

IMPACT DE LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE SUR LES RESSOURCES EN EAU ET VÉGÉTATION DU BASSIN VERSANT DU BANDAMA EN MILIEU INTERTROPICAL (CÔTE D'IVOIRE)

**Inza DOUMOUYA¹, Bamory KAMAGATÉ^{1*}, Adama BAMBA¹,
Moussa OUEDRAOGO¹, Ismaïla OUATTARA¹, Issiaka SAVANÉ¹,
BI Tié Albert GOULA¹ et Jean BIÉMI²**

¹*Laboratoire de GéoSciences et Environnement, Université d'Abobo-Adjamé,
02 BP 801 Abidjan 02, Côte d'Ivoire, 02 BP 801 Abidjan 02*

²*Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection
(CURAT), Université de Cocody, 22 BP 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire*

(Reçu le 21 Juin 2009, accepté le 18 Septembre 2009)

* Correspondance et tirés à part, e-mail : *kambamory2@yahoo.fr*

RÉSUMÉ

Dans l'optique de mieux comprendre la variabilité climatique sur le bassin versant du Bandama et de déterminer son impact sur les ressources naturelles (eau et couvert végétal), nous avons effectué d'une part une caractérisation simultanée de la pluviométrie et des écoulements sur de longues séries chronologiques (1964-2004) et d'autre part une caractérisation de la dynamique de l'état de la surface du sol, notamment la variabilité du couvert végétal pour deux années à pluviométrie et écoulement contrastés (1986 et 2002) au moyen d'images satellitales Landsat.

Les résultats indiquent une forte variabilité interannuelle de la pluviométrie. La sécheresse en cours depuis 1970, apparaît modérée du fait d'une baisse de la fréquence des années à forts cumuls pluviométriques (supérieurs à 1200 mm) compensée par une augmentation du nombre d'années à faibles cumuls pluviométriques (inférieurs à 1000 mm). Cette évolution s'accompagne d'une régression encore plus nette des débits des cours d'eau (65 % en moyenne), traduisant l'existence d'une relation non linéaire, entre pluie et débit. L'analyse diachronique des images satellitales, révèle une dégradation de la forêt au profit de la savane arborée du fait de l'instabilité climatique et des opérations de reboisement.

Mots-clés : *Variabilité Hydroclimatique, relation pluie-débit, images LANDSAT, occupation du sol, bassin versant du Bandama.*

ABSTRACT**Impact of the climatic variability on water resources and vegetation of Bandama watershed in intertropical environment (Côte d'Ivoire)**

In order to better understand climate variability on the watershed of the Bandama and to determine its impact on natural resources (water and vegetation), we made on one hand a simultaneous characterization of rainfall and runoff on long time series (1964-2004) and on other hand a characterization of the dynamics of the soil surface state, including the variability of vegetation cover for two years rainfall and runoff contrasts (1986 and 2002) by means of Landsat satellite images.

The results show a strong interannual variability in rainfall. The current drought since 1970 appears moderate because of a decrease in the frequency of years with strong rainfall accumulations (greater than 1200 mm) offset by an increase in the number of years with low rainfall totals (less than 1000 mm). This evolution is accompanied by a net further regression of water flow (65% on average) reflecting the existence of no linear relationship between rain and flow. The diachronic analysis of satellite images reveals a degradation of the forest to the savannas because of climate instability and reforestation operations.

Keywords : *Hydroclimatic variability, rainfall-runoff relationship, LANDSAT images, land use, Bandama watershed.*

I - INTRODUCTION

Le changement climatique se présente comme la réponse aux différentes actions locales ou globales exercées par l'homme, notamment la déforestation, en plus des certains phénomènes naturels tels que le réchauffement de la surface des océans dont l'origine serait liée à la pollution atmosphérique du fait des gaz à effet de serre. Les manifestations du changement climatique sont diverses, mais les plus importantes concernent la forte variabilité des paramètres climatiques tels que la pluie et la température marquée par une récurrence tangible et inquiétante de la sécheresse en Afrique de l'Ouest.

Des tests réalisés sur de longues séries pluviométriques et/ou hydrologiques dans des régions ouest africaines (Côte d'Ivoire et Niger) et centrales (Cameroun) ont confirmé ce changement climatique [1-4]. Les différents tests situent le début de ce changement autour de l'année 1970. Le passage entre la phase humide des années d'avant 70 et la période sèche qui a suivi, a été marqué par une rupture brusque dans les différentes séries chronologiques

à telle enseigne que certains auteurs [5-7] ont parlé de rupture ou de cassure hydrologique dans certaines régions africaines. La décennie 70 et plus récemment la décennie 80 furent particulièrement marquées par des années pluviométriques déficitaires. Toutefois, les manifestations de cette longue période de sécheresse et son impact sur les ressources en eau diffèrent d'un bassin à l'autre. L'objectif de ce travail est de mieux comprendre les manifestations climatiques à travers la pluviométrie et le couvert végétal et leur impact sur les ressources en eaux dans le bassin versant du Bandama.

II - MATÉRIEL ET MÉTHODES

II-1. Milieu d'étude

Le bassin du Bandama, d'une superficie de 97500 Km², est situé entre les méridiens 3°50' et 7°W et les parallèles 5°10' et 10°20'N (*Figure 1*). De forme allongée dans le sens Nord-Sud, il est situé dans la zone de balancement du front intertropical caractérisée par trois types de régimes hydrologiques: un régime tropical de transition dans la partie septentrionale, un régime équatorial de transition atténué dans la partie centrale et un régime équatorial de transition dans la partie méridionale.

Ce climat laisse apparaître une couverture végétale de types savanes arborées et herbeuses, forêts claires, forêts galeries et forêts denses. Le voisinage des talwegs est généralement occupé par des épaisses galeries forestières, plus ou moins marécageuses, qui constituent des couloirs favorables au développement des essences forestières. Cette végétation apparaît aujourd'hui largement dégradée par l'activité humaine et probablement du fait de la forte variabilité du climat.

La majeure partie de la zone repose sur des formations du socle granito-gnessique issues de l'éburnéen et des séries volcano-sédimentaires du birimien qui s'alternent. L'ensemble des fissures de ce substratum cristallin et cristallophyllien constitue la nappe du socle fissuré. Ces formations sont sous-jacentes à une altération hétérogène de 15 m d'épaisseur en moyenne et à dominance argilo-sableuse qui renferme la nappe phréatique.

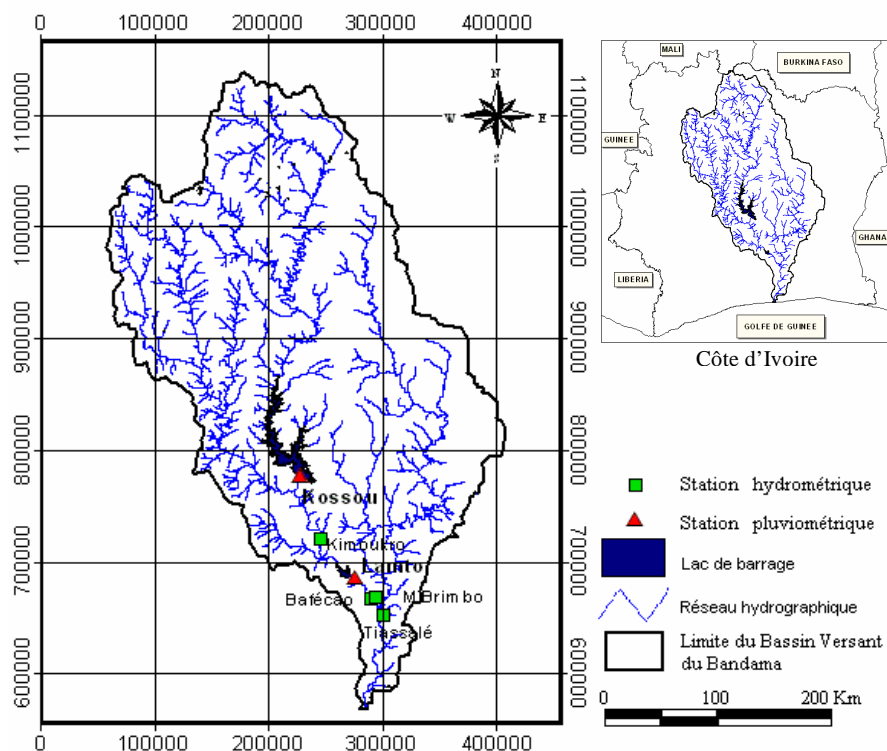


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude et dispositif d'acquisition des données.

II-2. Matériel

Des données de précipitation (1964-2004) issues des stations météorologiques de Lamto et Kossou (*Figure 1*) et des données hydrométriques issues des stations hydrométriques de Kimoukro, Bafécao, M'Brimbo et Tiassalé (1953-2004) sont collectées et traitées pour la compréhension des manifestations de la variabilité du climat. Nous disposons également de données satellitaires composées d'images à haute résolution Landsat TM et ETM+ de la scène 197/55. Ces images ont été enregistrées en l'absence de couverture nuageuse, en pleine saison sèche, période de différenciation maximale des éléments d'occupation du sol (cultures, herbacées, ligneux).

II-3. Méthodes

II-3-1. Variabilité hydro-pluviométrique

La variabilité pluviométrique est appréciée à partir d'indices pluviométriques calculés sur la base des cumuls pluviométriques annuels à partir de la formule suivante :

$$I_i = \left(\frac{X_i - \bar{X}}{\sigma} \right) \quad (1)$$

I_i : indice pluviométrique pour l'année i

X_i (mm) : cumul pluviométrique annuel pour l'année i

\bar{X} (mm) : cumul pluviométrique moyen interannuel calculé sur la période d'étude

σ : écart-type des cumuls pluviométriques annuels.

L'indice (I), encore appelé indice standardisé de précipitation (*SPI*, **Tableau 1**), permet de déterminer l'ampleur de la sécheresse ou de l'humidité en terme de sévérité ([8], [9]).

Pour caractériser la récurrence (r) des pluies annuelles avant et après 1970 (année probable de rupture pluviométrique en Afrique de l'Ouest), des fréquences (f) au non dépassement, des hauteurs annuelles ont été calculées à partir de la formule de Hazen. La récurrence (R) se présente comme étant l'inverse de la fréquence au non dépassement :

$$f_i = \frac{r_i - 0,5}{n} \quad (2)$$

f_i : Fréquence au non dépassement du cumul pluviométrique de l'année i

r_i : Rang du cumul pluviométrique de l'année i

n : Taille de l'échantillon composé des années d'observation

$$R = 1-f \quad (3)$$

Des indices hydrométriques ont été également calculés pour les écoulements, à partir de la même formule que celle utilisée pour la pluviométrie, afin d'apprécier les grandes tendances (sécheresse et humidité) dans les chroniques des débits. Ces chroniques de débits ont également subi des tests de rupture (Méthode non paramétrique de Pettitt, segmentation de Hubert, méthode Bayésienne de Lee et Heghiman et la normalité) afin de mieux déterminer l'année charnière de la rupture hydrométrique observée ailleurs en Afrique de l'Ouest.

II-3-2. Variabilité de l'état de la surface du sol

La démarche consiste à cartographier la zone d'étude et de montrer la dynamique de l'occupation des sols par une analyse diachronique des images satellitales. Mais pour des raisons de disponibilité d'images satellitales,

seulement une partie de la zone d'étude jugée représentative a fait l'objet de cette analyse.

La méthode utilisée consiste à une classification dirigée par le maximum de vraisemblance qui est une classification hiérarchique par étapes successives [10]. L'étape du traitement fait suite à un prétraitement des images Landsat TM du 20 janvier 1986 et ETM+ du 20 janvier 2002. Les cartes de l'occupation du sol sont ensuite réalisées, après une composition colorée et une analyse texturale des images. Une sortie de terrain a enfin été réalisée pour la validation des images traitées et des structures identifiées.

III – RÉSULTATS ET DISCUSSION

III-1. Variabilité pluviométrique

Une importante irrégularité pluviométrique interannuelle se dégage sur toute la chronique étudiée pour les deux stations (*Figure 2*). Des écarts pluviométriques importants sont très souvent observés entre deux années successives. Par exemple en 1968 et 1969, on enregistre respectivement 1689 mm et 903 mm à la station pluviométrique de Lamto. L'importance de cette forte irrégularité ne permet pas d'observer une rupture très nette dans la série pluviométrique. Mais selon plusieurs auteurs [1, 3], c'est en 1970 que la sécheresse a commencé dans la zone ouest-africaine intertropicale. On observe cependant des années à pluviométrie excédentaire après cette date dans les chroniques pluviométriques (*Figure 2*) qui témoignent encore de la forte variabilité interannuelle de la pluviométrie.

A l'analyse de l'importance de la sécheresse, la rupture pluviométrique est d'un impact à relativiser. L'analyse du *Tableau 1* montre qu'il n'y a pas eu de sécheresse extrême durant toute la période d'étude à Lamto (série la plus longue). La sécheresse qui a prévalu est d'une ampleur modérée et concerne environ 40 % des années observées. On observe également l'absence d'humidité extrême dans la série étudiée ; l'humidité prévalue est tout aussi modérée (27 % des pluies annuelles) que la sécheresse. Le climat de la zone est donc à la fois caractérisé par une humidité modérée et une sécheresse modérée. Le caractère modéré de la sécheresse a été observé ailleurs où la baisse de la hauteur par événement pluvieux est compensée par l'augmentation du nombre d'événements par an. C'est le cas au Togo méridional où travaillant sur la pluviométrie, l'on a montré que contrairement à ce qui est couramment admis, le total pluviométrique annuel n'a pas significativement varié ; la hauteur moyenne par jour de pluie a baissé à la

différence du nombre de jours de pluie qui a agmenté [11]. Il en est de même au Sud-Ouest du Niger, dans la zone de Niamey [12].

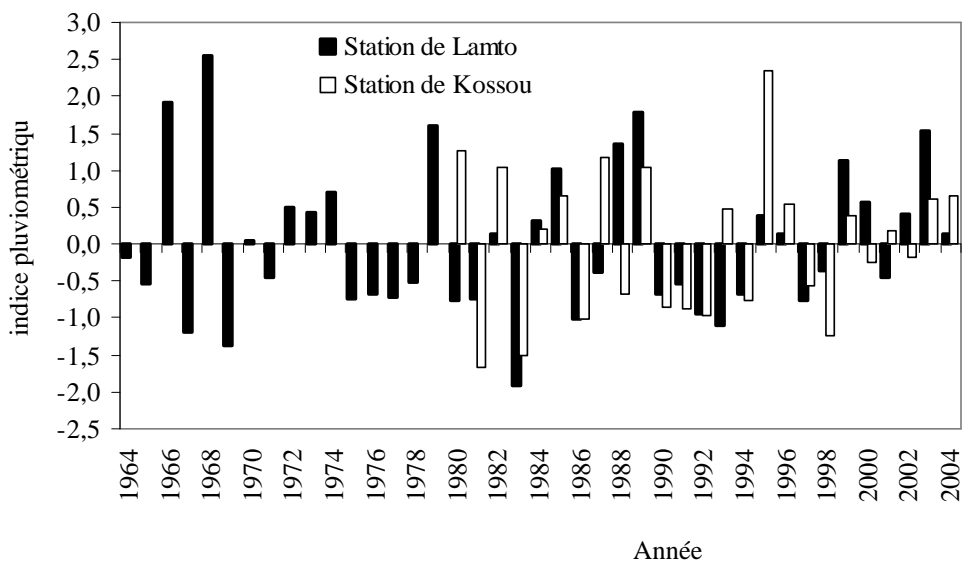


Figure 2 : Indices pluviométriques aux stations pluviométriques de Lamto et Kossou.

Tableau 1 : Valeur des indices standardisés de précipitation et ampleur de la sécheresse.

Gamme de référence des SPI	Classification	Ampleur du phénomène (%)
$SPI > 2$	Humidité Extrême	2,4
$1 < SPI < 2$	Humidité Forte	17,1
$0 < SPI < 1$	Humidité Modérée	26,8
$-1 < SPI < 0$	Sécheresse Modérée	41,5
$-2 < SPI < -1$	Sécheresse Forte	12,2
$SPI < -2$	Sécheresse Extrême	0,0

La récurrence des cumuls annuels apparaît de plus en plus faible pour des pluies annuelles de plus en plus importantes indépendamment des deux

périodes (avant et après rupture, *Figure 3*). Cependant pour les pluies annuelles comprises entre 1000 et 1200 mm la fréquence d'apparition est restée quasi identique malgré la rupture. Les pluies annuelles inférieures à 1000 mm ont vu leur fréquence augmenter après la rupture tandis que celles supérieures à 1200 mm ont connu une chute dans leur fréquence d'apparition. Tout ceci laisse penser que la rupture pluviométrique se manifeste par une raréfaction des années à forts cumuls pluviométriques et une augmentation du nombre d'années à faibles cumuls. Ce résultat apparaît cohérent et conforte l'idée d'une sécheresse modérée car tout se passe comme si la raréfaction des fortes pluies est compensée par l'augmentation du nombre de petites pluies.

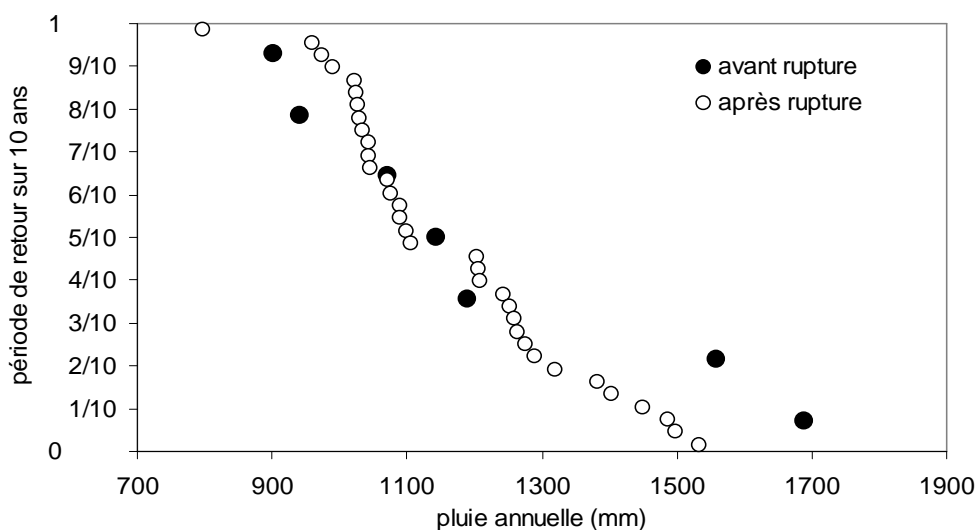


Figure 3 : *Régression des pluies annuelles à la station de Lamto avant et après 1970*

III-2. Variabilité hydrométrique

Les différents tests de rupture réalisés indiquent 1970 comme l'année probable de rupture hydrométrique aux stations de Kimoukro, Bafécao et M'Brimbo en accord avec la rupture pluviométrique mise en évidence ; seule la station de Tiassalé, située plus au Sud rentre en rupture un an plus tard en 1971 (*Tableau 2*). L'évolution des indices hydrométriques calculés pour chacune des quatre stations mettent en exergue deux périodes hydrologiquement contrastées autour de ces deux années charnières (*Figure 4*). La première est caractérisée par des indices positifs en accord avec des débits supérieurs à la moyenne interannuelle tandis que c'est le contraire pour l'autre période

caractérisée par des pluies déficitaires en comparaison à la moyenne interannuelle.

Tableau 2 : Résultats des tests de rupture hydrologique appliqués aux différentes séries.

Stations	Segmentation de Hubert	Méthode non Paramétrique de Pettit	Méthode Bayésienne de Lee et Heghiman	Normalité
Kimoukro	1956-1970 1971-2000	1970	1970	1970
Bafécao	1963-1970 1971-2000	1970	1970	1970
Tiassalé	1954-1971 1972-2000	1971	1971	1971
M’Brimbo	1953-1970 1971-2000	1970	1970	1970

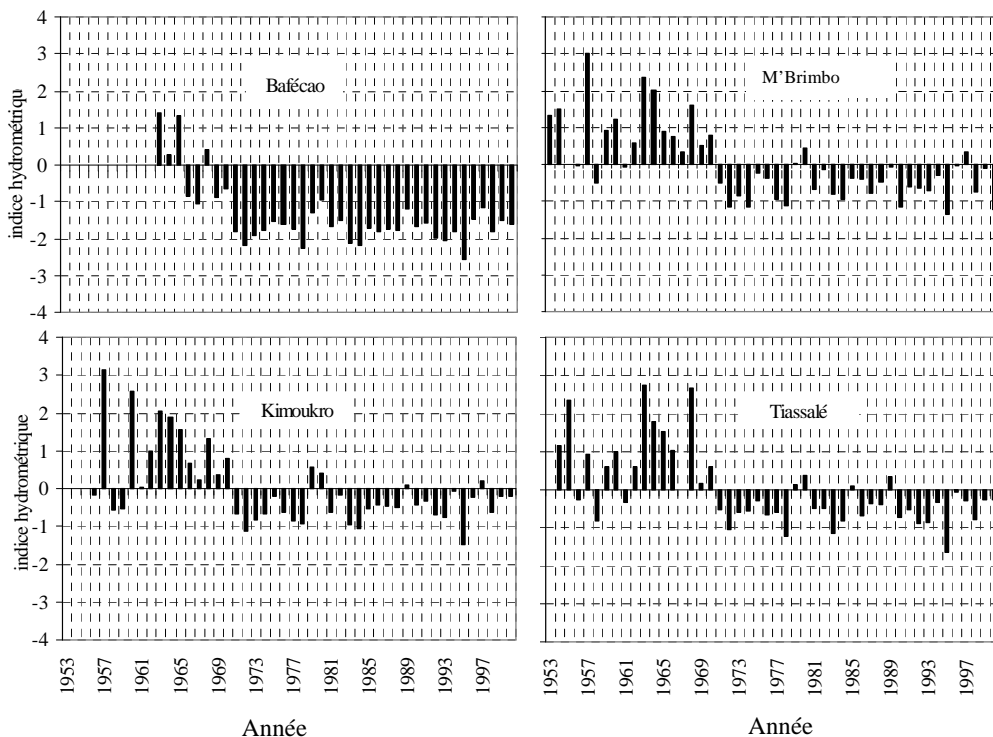


Figure 4 : Indices hydrométriques annuelles (1964-2004) aux 4 stations considérées

L'ampleur de ce changement dans les séries hydrométriques sur les débits des cours d'eau, appelé déficit d'écoulement, est appréciée à partir de la différence (en pourcentage) entre la moyenne d'avant et celle d'après la rupture. Si cette ampleur apparaît modérée sur la pluviométrie, elle semble encore plus importante sur les écoulements traduisant l'absence de relation linéaire entre pluies et débits annuels. Les eaux de surface ont connu, du fait de la sécheresse, une chute de leur cours initiaux de 60 à 70 % (**Tableau 3**). Cette gamme de variation du déficit d'écoulement a été également observée sur le bassin du N'Zi, situé plus en aval [6]. Pour l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest, un déficit pluviométrique absolu d'environ 200 m a déjà été mis en évidence [13].

Tableau 3 : Moyennes et déficits hydrologiques calculés aux différentes stations.

Stations	Moyenne de la série (mm)	Moyenne avant rupture (mm)	Moyenne après Rupture	Déficit (%)
Kimoukro [1956-2000]	170	280,9	115,8	59
Bafécao [1963-2000]	155	333,2	108,4	67
M'Brimbo [1953-2000]	198	343,9	108,0	69
Tiassalé [1954-2000]	250	403,2	163,4	59

III-3. Variabilité de l'état de la surface du sol

Les résultats des classifications dirigées par maximum de vraisemblance appliquées aux images de 1986 et 2002 sont visualisés sur la **Figure 5**.

On observe pour les deux années, la forêt dense, la savane arborée, les zones humides, les sols nus et les plans d'eau. En 1986, la cartographie de l'occupation du sol montre que le couvert végétal occupe 56 % de l'ensemble de la zone cartographiée. Cette proportion connaît paradoxalement une augmentation de 16 % en 2002.

La savane arborée est le type de couvert végétal le plus répandu pour les deux années d'observation. Entre 1986 et 2002, l'aire occupée par cette végétation subit une croissance de 18% (**Tableau 4**). Un des facteurs justifiant l'augmentation du couvert végétal de type arboré est la forte variabilité

pluviométrique, notamment le retour à une pluviométrie plus abondante à partir de l'année 1994. En plus de la pluviométrie, les opérations de reboisement menées par la Société de Développement de la Forêt (SODEFOR) dans la zone pourraient expliquer la reprise de la végétation.

Hors mis la savane arborée, les sols, composés de sols plus ou moins dénudés, les brûlis, les habitations et les nombreux inselbergs granitiques qui affleurent dans la zone cartographiée, s'étendent sur une superficie en régression (de 37 à 22 %) du fait des activités de reboisement en cours dans la zone expliquant l'augmentation générale du couvert végétal mis en évidence précédemment.

Les structures les moins importantes sont la forêt dense (de 6 à 4 %), les zones humides (de 3,2 à 2,8 %) et les plans d'eau (de 3,4 à 3,1 %). Ces trois structures connaissent toutes une baisse de l'aire qu'elles occupaient de 1998 à 2002.

Tableau 4 : Structures identifiées et proportion respective dans la composition de l'occupation du sol.

Classes	Surface en 1986		Surface en 2002		Variation (%)
	hectare	%	hectare	%	
Forêt dense	112864	6,1	78691	4,3	- 1,8
Savane arborée	928031	50,2	1255908	68,0	+ 17,8
Zones humides	58556	3,2	52460	2,8	- 0,4
Sols nus	684940	37,1	403058	21,8	- 15,3
Plans d'eau	62805	3,4	57078	3,1	- 0,3
Total	1847195	100	1847195	100	

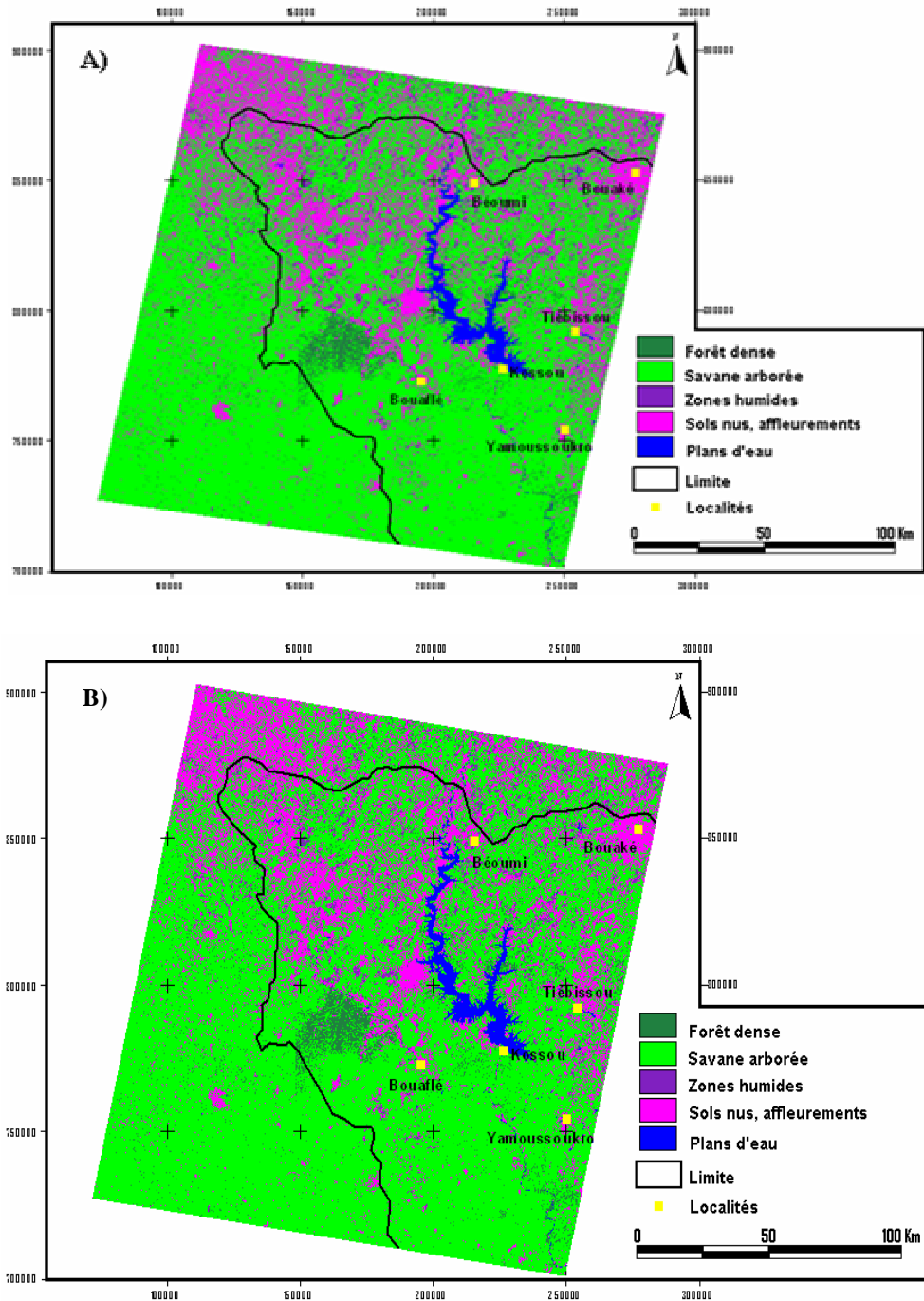


Figure 5 : Structures d'occupation du sol de la partie centrale du bassin aux dates du A) 20 Janvier 1986 et B) 20 Janvier 2002.

IV - CONCLUSION

L'analyse des différents résultats hydro-pluviométriques a montré une forte variabilité pluviométrique et une nette régression de 50 à 70 % de l'écoulement des différents cours d'eau. Si la rupture hydrométrique se fait de façon brusque et nettement visible sur l'évolution du débit des cours d'eau à partir de 70 pour la plupart des stations, cela n'est pas le cas pour la pluviométrie. La sécheresse opérée dans la zone apparaît néanmoins modérée.

Cette étude constitue une étape dans la compréhension de la variabilité climatique et de son impact sur les ressources en eau du bassin versant du Bandama. Le faible nombre de stations pluviométriques n'a pas permis une évaluation spatio-temporelle des précipitations. La prise en compte de la température devra permettre également de mieux comprendre la variabilité du climat.

Un suivi à plus long terme des indices de végétation pourrait permettre de renforcer la connaissance de la variabilité de l'état de la surface du sol.

RÉFÉRENCES

- [1] - T. LEBEL and T. VISCHÉL, *C.R. Géosci.*, 337 (2005) 29-38.
- [2] - G. B. KOUADIO, Diplôme d'Études Approfondies (DEA), Université d'Abobo-Adjamé, (2004) 77 p.
- [3] - Y. G. L'HOTE, B. MAHE, B. SOME and J.P. TRIBOULET, *J. Hydrol.*, 47 (2002) 563-572
- [4] - K. COULIBALY, Diplôme d'Études Approfondies (DEA), Université d'Abobo-Adjamé, (1997) 84 p.
- [5] - Y. A N'GO, D.L. GONE, I. SAVANE and M. M. GOBLE, *Afrique Sci.* 1(2005) 127-144
- [6] - B. T. A GOULA, I. SAVANE, B. KONAN, V. FADIGA and G.B. KOUADIO, *Vertigo* 17 (2002) 12
- [7] - J. P BRIQUET, MAHE G. F. BAMBA and J.C. OLIVRY, Colloque J. Rodier (1995) 8
- [8] - N. D. LOPEZ, M.A. ROBLES, H. GADSDEN and M.V. GOMEZ-REYES. *Sécheresse* 17 (2006) 467-474
- [9] - T.B. MCKEE, N.J. DOESKEN and J. KLEIST, 8th Conf. Appl. Clim. Anaheim, CA (1993) 179-184
- [10] - J-M. FOSTING, *HDR*, Université de Paris IV Sorbonne, (1998) 750
- [11] - D. Sogbedji, ORSTOM, (1977) 25
- [12] - N. D'AMATO and T. LEBEL, *Inter. J. Clim.* 18 (1998) 955-974
- [13] - F. AZONSI, *Inter. workshop Tripoli* (2002) 69-74