapide des nappes. À preuve, ce coefficient est passé de $0,02 \text{ j}^{-1}$ à $0,04 \text{ j}^{-1}$ pour le Sénégal et le Niger. Olivry (1997) a également noté ce phénomène sur un nombre très varié de bassins, tels que le Chari dans le bassin versant du lac Tchad, la Sangha en Afrique centrale, pour lesquels l'auteur parle « d'hyper-tarissement ». D'après la loi de Darcy, le coefficient de tarissement est directement proportionnel à la conductivité hydraulique (perméabilité), à la porosité, à la surface d'échanges nappe-rivière et inversement proportionnel aux dimensions de l'aquifère (Bricquet et *al.*, 1997). L'augmentation considérable du coefficient de tarissement dans la période sèche correspond essentiellement à une réduction de l'extension des aquifères et donc de la largeur des nappes de versant.
- 81 La baisse pluviométrique s'est répercutée sur la recharge des nappes. Pour preuve, l'infiltration efficace moyenne est passée de 212 mm au cours de la décennie 1980-1989 à 184,17 mm pour la décennie 1990-1999, soit un déficit de 13,13 %.

Occupation du sol

- 82 Les valeurs de précision globale (86,51 % et 86,57 %) de même que celles des coefficients de Kappa (0,82 et 0,84) obtenus respectivement pour l'image de 1986 et 2000 témoignent de la validité des cartes d'occupation générées. Ces résultats sont corroborés par les travaux de Pontius (2000) cité par Oloukoi et *al.* (2006) qui ont montré qu'une étude de l'occupation des sols peut être validée si l'indice Kappa est compris entre 50 % et 75 %.
- 83 Ces images, bien que de résolution faible (30 m), ont permis de dégager la tendance générale de la dynamique de l'occupation des sols. Cette tendance révèle l'augmentation des cultures et des sols nus ou dégradés aux dépens des forêts et des savanes. Ce constat est similaire aux conclusions de Cecchi et *al.*(2009) dans une étude de la dynamique de l'occupation du sol dans la même région. Beaucoup préoccupant, il rejoint des observations comparables mises en exergue récemment pour d'autres régions de la Côte d'Ivoire. En effet, une étude diachronique réalisée par Bigot et *al.*(2005) sur la forêt classée du Haut-Sassandra à partir de l'imagerie SPOT a révélé de profonds changements d'occupation du sol entre mars 1986 et janvier 2001. Ces auteurs notent :
- la dégradation d'une grande partie de l'espace protégé de la forêt par le biais de l'installation de campements agricoles illégaux ;
 - la déforestation totale de l'enclave du V12 en moins de 20 ans au profit des cultures pérennes à but commercial (café, cacao) malgré les prévisions et certaines interdictions ; les seules reliques forestières se situant sur les sols rocheux où la mise en culture est

difficile et peu rentable. Dans la même optique, les travaux de Brou (2005) dans le Sud-ouest ont montré une dégradation de la forêt dense. Pour cet auteur, cette dégradation est due aux activités anthropiques que sont les feux de brousse, l'exploitation abusive du bois, la création des plantations de café, de cacao... mais aussi aux phénomènes naturels (variabilité climatique). Dans le « V » baoulé, les travaux de N'guessan (1990) soulignent une régression des surfaces de forêts denses. Ces formations qui couvraient de larges surfaces d'environ 233 430 ha en 1971 le long du Bandama et du N'zi, de même que dans la pointe sud du « V » formé par ces deux fleuves, ont été largement détruites. Il ne restait plus que 18 114 ha de forêts en 1984.

- 84 Les modifications climatiques enregistrées ont certainement influencé les changements d'usage des sols qui peuvent avoir des impacts sur les écoulements. Pour preuve, les travaux de Lacombe et *al.* (2012) et Descrois et *al.* (2012) ont montré que les changements d'usage des sols ont conduit à une augmentation du risque de crue respectivement au Ghana et au Niger.

Conclusion

- 85 L'étude diachronique de la dynamique de l'occupation du sol sur une zone test du bassin couplée à celle de l'hydroclimatologie a été d'une grande utilité. Elle a montré au plan hydroclimatologique, à partir de longues séries chronologiques de pluies, sur la période 1950-2000 une variabilité climatique marquée par une succession de périodes humides et sèches. Les tests statistiques signalent des ruptures qui marquent une modification du régime pluviométrique entre 1968 et 1970. Les déficits qui en ont résulté se situent entre 12 % et 22 % avec une moyenne de 16,5 %. Pour la série hydrométrique de la station de Tortiya (exutoire) du bassin, la rupture est intervenue en 1974 avec un déficit d'écoulement estimé à 62,5 %, soit environ le triple de celui des précipitations. L'évolution des isohyètes au cours des cinq dernières décennies révèle un gradient de pluviométrie est-ouest croissant. Le caractère excédentaire des décennies 1950-1959 et 1960-1969 est encore confirmé avec l'apparition des isohyètes 1530 mm et 1470 mm. Par contre, les deux dernières décennies 1980-1989 et 1990-1999 sont les plus déficitaires. L'apparition de l'isohyète 1300 mm aux environs de Boundiali et le glissement de l'isohyète 1250 mm à l'ouest de Korhogo confirment la baisse pluviométrique de ces dernières décennies. Les valeurs du coefficient de tarissement se situent entre $1,63 \cdot 10^{-2} \text{ j}^{-1}$ et $8,16 \cdot 10^{-2} \text{ j}^{-1}$ avec une moyenne de $3,84 \cdot 10^{-2} \text{ j}^{-1}$. Quant aux volumes mobilisés, les valeurs vont de $0,08 \text{ km}^3$ à $2,71 \text{ km}^3$. L'impact de cette baisse pluviométrique s'est répercuté sur la recharge des nappes. Pour preuve, l'infiltration efficace moyenne est passée de 212 mm (1980-1989) à 184 mm (1990-1999) soit un déficit de 13,13 %.
- 86 L'étude de l'occupation du sol sur une zone test a permis de cerner sa dynamique spatio-temporelle de 1986 à 2000 caractérisée par une augmentation des classes cultures (+21,6 %) et sols nus ou dégradés (+6,64 %) au détriment des classes savane arborée (-29 %) et forêts (-1,38 %). Les évolutions hydroclimatiques ont induit des changements d'usage des sols qui peuvent avoir des répercussions hydrologiques.

Remerciements

- 87 Les auteurs remercient le Directeur territorial de l'hydraulique humaine de Côte d'Ivoire ainsi que ses collaborateurs et en particulier Monsieur Akadié, responsable de la Sous-Direction hydrologie pour les données hydrométriques (débits) mises à leur disposition. Ils réitèrent également les mêmes remerciements à l'endroit de la SODEXAM.

Bibliographie

Ardoin-Bardin S., 2004, Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II, sciences et techniques du Languedoc. Spécialité : Mécanique, Génie mécanique, Génie civil, 437 p.

Arnould M., 1961, Étude géologique des migmatites et des granites précambriens du nord-est de la Côte d'Ivoire et de la Haute-Volta méridionale. Bulletin de la direction de la géologie et de la prospection minière n° 1, Direction de la géologie et de la prospection minière, Abidjan, 175 p.

- Assani A. A., 1999, Analyse de la variabilité temporelle des précipitations (1916-1996) à Lubumbashi (Congo-Kinshasa) en relation avec certains indicateurs de la circulation atmosphérique (oscillation australe) et océanique (El Niño/ la Niña), *Sécheresse*, 10, 4, 245-252.
- Bigot S., Brou T. Y., Oszward J., Diedhiou A., 2005, Facteurs de la variabilité pluviométrique en Côte d'Ivoire et relations avec certaines modifications environnementales. *Sécheresse*, vol. 16, n° 1, p. 5-13.
- Bricquet J. P., Bamba F., Mahé G., Touré M., Olivry J. C., 1997, Évolution récente des ressources en eau de l'Afrique atlantique. *Revue des Sciences de l'Eau*, vol. 3, p. 321-337.
- Brou Y. T., 2005, Climat, mutations socio-économiques 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 technologies de Lille, 212 p.
- Cecchi P., Gourdin F., Koné S., Corbin D., Etienne J., Casenave A., 2009, Les petits barrages du nord de la Côte d'Ivoire : inventaire et potentialités hydrologiques. *Sécheresse*, vol. 20, n° 1, p. 112-122
- Chalifoux S., Nastev M., Lamontagne C., Latifovic R., 2006, Cartographie de l'occupation et de l'utilisation du sol par imagerie satellitaire Landsat en hydrogéologie. *Téledétection*, vol. 6, n° 1, p. 9-17.
- Daniell T. M., 2009, The implications of a decade of drought in Australia (1996-2007). *Sécheresse*, vol. 20, n° 1, p. 171-180.
- Descroix L., Genthon P., Amogu O., Rajot J. L., Sighomnou D., Vauclin M., 2012. Change in Sahelian Rivers hydrograph : The case of recent red floods of the Niger River in the Niamey region. *Global Planetary Change*, 98-99, 18-30.
- Dezetter A., Paturel J. E., Ruelland D., Ardoin-Bardin S., Ferry L., Mahé G., Dieulin C., Servat E., 2008, Modélisation semi-spatialisée des ressources en eau du fleuve Niger à Koulikoro. Prise en compte des variabilités spatio-temporelles. *World Water Congress*, 1-4 sept. 2008, Montpellier, France, p. 111-126.
- Géomines, 1982, Inventaire hydrogéologique appliqué à l'hydraulique villageoise. Carte de Korhogo, cahier n° 6, République de Côte d'Ivoire, ministère des Travaux publics et des Transports, Direction centrale de l'hydraulique, 44p.
- Goula B. T. A., Savané I., Konan B., Fadika V., Kouadio B. G., 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*, vol. 7, n° 1, p. 1-12.
- Hoang K. H., Bernier M., Villeneuve J.P., 2008, Les changements de l'occupation du sol dans le bassin versant de la rivière Càu (Viet-Nam). Essai sur une approche diachronique. *Revue Téledétection*, vol. 8, n° 4, p. 227-236.
- Jourda J. P.R., 2005, Méthodologie d'application des techniques de télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'Ouest. Concept de l'hydrotechniquespatiale : cas des zones tests de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat d'État ès Sc. Nat., Université de Cocody, 398 p.
- Koffi Y. B., 2007, Étude du calage , de la validation et des performances des Réseaux de Neurones artificiels à partir des données hydro-climatiques du bassin versant du Bandama Blanc (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat unique, Université de Cocody, 260 p.
- Koné M., Aman A., Adou Yao C., Coulibaly L., N'guessan K. E., 2007, Suivi diachronique par télédétection spatiale de la couverture ligneuse en milieu de savane soudanienne en Côte d'Ivoire. *Revue Téledétection*, vol. 7, n° 1-2-3-4, p. 433-446.
- Kouamé K. F., Bernier M., Goné D. L., Saley M. B., Lefévre R., Soro N., Koudou A., 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 Téledétection*, vol. 7, n° 1-2-3-4, p. 217-235.
- Kouassi A. M., 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 Doctorat unique, Université de Cocody, 210 p.
- Lacombe G., McCartney M., Forkuor G., 2012. Drying climate in Ghana over the period 1960-2005 : evidence from the resampling-based Mann-Kendall test at local and regional levels, *Hydrological Sciences Journal*, DOI : 10.1080/02626667.2012.728291
- Lee A. F. S., Heghinian S. M., 1977, A shift of the mean level in a sequence of independent normal random variables : A Bayesian approach. *Technometrics*, 19 (4), p. 503-506.
- Mahé G., 2009. Surface/groundwater interactions in the Bani and Nakambe rivers, tributaries of the Niger and Volta basins, West Africa. *Hydrol. Sci. J.*, 54, p. 704-712.

- Mahé G., Olivry J. C., Dessouassi R., Orange D., Bamba F., Servat E., 2000, Relations eaux de surface-eaux souterraines d'une rivière tropicale au Mali. C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des planètes, 330, p. 689-692.
- Sarr, M.A., 2010, Cartographie des changements de l'occupation du sol entre 1990 et 2002 dans le nord du Sénégal (Ferlo) à partir des images Landsat. Cybergeo, document 472. [En ligne] URL : <http://cybergeo.revues.org/index22707.html> ; DOI : 10.4000/cybergeo.22707
- Meddi H., Meddi M., 2009, Variabilité des précipitations annuelles du Nord-ouest de l'Algérie. Sécheresse, vol. 20, n° 1, p. 57-65.
- N'guessan K. E., 1990, Étude de l'évolution de la végétation du « V Baoulé » (contact forêt/savane en Côte d'Ivoire) par télédétection. Télédétection et sécheresse. Ed. AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext. Paris c p. 181-196.
- Olivry J.C., 1997, Long-term effects of rain shortage : the ill rivers of Western and Central Africa. In : FRIEND troisième rapport : 1994-1997. UNESCO-IHP, p. 158-162.
- Olivry J.C., 2002, Synthèse des connaissances hydrologiques et potentielles en ressources en eau du fleuve Niger. International report World bank-Niger Basin Authority, 156 p.
- Oloukoi J., Mama V. J., Agbo F. B., 2006, Modélisation de la dynamique de l'occupation des terres dans le département des collines au Bénin. Télédétection, vol. 6, n° 4, p. 305-323.
- Organisation météorologique mondiale (OMM), 2001, Le temps, le climat et la sécurité alimentaire. N° 933, Genève, 26p.
- Ouattara T., Dubois J. M., Gwyn J., 2006, Méthodes de cartographie de l'occupation des terres en milieu aride à l'aide de données multi-sources et de l'indice de végétation TSAVI. Télédétection, vol. 6, n° 4, p. 291-304.
- Paturel J. E., Servat E., Delattre M. O., 1998, Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. Journal des Sciences Hydrologiques, vol. 43, n° 6, p. 937-945.
- Perraud A., 1971, Les sols *in* le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoires ORSTOM, p. 269-390.
- Pettitt A. N., 1979, A non parametric approach to the change-point problem. Appl. Statist. 28 (2), p. 126-135.
- Riad S., 2003, Typologie et analyse hydrologique des eaux superficielles à partir de quelques bassins versants représentatifs du Maroc. Thèse de Doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille et Université Ibnou Zohr d'Agadir, 154 p.
- Saley M. B., 2003, Système d'informations hydrogéologiques à référence spatiale, discontinuités pseudo-images et cartographies thématiques des ressources en eau de la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse unique, Université de Cocody, 209 p.
- Savané I., Coulibaly K. M., Gioan P., 2001, Variabilité climatique et ressources en eaux souterraines dans la région semi-montagneuse de Man. Sécheresse, vol. 12, n° 4, p. 231-237.
- Savané I., Coulibaly K. M., Gioan P., 2003, Étude comparative de trois méthodes de calcul du coefficient de tarissement des cours d'eau. Sécheresse, vol. 14, n° 1, p. 37-42.
- Soro N., Lasm T., Kouadio B. H., Soro G., Ahoussi K. E., 2006, Variabilité du régime pluviométrique du Sud de la Côte d'Ivoire et son impact sur l'alimentation de la nappe d'Abidjan, Sud sciences et technologies , n° 14, p. 30-40.
- Tapboda G. W., Fosting J. M., 2010, Quantification de l'évolution du couvert végétal dans la réserve forestière de Laf-Madjam au nord du Cameroun par télédétection satellitale. Sécheresse, vol. 21, n° 3, p 169-178.

Pour citer cet article

Référence électronique

Tanina Drissa Soro, Bernard Djè Kouakou, Ernest Ahoussi Kouassi, Gbombélé Soro, Amani Michel Kouassi, Konan Emmanuel Kouadio, Marie-Solange Oga Yéi et Nagnin Soro, « Hydroclimatologie et dynamique de l'occupation du sol du bassin versant du Haut Bandama à Tortiya (Nord de la Côte d'Ivoire) », *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Volume 13 Numéro 3 | décembre 2013, mis en ligne le 30 décembre 2013, consulté le 23 septembre 2014. URL : <http://vertigo.revues.org/14468> ; DOI : 10.4000/vertigo.14468

À propos des auteurs

Tanina Drissa Soro

Laboratoire des sciences et techniques de l'eau et de l'environnement (LSTEE), UFR des Sciences de la terre et des ressources minières (STRM), Université de Cocody, 22 B.P. 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire, Courriel : paragafro@yahoo.fr

Bernard Djè Kouakou

Centre universitaire de recherche et d'application en télédétection (CURAT), UFR des Sciences de la terre et des ressources minières (STRM), Université de Cocody, 22 B.P. 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire, courriel : dje_kbernard2003@yahoo.fr

Ernest Ahoussi Kouassi

Laboratoire des sciences et techniques de l'eau et de l'environnement (LSTEE), UFR des Sciences de la terre et des ressources minières (STRM), Université de Cocody, 22 B.P. 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire, Courriel : ahoussi_kouassi@caramail.com

Gbombélé Soro

Laboratoire des sciences et techniques de l'eau et de l'environnement (LSTEE), UFR des Sciences de la terre et des ressources minières (STRM), Université de Cocody, 22 B.P. 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire, Courriel : marc_soro@yahoo.fr

Amani Michel Kouassi

Département des sciences de la terre et des ressources minières (STeRMi), Institut national polytechnique, Félix Houphouët Boigny (INP HB), BP 1093 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire, courriel : michel.a_kouassi@yahoo.fr

Konan Emmanuel Kouadio

Laboratoire des sciences et techniques de l'eau et de l'environnement (LSTEE), UFR des Sciences de la terre et des ressources minières (STRM), Université de Cocody, 22 B.P. 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire, Courriel : emmakouadio@hotmail.com

Marie-Solange Oga Yéi

Laboratoire des sciences et techniques de l'eau et de l'environnement (LSTEE), UFR des Sciences de la terre et des ressources minières (STRM), Université de Cocody, 22 B.P. 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire, Courriel : oga_oms@yahoo.fr

Nagnin Soro

Laboratoire des sciences et techniques de l'eau et de l'environnement (LSTEE), UFR des Sciences de la terre et des ressources minières (STRM), Université de Cocody, 22 B.P. 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire, Courriel : soro_nagnin@yahoo.fr

Droits d'auteur

© Tous droits réservés

Résumés

La présente étude menée sur le bassin du Haut Bandama à Tortiya (entre 8° 40' et 10° 20' de latitude nord et 5° et 6° 20' de longitude ouest) dans la région nord de la Côte d'Ivoire vise à comprendre l'hydroclimatologie et la dynamique de l'occupation du sol en vue de mieux gérer les ressources en eau. Elle se base sur l'exploitation des données pluviométriques et hydrométriques (débits) et des images satellitaires. Ainsi, l'application des tests statistiques de rupture (Pettitt, Lee et Heghinian) montre une modification du régime pluviométrique intervenue au cours des années 1970. Cette modification se traduit par une baisse des pluies allant de 12 % à 22 % selon les stations avec une moyenne de 16,5 % et celle-ci est plus accentuée sur les écoulements (62,5 %) à la station hydrométrique de Tortiya. Les coefficients de tarissement marquent de fortes valeurs (plus de $8 \cdot 10^{-2} \text{ j}^{-1}$) après les années 1970. La recharge des aquifères s'amenuise passant d'une infiltration efficace moyenne de 212 mm (1980-1989) à 184 mm (1990-1999). Parallèlement, l'étude diachronique de l'occupation du sol des images satellitaires Landsat de novembre 1986 (capteur TM) et de janvier 2000 (capteur ETM+) sur une zone test du bassin a permis de dégager la tendance générale de l'occupation du sol. Elle se caractérise par une augmentation des habitats (+3,1 %), sols nus ou dégradés (+6,64 %) et cultures (+21,60 %) au profit de la dégradation des classes savane arborée (-29 %) et

forêts (-1,38 %). Ces modifications ont une répercussion sur le comportement hydrologique du bassin.

This present study performed in the upper Bandama catchment at Tortiya station in Northern Côte d'Ivoire aims to improve our knowledge on hydroclimatic and land cover in order to lead to a better water resources management. It is based on the exploitation of rainfall and runoff data and satellite images. Thus application of statistic tests (Pettitt, Lee, Heghinian) highlights changes in rainfall regime during the 1970s. This modification reveals a decrease of 12 % and 22 % in rainfall depending on the stations (16.5 % in average) causing a stronger decrease in runoff (62.5 %) at Tortiya station. Depletion coefficients become very high (more than $8 \cdot 10^{-2} \text{ j}^{-1}$) after the 1970s. Groundwater recharge decreases with an average effective infiltration of 212 mm in decade 1980-1989 and 184 mm in the decade 1990-1999. In the same time, diachronic study of land cover of satellite images from November 1986 (TM sensor) and January 2000 (ETM+ sensor) on test area of watershed allowed to obtain a trend of land cover. The main observed changes are the increase of habitats (+3.1 %), bare soil (+6.64 %) and crops areas (+21.60 %) and inversely a reduction of the area covered by savannah (-29 %) and forests (-1.38 %). These modifications led to changes on hydrological behaviour of catchment.

Entrées d'index

Mots-clés : hydroclimatologie, occupation du sol, bassin versant, Landsat, étude diachronique, ressources en eau, Côte d'Ivoire, Afrique

Keywords : hydroclimatology, land cover, catchment area, Landsat, diachronic study, water resources, Ivory coast, Africa

Lieux d'étude : Afrique