

## **Apport de la télédétection à la cartographie de l'évolution spatio-temporelle de la dynamique de l'occupation du sol dans la région des Lacs (Centre de la Côte d'Ivoire)**

**Gbombélé SORO<sup>1\*</sup>, Ernest Kouassi AHOUSI<sup>1</sup>, Emmanuel Konan KOUADIO<sup>1</sup>,  
Tanina Drissa SORO<sup>1</sup>, Sékouba OULARE<sup>2</sup>, Mahaman Bachir SALEY<sup>1,2</sup>, Nagnin SORO<sup>1</sup>  
et Jean BIEMI<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> *Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE), Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, 22 BP 801, Abidjan 22, Côte d'Ivoire*

<sup>2</sup> *Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT), Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, 22 BP 801, Abidjan 22, Côte d'Ivoire*

---

\*Correspondance, courriel : [marc\\_soro@yahoo.fr](mailto:marc_soro@yahoo.fr)

### **Résumé**

L'objectif de cet article est la cartographie de l'évolution spatio-temporelle de l'occupation du sol dans la région des Lacs (Côte d'Ivoire) à partir des données de télédétection (images Landsat TM et ETM+) sur une période de 16 ans (1986-2002) d'une part, et l'impact de cette occupation sur les coefficients de rétention d'autre part. Une analyse diachronique des données satellitaires a été réalisée et l'approche de la classification supervisée à partir des compositions colorées des bandes a été retenue en vue de la discrimination des classes. Les précisions globales obtenues pour les images classifiées sont de 88,47% (1986) et de 90,46% (2002). Les indices de Kappa sont de 85,84% (1986) et 88 % (2002). L'étude de la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol de 1986 à 2002 fait apparaître des taux moyens annuels calculés de régression pour les plans d'eau de -0,164, les cultures irriguées -0,231 et la savane -1,063. On observe parallèlement une progression des classes forêt (0,287), cultures (0,473) et sols nus ou dégradés (0,699). Les coefficients de rétention calculés sont faibles. En conséquence, cette étude montre que la zone d'étude est marquée par une forte anthropisation et une dégradation des conditions pluviométriques qui ont fortement affecté le mode d'occupation du sol.

**Mots-clés :** *télédétection, dynamique, occupation du sol, région des Lacs, Côte d'Ivoire.*

### **Abstract**

**Contribution of remote sensing to the cartography of land use dynamic evolution in the region des Lacs (Centre de la Côte d'Ivoire)**

This paper reports on the application of remote sensing technologies in monitoring land use spatio-temporal evolution during sixteen years (1986-2002) and its impact on the runoff. A multitemporal analysis of satellites' pictures has been done. The supervised classification from the colorful compositions was adopted. The overall accuracy obtained of the land use classifications are 88.47% (1986), 90.46% (2002) and the Kappa indexes are 85.84% (1986) and 88% (2002).

The study of land use dynamics spatio-temporal from 1986 to 2002 has shown that the mean annual regression rates for water classes are -0.164, the irrigated cultures -0.231 and -1.063 for the savanna class. It also indicates an increase in the forest class 0.287, the cultures 0.473 and of the naked soils or damaged 0.699. These results from the analysis of the impact of land use dynamics on the runoff showed slight values. Finally, this study has shown that anthropisation and rainfall conditions cause profound modifications in the land use patterns in the area.

**Keywords :** *remote sensing, dynamic, land use, Region des lacs, Côte d'Ivoire.*

## 1. Introduction

L'occupation des terres est une variable fondamentale pour la planification régionale ainsi que pour l'étude et la compréhension de l'environnement [1]. L'importance des types d'occupation des sols sur les réponses des bassins versants en termes d'écoulement a été avérée [2]. Cette influence est particulièrement exacerbée dans le cas de bassins-versants de petite taille et fortement anthropisés (cultures, parcours, etc.). De plus, l'occupation des sols a des effets sur le cycle biogéochimique et le réchauffement planétaire, sur l'érosion des terres et le développement durable [3], ainsi que sur la biodiversité. Paradoxalement, tandis que les séries pluviométriques se caractérisent par une diminution nette des apports, on observe par endroits et simultanément une augmentation des coefficients de ruissellement des bassins-versants [4]. Le comportement hydrologique des bassins soudano-sahéliens paraît de fait en pleine mutation : l'effet direct d'un changement climatique, l'évolution des couverts végétaux, des états de surface et d'occupation des sols sur les bassins versants ou encore la perturbation des réseaux hydrographiques par la multiplication d'ouvrages de prise et de stockage sont autant d'éléments susceptibles d'interagir [2].

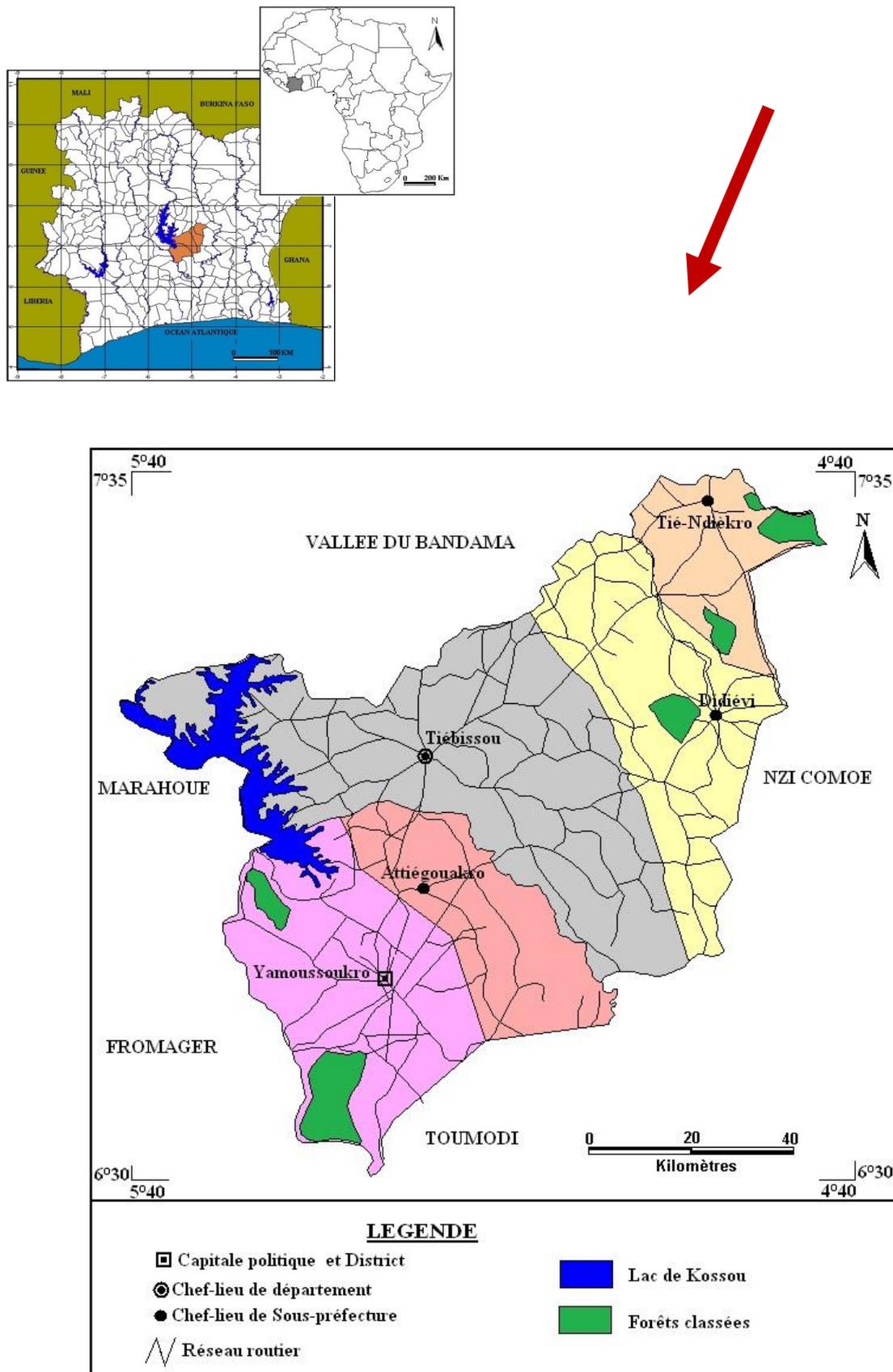
En effet, selon [5], l'occupation du sol influence les quantités d'eau disponibles pour l'écoulement de surface et l'infiltration selon la nature des végétaux (forêts, savanes, mosaïques). Ainsi, dans les régions savaniques du Nord du bassin, le ruissellement sera prépondérant sur l'infiltration, Alors que dans les régions forestières du Sud, l'infiltration prendra le pas sur le ruissellement. L'importance de chaque phénomène (ruissellement et infiltration) est liée aux conditions climatiques subies par le bassin. Cette importance de l'occupation des sols en fait une thématique incontournable dans la plupart des inventaires cartographiques et de suivi des phénomènes environnementaux, Cette thématique peut être obtenue par le biais de plusieurs techniques et méthodes, dont la télédétection, cependant, obtenir une bonne cartographie de l'occupation des terres par télédétection demeure un problème délicat [3]. C'est fort de tout ceci que l'étude de l'occupation du sol dans la région des Lacs a été réalisée. Elle se propose d'étudier la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol dans la zone qui se trouve à cheval entre la savane et la forêt et d'appréhender l'influence de cette occupation du sol sur les coefficients de rétention.

## 2. Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude est située dans la région des Lacs au centre de la Côte d'Ivoire entre les latitudes  $6^{\circ}30' N$  et  $7^{\circ}35' N$  et les longitudes  $4^{\circ}40' W$  et  $5^{\circ}40' W$ . Elle a pour ville principale Yamoussoukro, la capitale politique du pays (**Figure 1**). Elle couvre une superficie d'environ  $6000 \text{ km}^2$  avec une population estimée à 413 900 habitants en 2000 [6]. Au plan géomorphologique, la zone se présente en une large pénéplaine entourée par les monts du Yaouré au Nord-Ouest et la chaîne de Fétékro au Sud Est, qui culminent respectivement à 623 m à l'Ouest du barrage de Kossou et à 646 m au Sud Est de Yamoussoukro [7].

L'altitude moyenne de la région comprise entre ces deux massifs, est de 200 m. Le paysage est constitué d'un ensemble de collines à profil peu élevé, séparé par des vallées peu profondes avec des versants ayant de faibles pentes. Sur ce plateau, le réseau hydrographique dessine des interfluves de formes diverses plus ou moins régulières et de tailles variables. Les interfluves jouent un grand rôle dans l'occupation des sols. En effet, les villages sont bâtis sur les collines et les plateaux. Les sols de la région sont homogènes et sont en général des sols ferrallitiques moyennement ou fortement desaturés et des sols brunifiés au niveau des plateaux et reliefs. On note aussi la présence de sols peu évolués, des sols hydromorphes dans les plaines et les bas-fonds. Tous ces sols se développent sur le socle protérozoïque formé de roches plutoniques et métamorphiques. La végétation est constituée de forêt mésophile, de forêts-galeries, de savanes arbustives ou de savanes à rôniers (*Borassus aethiopum*). La forêt mésophile est caractérisée par la forêt dense humide semi décidue type à *Celtis spp.* et *Triplochiton Scleroxylon* et type à *Aubrevillea kerstingii* [8 ; 9]. La limite de la grande forêt équatoriale et de la grande savane subtropicale traverse la partie sud de la région étudiée. La savane s'enfonce dans la forêt suivant un golfe célèbre en forme de V appelée le « V baoulé » [7]. On rencontre également dans la région des zones de reboisement à espèce unique de *Tectona grandis*.

La région des Lacs compte six forêts classées, totalisant 22 310 hectares; régulièrement menacées par les feux de brousse et les coupes clandestines. Le climat est de type équatorial de transition atténué, entre les climats de type guinéen et de type soudanien [7 ; 9]. Il est caractérisé par deux saisons dont une sèche de novembre à avril marquée par la présence de l'harmattan et une saison des pluies (mai à octobre) avec deux maxima pluviométriques en juin et en septembre. Ces saisons sont sous l'influence de la mousson du Sud-Ouest et de l'harmattan du Nord-Est. La hauteur des précipitations de la zone varie de 1200 à 1600 mm/an avec un déficit hydrique cumulé allant de 205 mm à 450 mm [9]. Le Centre de la Côte d'Ivoire, tout comme le Nord est dominé par de nombreuses petites retenues de nature diverse édifiées pour la plupart en 1970 et 1985 lors des différents programmes d'aménagements ruraux. Ces retenues sont beaucoup orientées vers l'agro-pastorale et la riziculture. Au total, on y dénombre 38 retenues d'eau couvrant 2 350 ha de superficies aménagées. Le volume d'eau stocké est estimé à  $276,8.10^9$  m<sup>3</sup> du fait de la présence du barrage hydro-électrique de Kossou construit en 1972 [10].



**Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude.**

### 3. Méthodologie

#### 3-1. Données utilisées

Nous avons eu recours aux scènes 196/055 et 197/055 et aux images satellitaires de type Landsat TM du 16/01/1986 composée de sept bandes et ETM+ du 20/01/2002 comprenant six bandes de résolution de 28,5 m. L'étude de la dynamique d'occupation du sol a été réalisée à partir d'une mosaïque de ces images. L'image de la scène 196/055 est inexploitable à cause d'une couverture nuageuse importante. Les deux scènes utilisées sont centrées sur la ville de Yamoussoukro et ont un intervalle de seize ans. La composition colorée issue de l'association des canaux 4-3-7 a été retenue pour l'image TM et la combinaison des bandes 3-2-1 pour ETM+ ont donné le maximum d'information. Une zone test comprise entre les longitudes 5°13'37,98"W et 5°43'9,91"W et les latitudes 6°32'8,71"N et 7°20'57,51"N a été retenue. C'est sur cette zone test que la classification a été réalisée. A l'issue de l'interprétation des compositions colorées, six classes ont été retenues. Il s'agit des classes suivantes : eau, sols nus et dégradés, forêt, savane arborée, cultures et cultures irriguées.

#### 3-2. Classification et estimation de la précision de l'interprétation des images

Dans ce travail, la classification supervisée a été utilisée avec l'aide des données cartographiques (occupation du sol, topographiques, etc. à l'échelle 1/200 000). Elle consiste à affecter des pixels aux échantillons les plus proches, selon une distance dite bayésienne qui se fonde sur la probabilité que dispose un pixel à appartenir à une classe donnée [5]. Cette technique fournit en général de bons résultats dans la production des documents cartographiques. Plusieurs algorithmes permettant de reproduire au mieux la réalité de terrain perçue à travers les images satellitaires existent au sein de la classification supervisée. Dans cette kyrielle d'algorithmes, nous avons opté dans le cadre de cette étude pour la classification par le « maximum de vraisemblance ». Ce dernier est très utilisé dans les classifications supervisées et est considéré comme le plus performant dans la production des cartes thématiques dans le domaine de l'occupation du sol [5]. La précision de la classification de l'occupation du sol réalisée, à partir des données de 1986 et 2002, a été mesurée à l'aide d'outils statistiques que sont la matrice de confusion et l'indice Kappa. L'indice de Kappa a été utilisé pour apprécier la précision de la classification adoptée. D'après [11], l'indice de Kappa (k) est utilisé pour valider et estimer la précision dans le schéma de la classification de la végétation. Sa formule est donnée par l'*équation 1* suivante :

$$\frac{P_0 - P_c}{P_p - P_c} \tag{1}$$

Dans cette équation,  $P_0$  est égal au pourcentage réel obtenu de classification des éléments de l'occupation du sol ; il est égal au quotient de la somme des chiffres de la diagonale de la matrice avec le total du nombre d'observations ;  $P_c$  est l'estimation de la probabilité d'obtenir une classification correcte ; pour calculer  $P_c$ , on procède de la façon suivante : on réalise les produits marginaux des valeurs des colonnes et des rangées au niveau de chaque cellule de la matrice, puis la somme des valeurs de la diagonale est divisée par le total des produits de chaque cellule de la matrice ; pour une classification correcte, la valeur de  $P_c$  est en général inférieure à  $P_0$  et  $P_p$  est le pourcentage obtenu lorsque la classification est parfaite c'est-à-dire bonne à 100%. De ce qui précède, l'équation 1 peut s'écrire selon la formule de l'*équation 2* suivante :

$$K = \frac{P_0 - P_c}{1 - P_c} \tag{2}$$

### 3-3. Evaluation de la dynamique de l'occupation du sol

Les données obtenues de l'interprétation de chaque image Landsat TM (1986) et ETM<sup>+</sup> (2002) ont été analysées et comparées. Ainsi, pour chaque unité d'occupation du sol, le taux d'évolution annuel est calculé selon la formule de l'**équation 3** suivante [12]:

$$T_{\text{annuel}} = \frac{V_{i2002} - V_{i1986}}{100 \times P} \quad (3)$$

où  $V_{i2002}$  représente la valeur de la statistique de la strate  $i$  en 2002,  $V_{i1986}$  la valeur des statistiques de la strate  $i$  en 1986 et  $P$  est la durée de la période d'observation entre 2002 et 1986 qui est de 16 ans. Cette formule permet de faire une analyse diachronique de la dynamique d'occupation des sols sur la zone étudiée.

### 3-4. Notion d'indice de la capacité de rétention des classes d'occupation du sol

Afin d'évaluer l'impact de la dynamique de l'occupation du sol sur les écoulements, un indice représentant la capacité de rétention en eau au niveau de chaque classe d'occupation du sol pour l'année considérée a été calculé. Ainsi, si l'on appelle  $p_i$  le pourcentage en superficie de la zone d'étude occupée par la classe d'occupation du sol  $i$  et  $a_i$  un coefficient de pondération représentant la capacité de rétention en eau effective de la classe  $i$ , alors,  $Cr$  est obtenu selon [2] par la formule suivante (4) :

$$Cr = \sum_i P_i \times a_i \quad (4)$$

Les  $a_i$  ont été définis pour chaque classe entre 0 et 2 (rétentions nulle et maximale, respectivement ; Tableau 1) [2]. Partant de cette définition, le coefficient  $Cr$ , compris entre 0 et 200, est utilisable sur des bassins de taille suffisante pour discriminer avec efficacité les différentes classes d'occupation des sols par télédétection ( $> 25 \text{ km}^2$ ). Dans ce cas, les valeurs fortes ( $> 100$ ) correspondraient alors à des bassins encore sauvages dotés d'une importante couverture végétale, d'une forte capacité de rétention et donc peu propices à l'intensification des écoulements, tandis que les valeurs faibles correspondraient à des bassins anthropisés, voire dégradés, dotés d'une faible capacité de rétention et donc, à l'inverse des précédents, propices à d'importants écoulements.

**Tableau 1:** Coefficients de capacité de rétention pour chacune des classes d'occupation des sols. [2].

Classe d'occupation du sol	$a_i$
Habitat	0
Sols nus ou dégradés	0
Cultures	1
Savanes faiblement cultivées	1
Savanes arbustives	1
Savanes arborées	2
Cultures irriguées	2
Forêts	2

## 4. Résultats

### 4-1. Evaluation de la précision de la classification

De l'analyse des images, six classes d'occupation du sol ont été identifiées. Des matrices de confusion ont été élaborées pour évaluer la précision de la classification (*Tableaux 2 et 3*). Il ressort de cette analyse que les deux images présentent une bonne précision globale pour l'ensemble de la zone d'étude. Ainsi, l'image TM (1986) a une précision globale de 88,47% avec un indice de Kappa évalué à 85,84% alors que cette précision est de 90,46% pour celle d'ETM<sup>+</sup> (2002) avec un Kappa de 88 %. Au niveau des différentes classes la précision n'est pas identique. Certaines classes d'occupation du sol sont classifiées avec plus de précision que d'autres. De même, les classes de la matrice de confusion de l'image d'ETM<sup>+</sup> sont mieux classifiées que celles de l'image TM. Toutes les classes d'occupation retenues sur l'image TM, ont une précision cartographique supérieure à 70% (*Tableau 2*).

La classe Cultures irriguées a une précision de 99,54 %. Elle est suivie de la classe Eau 96,55%, ensuite viennent les classes Forêts 94,85%, Sols nus ou dégradés 91,42%, Savane arborée 81, 17% et enfin la classe Culture 73, 39%. La plus faible précision a été observée au niveau de cette classe. On remarque en outre qu'elle présente une confusion de 25,02% avec la classe Savane arborée. Cette confusion peut être due à la présence de cultures industrielles qui se comporteraient comme des savanes arborées. Au niveau de la matrice de confusion de l'image ETM<sup>+</sup>, la précision est supérieure à 80% pour toutes les classes (*Tableau 3*). De plus, on remarque que la confusion entre la classe cultures et savane arborée a diminué, elle est passée de 25% à 13,48%. Dans l'ensemble, les valeurs des différents indicateurs de précision de la classification supervisée analysées pour les différentes images, rendent compte d'une part, de la bonne qualité des échantillons et d'autre part, de la bonne correspondance entre le résultat de la classification et la réalité spatiale contenue dans les images.

Dans une étude de l'occupation des sols, lorsque l'indice de Kappa évalué dans les opérations de classification est compris entre 50 et 75 %, la classification adoptée est valable et les résultats peuvent être judicieusement utilisés [11]. Dans la présente étude, l'indice de Kappa est supérieur à 80%. Les différents résultats d'évaluation des images classifiées par la méthode de la classification supervisée sont donc validés.

**Tableau 2:** *Matrice de confusion de la classification de l'image Landsat TM (1986).*

Classes	1	2	3	4	5	6
Ea	96,55	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00
Snd	0,16	91,42	0,08	3,40	1,59	0,12
Fo	0,40	0,00	94,85	2,14	0,00	0,00
Sa	0,40	0,73	5,07	81,17	25,02	0,29
Cs	0,56	7,30	0,00	6,58	73,39	0,06
Cis	1,92	0,54	0,00	6,68	0,00	99,54
Total	100	100	100	100	100	100

*Ea: eau; Snd: sols nus ou dégradés; Fo: forêts; Sa: savane arborée; Cs: cultures; Cis: cultures irriguées; Kappa = 85,84%; Précision globale 88,47%*

**Tableau 3** : Matrice de confusion de la classification de l'image Landsat ETM<sup>+</sup> (2002)

Classes	1	2	3	4	5	6
Ea	99,58	0,00	0,00	0,42	0,00	2,03
Snd	0,00	97,68	1,65	3,82	0,60	1,35
Fo	0,00	0,29	91,49	0,48	4,81	0,41
Sa	0,25	1,35	0,90	88,54	13,48	9,32
Cs	0,00	0,39	5,96	5,97	81,11	1,35
Cis	0,17	0,29	0,00	0,77	0,00	85,54
Total	100	100	100	100	100	100

*Ea* : eau ; *Snd* : sols nus ou dégradés ; *Fo* : forêts ; *Sa* : savane arborée ; *Cs* : cultures ; *Csi* : cultures irriguées ; *Kappa* (2002) = 88 % ; Précision globale 90,46%

## 4-2. Dynamique de l'occupation du sol dans la région des Lacs

### 4-2-1. Analyse de l'occupation du sol

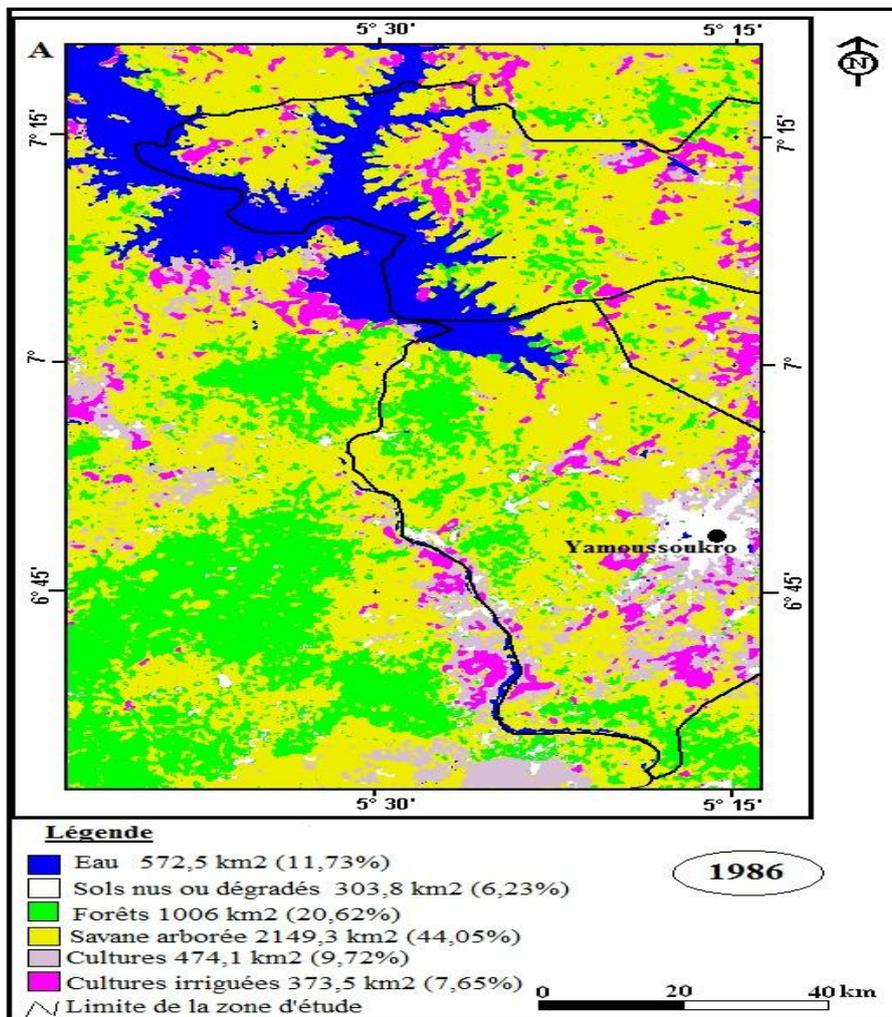
Les différentes cartes élaborées ici ne couvrent pas la totalité de la zone d'étude. Néanmoins, les fenêtres retenues permettent de suivre l'évolution du couvert végétal pendant seize ans (1986 à 2002). L'examen des cartes (**Figures 2 et 3**) et du Tableau 4 associé à ces figures montre une modification de l'occupation du sol en général et du couvert végétal entre 1986 et 2002. Ainsi, on constate une réduction de la savane arborée en seize ans. Celle-ci est passée de 44,05% en 1986 à 27,04% en 2002. Par contre, on note une forte extension de la forêt de 20,62 % en 1986, elle est passée à 25,21% en 2002. Quant aux sols nus ou dégradés, leur superficie est passée de 6,23% à 17,41% soit une augmentation de plus du double. Ce constat est également valable pour les cultures. La superficie de ces cultures a presque doublé en l'espace de seize ans. L'augmentation des superficies des cultures et des sols nus ou dégradés pourrait être due en grande partie à la pression humaine qui provoque de plus en plus une anthropisation des zones naturelles.

En effet, autour des centres urbains se développent de plus en plus une agriculture dite périurbaine qui utilise de grandes superficies. Au contraire de ces augmentations, on note une diminution au niveau des classes eau et cultures irriguées. Ainsi, les plans d'eau ont subi une réduction de même que les cultures irriguées. Cette réduction pourrait être due soit aux prélèvements d'eau dans les retenues d'eau, soit à une forte évaporation créant ainsi un déficit d'alimentation ou à une diminution des écoulements de surface due à une baisse de la pluviométrie. Au total, plus de 60% de la zone d'étude est couverte par la savane arborée et la forêt. Finalement, à la suite de cette analyse diachronique des images TM (1986) et ETM<sup>+</sup> (2002), on remarque qu'en seize ans, les modifications de l'occupation du sol sont assez nettes et se traduisent de façon qualitative et quantitative par les changements dans l'espace géographique et l'évolution des superficies.

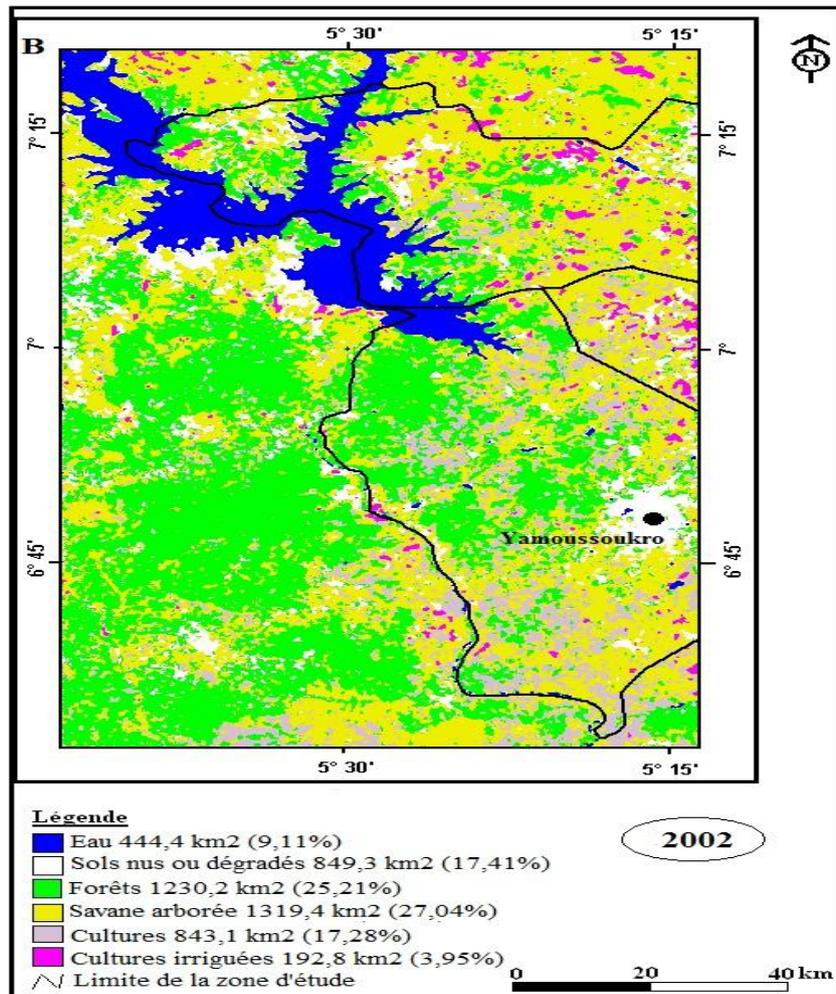
**Tableau 4 :** Evolution de l'occupation des sols entre 1986 et 2002 à l'échelle de la zone d'étude.

Classes	Janvier 1986 (%)	Janvier 2002 (%)
Eau	11,73 (572,5km <sup>2</sup> )	9,11(444,4km <sup>2</sup> )
Sols nus ou dégradés	6,23 (303,8km <sup>2</sup> )	17,41(849,3km <sup>2</sup> )
Forêts	20,62 (1006km <sup>2</sup> )	25,21(1230,2km <sup>2</sup> )
Savane arborée	44,05(2149,3km <sup>2</sup> )	27,04(1319,4km <sup>2</sup> )
Cultures	9,72(474,1km <sup>2</sup> )	17,28(843,1km <sup>2</sup> )
Cultures irriguées	7,65(373,5km <sup>2</sup> )	3,95(192,8 km <sup>2</sup> )

Superficie totale traitée : 4979,2 km<sup>2</sup> ; Tan : taux d'évolution moyen annuel de 1986 à 2002 ; Tb : taux d'évolution au sein de la même classe de 1986 à 2002



**Figure 2 :** Image de la classification supervisée de la zone d'étude en 1986

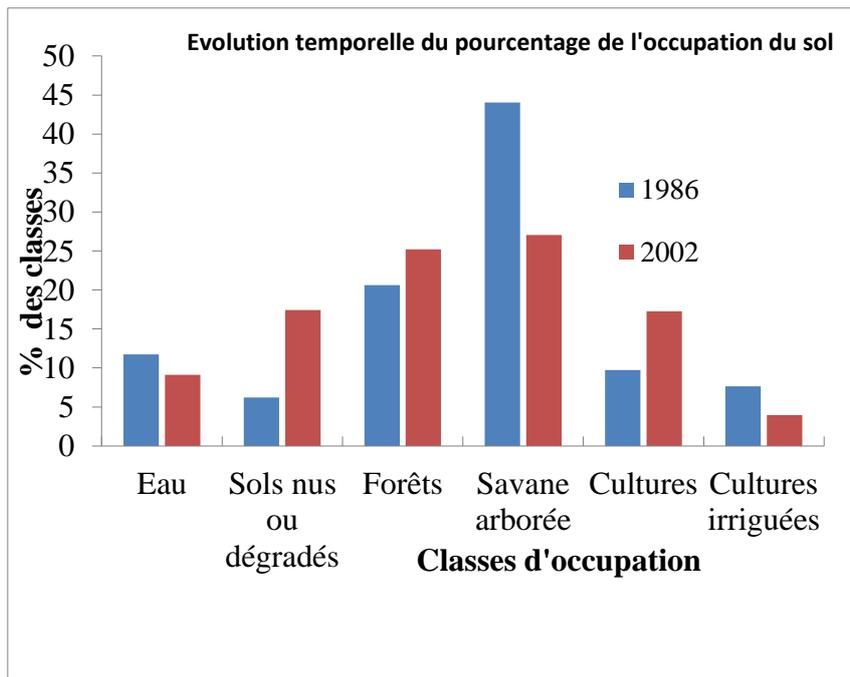


**Figure 3 :** Image de la classification supervisée de la zone d'étude en 2002

#### 4-2-2. Evaluation de la dynamique de l'occupation du sol de 1986 à 2002

Les résultats de l'interprétation des images satellitaires de 1986 et 2002 révèlent de façon générale une tendance à l'augmentation de la forêt, des sols nus ou dégradés et des cultures. Parallèlement, on assiste à une régression de la savane arborée, des plans d'eau et des cultures irriguées. L'analyse de la **Figure 4**, présente la dynamique de l'occupation du sol de la zone étudiée entre 1986 et 2002 révèle de profonds changements au niveau de la végétation. Afin de mieux apprécier ces changements, des taux d'évolution des unités d'occupation du sol ont été déterminés et présentés dans le **Tableau 5**. Les taux d'évolution au sein d'une même classe varient avec une grande amplitude. Les plus grandes variations ont été observées sur les classes de savane arborée et de sols nus ou dégradés suivie de la classe cultures en valeur absolue. Les taux d'évolution par rapport à l'ensemble de la zone étudiée montrent que ces taux sont largement inférieurs aux valeurs relatives des taux d'évolution par rapport aux classes. Une analyse plus pointue au niveau de chaque classe permet de mieux apprécier la dynamique entre 1986 et 2002. La classe Eau a un taux d'évolution moyen annuel négatif. Les plans d'eau ont donc régressés de 0,164%. Les sols nus ou dégradés présentent un taux d'évolution moyen annuel évalué à 0,699%. Cette classe regroupe en son sein les habitats, les sols indurés, les cuirasses latéritiques, les inselbergs et les affleurements rocheux. L'évolution de cette classe s'est faite au détriment de la savane arborée. Tout comme les sols nus ou dégradés, la classe Forêt a connu une augmentation de 0,287%.

La classe savane arborée a le taux de régression le plus élevé en valeur absolue (1,063%) et la savane semble laisser de plus en plus de place aux cultures et aux sols nus ou dégradés. Au niveau de la classe Cultures, on constate un taux d'évolution moyen annuel positif de 0,473%. Par contre, les Cultures irriguées ont un taux de régression de 0,231%. Cette baisse de la surface des cultures irriguées est probablement liée aussi à la réduction des plans d'eau ; il semble donc exister une corrélation entre la réduction des plans d'eau et les superficies irriguées. L'étude des taux d'évolution des classes montre que la classe savane arborée présente le plus fort taux de régression tandis que les sols nus ou dégradés ont le taux de progression le plus élevé. Parallèlement, on note aussi une progression des superficies de forêt et des cultures alors que les plans d'eau et les cultures irriguées connaissent une régression. On remarque également l'impact de la pression humaine sur la dynamique d'occupation du sol qui provoque une anthropisation des zones naturelles et dans ce cas pourrait avoir un impact sur les écoulements.



**Figure 4 :** Evolution temporelle du pourcentage de l'occupation du sol dans la zone d'étude

**Tableau 5 :** Taux d'évolution des classes de l'occupation du sol

Classes	Tb (%)	Tan (%)
Eau	-2,62	-0,164
Sols nus ou dégradés	+11,18	0,699
Forêts	+4,59	0,287
Savane arborée	-17,01	-1,063
Cultures	+7,56	0,473
Cultures irriguées	-3,7	-0,231

*Tan :* taux d'évolution moyen annuel de 1986 à 2002 ; *Tb :* taux d'évolution au sein de la même classe de 1986 à 2002

#### 4-3. Evaluation de l'impact de l'anthropisation sur les écoulements

Dans l'objectif de quantifier l'impact de l'anthropisation sur les écoulements de surface dans la zone, les coefficients de rétention ont été calculés et sont présentés dans le tableau VI. A l'analyse de ce Tableau 6, on constate que tous les coefficients de rétention sont inférieurs à 100 pour toutes les classes retenues. C'est donc une zone propice aux écoulements de surface avec son corolaire de développement intense de l'érosion. De même, ces faibles valeurs rendent compte d'une forte anthropisation voire d'une dégradation du milieu. Cette prépondérance à l'anthropisation a déjà été relevée au niveau de l'étude de la dynamique et du taux d'évolution de l'occupation du sol. La zone d'étude connaît donc une tendance à l'anthropisation. Ainsi, les zones naturelles font place aux cultures et sols nus ou dégradés. Cet état de fait a pour conséquence directe une augmentation des écoulements de surface avec probablement une intensification de l'érosion des sols. Cependant, on note également une tendance à la régénérescence de la forêt qui semble prendre de la place par rapport à la savane arborée.

**Tableau 6 :** Evolution des coefficients de rétention (Cr) dans la zone d'étude entre janvier 1986 et janvier 2002

	<i>Forêts</i>	<i>Savane arborée</i>	<i>Cultures</i>	<i>Cultures irriguées</i>
Cr (janvier 1986)	41,24	88,1	9,72	15,3
Cr (janvier 2002)	50,42	54,08	17,28	7,9

#### 5. Discussion

La classification de l'occupation du sol résultant de l'analyse des images TM et ETM<sup>+</sup> a donné une précision globale respective de 88,47% et 90,46%. L'indice de Kappa a donné des valeurs de 85,84% pour l'année 1986 et 88% pour 2002. On peut conclure que les résultats de cette analyse sont statistiquement acceptables. Du reste, les résultats d'une analyse d'image dont la valeur de Kappa est supérieure à 0,50 sont bons et exploitables [11]. De ce fait, la présente classification qui compte six classes est acceptable et permet d'évaluer la tendance de changements de l'occupation du sol dans une période 16 ans. Les classes cultures, savanes arborées et cultures irriguées montrent quelques erreurs de confusion. La difficulté à discriminer visuellement ces classes peut être due à des signatures spectrales similaires. C'est ce qui explique que les cultures se confondent avec la savane arborée et souvent avec les cultures irriguées. La savane est dite arborée quand la densité de la strate arborescente varie entre 2 et 20% [9]. Cette classe se retrouve dans toute la zone d'étude du Nord au Sud. De même, les plantations vieillissantes (café cacao, etc.) peuvent être associées à cette classe. Ceci explique les erreurs de confusion qui existent entre les deux classes (culture et savane arborée). Cependant, les valeurs de ces erreurs de confusion enregistrées sont faibles.

En effet, en dehors des 25% de confusion qui existent entre les cultures et la savane arborée, aucune autre erreur n'excède les 20%. Ces erreurs sont donc acceptables dans la mesure où aucune de ces erreurs n'est au-dessus de 70% qui est la valeur limite [12]. L'analyse de la dynamique de l'occupation du sol entre 1986 et 2002 montre que les sols nus ou dégradés, les forêts et les cultures augmentent de façon significative, par opposition aux plans d'eau, cultures irriguées et savane arborée qui régressent nettement. Cette analyse est importante dans la mesure où elle permet de comprendre les divers changements intervenus dans l'occupation du sol, d'une part, et les causes qui en sont à l'origine d'autre part. Les taux de régression constatés au niveau des plans d'eau (-2,62%) et des cultures irriguées (-3,7%) sont les plus bas contrairement à celui relevé au niveau de la savane arborée (-17,01%).

Les taux de régression moyens annuels calculés au niveau de ces classes donnent -0,164% pour les plans d'eau, -1,063% pour la savane arborée et -0,231% pour les cultures irriguées. Parallèlement, à ces différentes régressions, on constate que la savane laisse de plus en plus de place aux sols nus ou dégradés avec un taux moyen annuel d'évolution de 0,699% et de même qu'aux cultures. De ce qui précède, on peut conclure que cette dégradation serait due aux phénomènes naturels (variabilité climatique) et /ou aux activités anthropiques (feux de brousse, culture sur brulis, exploitation abusive du bois, création de nouvelles plantations, etc.) [5]. Cette hypothèse paraît plausible dans la mesure, où on constate une augmentation de la classe culture avec un taux moyen annuel d'évolution de 0,473% au profit de la savane arborée. Le même constat est valable pour les sols nus ou dégradés. Le même constat a été fait dans la partie Nord de la Côte d'Ivoire [2]. Ces auteurs ont remarqué dans cette région du pays entre 1986 et 1994, une réduction de la savane arborée au profit des cultures et des sols nus et dégradés. Une fois de plus, c'est la pression humaine qui en est la cause. De plus la réduction des plans d'eau semble être liée à l'impact de la variabilité climatique qui se manifeste directement au niveau de la superficie des terres irrigables.

En effet, la baisse des superficies irrigables serait la conséquence soit d'un déficit en écoulement de surface soit à des prélèvements trop intenses au niveau des retenues d'eau. L'une des conséquences visible de cette situation est observable au niveau du lac de Kossou. Au départ, ce lac couvrait une superficie estimée à 1500 km<sup>2</sup> pour une cote de 184 mm actuellement, il ne couvre qu'une superficie de 900 km<sup>2</sup> [13]. Cette réduction de la superficie d'environ 40% serait imputable à la forte évaporation qui a lieu dans la zone et dont l'effet immédiat est ressenti au niveau de l'écoulement de surface [14]. Dans la zone d'étude, la savane arborée, les lambeaux de forêts et les forêts galeries constituent la végétation la plus largement représentée. Selon [9] qui a travaillé dans le « V » baoulé, la surface des forêts denses dans cette région a connu une forte régression. Ainsi, les superficies couvertes qui étaient de 233 430 ha en 1971 sont passées à 18 114 ha en 1984. Cette baisse est due à la promotion des cultures de café et cacao par les autorités nationales à travers un programme gouvernemental lancé en 1965 pour encourager le développement des cultures de rentes en zone forestière [15].

Cependant, on note une augmentation de la forêt. Le taux d'évolution moyen annuel est de 0,287%. Ceci semble indiquer une tendance à la régénérescence de la forêt. Ce constat s'accorde aux comportements climatiques mettant en évidence une normalisation des précipitations depuis le début de la décennie 1990 (1992-1993) [5]. Cette tendance peut aussi s'expliquer par le renforcement des mesures de protection et de consécration des aires végétales (reboisement, etc.) [16]. Cette explication nous paraît judicieuse, dans la mesure où dans la zone d'étude, on note la présence de forêts classées au nord et au sud de la zone (Betefla, Baka Kokore, Sougourou, etc.). De même, on note la présence de forêts issues des projets de reboisement en grande partie constituée d'espèce unique comme *Tectona grandis* communément appelé tec. Cette régénérescence de l'espace naturel a également été relevé dans le Nord-Est de la Côte d'Ivoire, dans le bassin versant du N'Zi et dans le département de Korhogo [5, 16, 17].

Selon Grégoire et Ferrari cités par [5], les modifications affectant la couverture végétale d'un territoire donné, qu'elles soient d'origine anthropique ou naturelle, ont une influence plus ou moins directe sur la relation existant entre les précipitations et les écoulements de surface. En effet, la nature du couvert intervient sur l'intensité de cinq processus fondamentaux dans le cycle de l'eau à la surface : interception, évaporation directe après interception, infiltration dans le sol, évapotranspiration et ruissellement de surface [5]. L'ampleur de l'anthropisation ou de la régénérescence de la forêt sur les coefficients d'écoulements dans la zone d'étude n'a pas été abordée dans cette étude faute d'études plus poussées pour évaluer ce coefficient. Cependant, un indice de rétention a été calculé. Il met en évidence une forte anthropisation et une dégradation de la zone d'étude.

En effet, tous les indices de rétention au niveau des différentes classes sont inférieurs à 100. Selon [2], lorsque ces indices sont en dessous de 100, les bassins étudiés sont anthropisés ou dégradés. Dans ce cas, ils sont dotés d'une faible capacité de rétention. Par conséquent, l'écoulement de surface est important et les phénomènes d'érosion hydrique auront tendance à se développer. Une évolution semblable a été observée dans le bassin versant du Lafigué au Nord de la Côte d'Ivoire [2]

## 5. Conclusion

Une analyse diachronique d'images satellitaires Landsat TM et ETM<sup>+</sup> sur une période de 16 ans de 1986 à 2002 a été réalisée en vue d'évaluer la dynamique de l'occupation du sol et son impact sur les écoulements. La méthode de la classification supervisée a permis de discriminer six classes d'occupation du sol dans la zone. Les précisions globales obtenues sont de 88,47% (1986) et de 90,46% (2002). L'indice de Kappa de la matrice de confusion est de 85,84% pour l'année 1986 et 88 % pour 2002. Cette étude a permis de mettre en place six classes à savoir l'eau, la forêt, la savane arborée, les sols nus ou dégradés, les cultures et les cultures irriguées. Les cartes élaborées pour l'année 1986 et 2002 permettent d'identifier une évolution temporelle et spatiale de l'occupation du sol dans la zone d'étude. Les taux d'évolution moyens annuels calculés montrent une régression des plans d'eau (-0,164), des cultures irriguées (-0,231) et de la savane (-1,063). Par contre, on remarque une tendance à l'évolution pour la forêt (0,287), les cultures (0,473) et les sols nus ou dégradés (0,699). De même, on observe de très faibles coefficients de rétention avec des valeurs en dessous de 100 pour les deux années d'étude. Au total, la zone d'étude est marquée par une forte anthropisation et une dégradation des conditions pluviométriques. Cette étude montre également l'importance de la télédétection dans la compréhension des modifications profondes de l'occupation du sol et de son impact sur les ressources en eau dans une zone où l'activité principale est l'agriculture.

## Références

- [1] - G.M. FOODY, Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, vol. 80, (2002) pp. 185-201.
- [2] - P. CECCHI, F.GOURDIN, S. KONE, D. CORBIN, E. JACKIE, A. CASENAVE, Les petits barrages du nord de la Côte d'Ivoire : inventaire et potentialités hydrologiques. *Sécheresse*, 20 (1) (2009), pp. 112-22.
- [3] - T. OUATTARA, J-M. DUBOIS, et Q. H. J. GWYN, Méthode de cartographie de l'occupation des terres en milieu aride à l'aide de données multisources et de l'indice de végétation tsavi, *Télédétection*, vol, 6, n° 4, (2006) pp. 291-304
- [4] - G. MAHE, J.E. PATUREL., E. SERVAT, D. CONWAY, A. DEZETTER, Impact of land use change on soil water holding capacity and river modeling of the Nakambe River in Burkina. *J. Hydrol.*, 300, (2005) pp. 33-43.
- [5] - 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, Côte d'Ivoire, (2007), 210 p.
- [6] - INS, Recensement général de la population et de l'Habitat (RGPH) 1998. Données socio-demographiques et économiques : Région des lacs (2001).
- [7] - P. LEBLOND, Contribution aux études hydrogéologiques en Côte d'Ivoire. Région de Yamoussoukro (Station expérimentale de l'ENSTP). Thèse de 3<sup>e</sup> cycle de l'Université de Bordeaux 1, n° d'ordre 2015, (1984) ; 150 p.

- [8] - GEOMINES, Inventaire hydrogéologique appliqué à l'hydraulique villageoise. Carte de Gagnoa, Cahier n° 24, République de Côte d'Ivoire, Ministère des Travaux publics et des transports, Direction centrale de l'hydraulique, (1982). 21p.
- [9] - K. E. N'GUESSAN, Etude de l'évolution de la végétation du « V Baoulé » (contact forêt/savane en Côte d'Ivoire) par télédétection. *Télédétection Sécheresse*. Ed. AUPELF-UREF, (1990). pp. 181-196.
- [10] - ANONYME, Programme Sectoriel d'Aménagement Rural PSAR 1996 : Inventaire et diagnostic des barrages, DCGTX, (1996). p.95.
- [11] - Jr. R. G., PONTIUS, Quantification error versus location error in compararison of categorical maps. *Photogrammetric Engineering and remote Sensing*, vol. 66, n° 8, (2000). pp. 1011-1016.
- [12] - V. J. MAMA ; J. OLOUKOI, Evaluation de la précision des traitements analogiques des images satellitaires dans l'étude de la dynamique de l'occupation du sol. *Télédétection*, vol. 3, n°5, (2003), pp. 429-441.
- [13] - P. FABIO, O. NJIFONJOU, J. ASSIENAN, A. KODJO, Y. NDIA, N. SALVATI, C. SEGHIERI, Profil de pauvreté des communautés riveraines du Lac de Kossou en Côte d'Ivoire. Cotonou, Programme pour des moyens d'existence durable dans la pêche en Afrique de l'Ouest. DFID-FAO. PMEDP/RT/17, (2002), 90p.
- [14] - N. SORO, G. SORO, K.E. AHOUSSE, M.B. SALEY, T. LASM, J. BIEMI, Caractérisation spatio-temporelle des précipitations dans le « V » Baoulé (Centre de la Côte d'Ivoire) au cours de la période 1966-2000. *Journal Africain de Communication Scientifique et Technologique*, N° 2, (2007), pp. 89-108.
- [15] - S. BIGOT, Y.T. BROU, J. OSZWALD, A. DIEDHIOU, Facteurs de la variabilité pluviométrique en Côte d'Ivoire et relations avec certaines modifications environnementales. *Sécheresse*, 16 (1)(2005), pp. 5-13.
- [16] - D. SYLLA, Dynamique de l'occupation du sol dans le Nord de la Côte d'Ivoire (1986-2000): l'exemple du département de Korhogo. DEA, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, (2002), 67p.
- [17] - S. COULIBALY, L'imagerie spatiale haute résolution pour l'étude de la dynamique de l'occupation du sol dans le Nord-Est de la Côte d'Ivoire : Bouna. DEA, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, (2003), 60p.