

## **ÉVOLUTION DE L'OCCUPATION DU SOL ET RYTHME SAISONNIER DE LA VÉGÉTATION DU BASSIN VERSANT DU BANDAMA EN CÔTE D'IVOIRE**

**Kassi Alexis KOUAMÉ<sup>1\*</sup>, Aimé KOUDOU<sup>4</sup>,  
Koffi Fernand KOUAMÉ<sup>1,2</sup>, Amani Michel KOUASSI<sup>3</sup>,  
Sekouba OULARÉ<sup>1</sup> et Gnanoui Christian Rodrigue ADON<sup>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 582 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*

<sup>3</sup>*Institut National Polytechnique Houphouët Boigny (INP-HB), BP 1093 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire*

<sup>4</sup>*Département des Sciences de l'Environnement (DSE), Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa, 02 BP 150 Daloa 02, Côte d'Ivoire*

---

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

### **RÉSUMÉ**

L'occupation du sol a des conséquences importantes sur le comportement hydrologique d'un bassin versant. L'observation de ses changements au cours du temps permet d'estimer la nature des processus naturels et anthropiques en jeu et d'évaluer leur impact sur les ressources naturelles. Cette étude vise une meilleure connaissance de l'évolution du couvert végétal dans le bassin versant du Bandama. Ce qui implique une étude diachronique de la dynamique de l'occupation du sol et l'étude du rythme saisonnier du couvert végétal du bassin. Pour réaliser cette étude, nous avons utilisé l'imagerie satellitaire NDVI de MODIS. La méthode de classification supervisée par maximum de vraisemblance démontre que de 2000 à 2006 les forêts denses et les forêts claires sont en légère diminution. Pour leur part, les savanes arbustives ou herbeuses ont subi une nette augmentation. L'étude du rythme saisonnier de la végétation de janvier à décembre 2006 révèle qu'au cours de la grande saison sèche, d'octobre à mars, la diminution progressive de la biomasse entraîne une régression des surfaces à forte activité photosynthétique jusqu'à la limite du « V Baoulé ». En conséquence, les surfaces à faible indice de végétation augmentent.

Pendant la 1<sup>ère</sup> saison des pluies, de mars à juin, c'est le phénomène contraire. Les surfaces à forte activité photosynthétique augmentent au détriment de celles à faible indice de végétation. Cette tendance à l'augmentation est interrompue dans sa progression et même inversée par la petite saison sèche de juin à juillet.

**Mots-clés :** *Bandama, bassin versant, MODIS, occupation du sol.*

## **ABSTRACT**

### **Land use evolution and seasonal rhythm of the vegetation of the Bandama watershed in Côte d'Ivoire**

The land use has important consequences on the hydrological behaviour of a watershed. The observation of its changes in time allows to estimate the nature of the natural and anthropological processes setting and to estimate their impact on natural resources. This study aims at a better knowledge of the evolution of the vegetation cover in the Bandama watershed. What implies a diachronic study of the dynamics of the land use and a study of the seasonal rhythm of the vegetation of the watershed. To realize this study, we used the satellite imaging NDVI of MODIS. The method of classification overseen by maximum of credibility demonstrates that from 2000 till 2006 the dense forests and the clear forests are in light decrease. For their part, arbutuses or grassy savannas underwent net increase. The study of the seasonal rhythm of the vegetation from January till December, 2006 reveals that during the big dry season, from October till March, the progressive decrease of the biomass entails a regression of surfaces with strong photosynthetic activity until the limit of the "V Baoulé". As a consequence, surfaces with weak indication of vegetation increase. During the 1st rainy season, from March till June, it is the opposite phenomenon. Surfaces with strong photosynthetic activity increase to the detriment of those in weak indication of vegetation. This tendency to the increase is interrupted in its progress and even inverted by the small dry season from June till July.

**Keywords :** *Bandama, watershed, MODIS, land use.*

## **I - INTRODUCTION**

L'occupation du sol peut être succinctement définie comme la couverture biophysique de la surface des terres émergées [1].

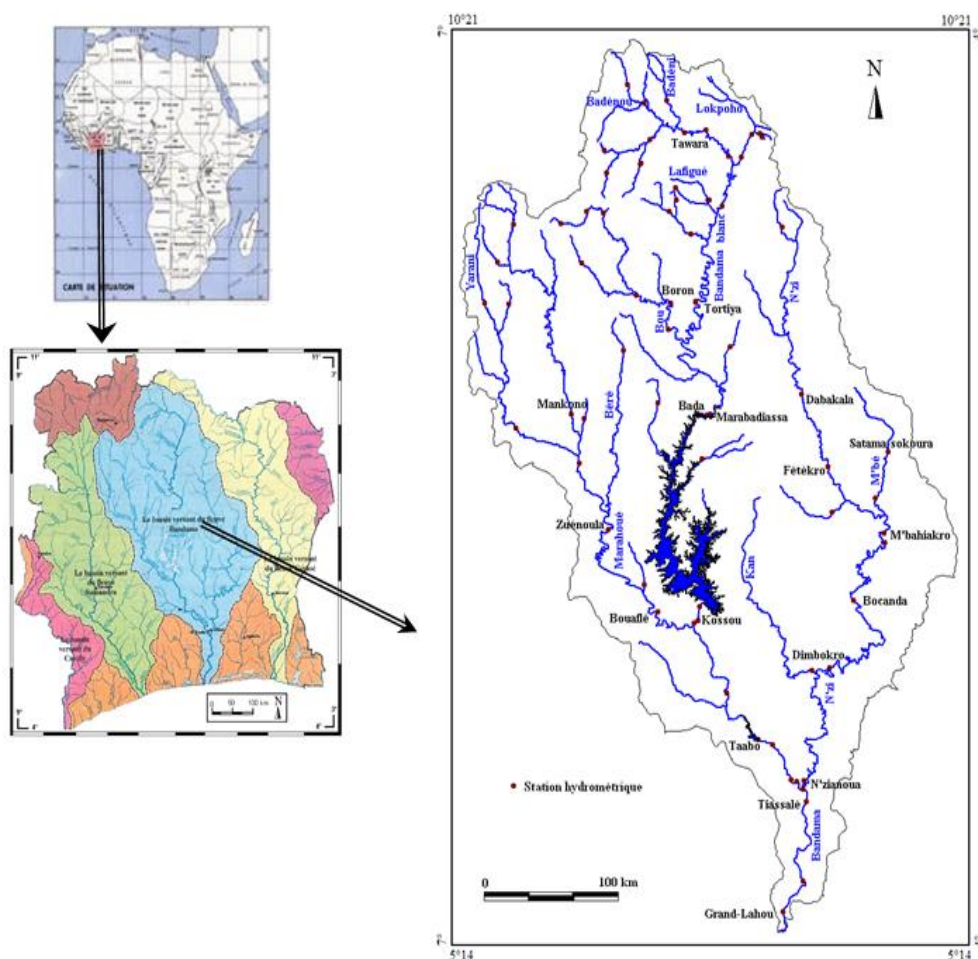
Dans le temps, elle peut représenter une stabilité qui indique le maintien d'un équilibre entre ses constituants et avec son environnement (climax ou formation climatique) ou de stade terminal d'évolution ou de stade terminal de succession. Elle peut, au contraire, subir des modifications plus ou moins profondes, brutales ou progressives. Ces modifications présentent une grande importance, car elles touchent à des problèmes économiques et sociaux, tels que l'amélioration de la production agricole et forestière, la conservation des sols, l'urbanisation. Elle peut, par ailleurs, avoir des conséquences importantes sur le comportement hydrologique d'un bassin versant. L'observation des changements de l'occupation du sol au cours du temps permet d'estimer la nature des processus naturels et anthropiques en jeu et d'évaluer l'impact de ces changements sur les ressources naturelles.

L'objectif principal de ce travail est l'étude de l'évolution de l'occupation du sol et du rythme saisonnier du couvert végétal du bassin versant du Bandama, à partir de l'imagerie satellitaire NDVI de MODIS en vue d'une simulation des écoulements des eaux du fleuve. L'étude de l'évolution de l'occupation du sol permet de comprendre la dynamique temporelle du couvert végétal. Basée sur des analyses diachroniques d'images satellitaires, l'étude permettra de quantifier la poursuite du phénomène de la déforestation avec pour corollaire l'augmentation des surfaces en forêt dégradée et en culture ou jachère. Plusieurs travaux réalisés en Côte d'Ivoire soulignent une persistante de la déforestation [2-9]. Les conséquences de l'action anthropique sur les bassins versants, soit dans un contexte rural (drainage agricole, déforestation, reboisement, etc.), soit dans un contexte urbain (urbanisation progressive) sont évidemment perceptibles. On est donc amené à se demander si les modifications de l'occupation du sol observées sur plusieurs années ont pu affecter les facteurs de l'écoulement des bassins, de sorte que leur réponse soit désormais différente.

## **II - PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE**

Le bassin versant du Bandama s'étend du Nord au Sud de la Côte d'Ivoire entre les latitudes 5°14' et 10°21' N et les longitudes 4°W et 7°W. Il a une superficie de 97 000 km<sup>2</sup> et une forme rectangulaire. Il est drainé par le fleuve Bandama et ses deux principaux affluents : la Marahoué et le N'zi. Ce fleuve, d'une longueur de 1 050 km, est le seul parmi tous les grands fleuves de la Côte d'Ivoire dont le bassin versant est entièrement en territoire ivoirien. Il prend sa source à une altitude de 480 m, entre Korhogo et Boundiali. Après une orientation E-W de son cours supérieur jusqu'à Ferkéssédougou, il prend une direction N-S.

De Ferkéssédougou à sa confluence avec le Bou, le Bandama décrit une succession de nombreux méandres. Au droit de Kossou, la vallée se resserre notablement. C'est à cet endroit qu'est construit depuis 1971 le barrage de Kossou (le plus important barrage hydroélectrique du pays). Peu après Kossou, il reçoit la Marahoué ou Bandama rouge, long de 550 km. Le Bandama prend ensuite une direction NW-SE jusqu'à sa confluence avec le N'zi, affluent long de 725 km. Il reprend ensuite une direction N-S jusqu'à son embouchure à Grand-Lahou [10, 11]. La zone d'étude est limitée par les bassins versants du Niger et de la Comoé au Nord, les bassins versants du Boubo, de l'Agnéby et l'océan atlantique au Sud, le bassin versant de la Comoé à l'Est et le bassin versant du Sassandra à l'Ouest (*Figure 1*).



**Figure 1** : Carte de présentation du bassin versant du Bandama

### III - MATÉRIEL ET MÉTHODES

#### III-1. Données

Les images MOD13A3 « Indice de végétation » ont servi à l'élaboration de ce travail. Les caractéristiques de ces images sont présentées dans le **Tableau 1**. Pour la détermination des classes d'occupation du sol, des images NDVI de MODIS (MOD13A3) multidates (Février-Décembre 2000 et Janvier-Décembre 2006) ont été utilisées. Ces images sont issues de scènes MOD13A3 h17v07 (Nord de la Côte d'Ivoire) et MOD13A3 h17v08 (Sud de la Côte d'Ivoire). Elles ont déjà subies des prétraitements, c'est-à-dire des corrections radiométriques et géométriques.

**Tableau 1 : Produit MOD13A3**

Bandes	Nom	Resolution spatiale (m)	Resolution temporelle (mois)
1	NDVI	1000	1
2	EVI	1000	1
3	Qualité de NDVI	1000	1
4	Qualité d'EVI	1000	1
5	Réflectance du rouge	1000	1
6	Réflectance de PIR	1000	1
7	Réflectance du bleu	1000	1
8	Réflectance du MIR	1000	1
9	Angle moyen de vue au zénith	1000	1
10	Angle moyen du soleil au zénith	1000	1
11	Angle moyen de l'azimut relatif	1000	1

#### III-2. Méthodes

L'observation du comportement spectral des objets sur les images NDVI de MODIS permet d'effectuer :

- une approche descriptive du bassin versant, en caractérisant et cartographiant les différents types d'occupation du sol en général et en particulier les types de végétation;
- une approche fonctionnelle du bassin versant, en apportant des éléments d'informations concernant la dynamique de la couverture végétale.

### ***III-2-1. Extraction d'informations des images MODIS : étape 1***

C'est la première étape des traitements numériques. Elle a pour but de produire des images satellitaires permettant une bonne discrimination spectrale des différents types d'occupation du sol en général, et en particulier de la couverture végétale. Il s'agit en définitive de produire des classes non dirigées d'occupation du sol. Cette approche a combiné plusieurs techniques dont le calcul des indices de végétation, l'analyse en composantes principales et les compositions colorées. Les compositions colorées ont consisté à afficher simultanément à l'écran, trois bandes d'images dans les canaux de base (Rouge/Vert/Bleu), afin de faciliter la discrimination et l'extraction des types d'occupation du sol. En effet, cette opération facilite l'interprétation des images par l'affichage d'une gamme variée de couleurs. Les connaissances pratiques de terrain et le comportement spectral des différents types d'occupation du sol sont aussi des données indispensables à une bonne interprétation. Les bandes images utilisées sont les bandes brutes multi-spectrales de MODIS et les néocanaux ACP (analyses en composantes principales). En effet, images MODIS-NDVI sont constituées de 11 bandes (5 du visible, 1 du proche infrarouge, 1 du moyen infrarouge et 4 des rapports de bandes). Cette multitude de bandes offre une large gamme de combinaisons pour une composition colorée. Aussi, une analyse en composantes principales (ACP) réalisée sur 7 bandes (visible, proche et moyen infrarouge) a-t-elle permis de maximiser l'information sur les trois premiers canaux devant servir à la composition colorée.

### ***III-2-2. Extraction d'informations des images MODIS : étape 2***

#### **III-2-2-1. Classification dirigée d'image satellitaire MODIS**

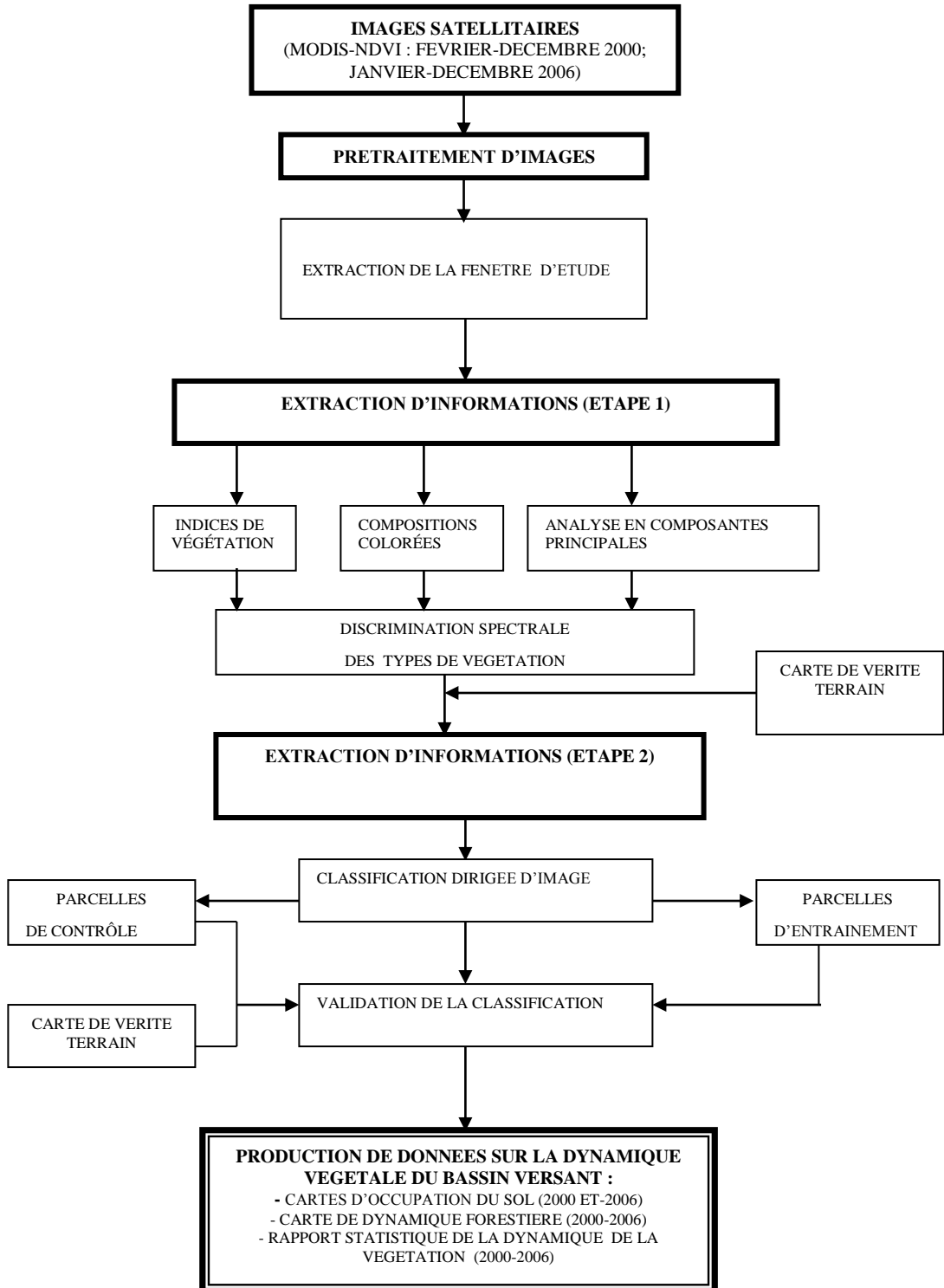
Il s'agit de l'étape de la classification dirigée d'image satellitaire pour la production de carte d'occupation du sol. Les informations sur les classes de végétations vont servir de base à la classification par maximum de vraisemblance des images satellitaire NDVI de MODIS de 2000 et de 2006. Ainsi, cinquante (50) parcelles représentant tous les types d'occupation du sol ont servi d'entraînement à ce traitement. Les signatures spectrales ont été calculées sur les canaux 1, 2, 6, 7 et 8 de l'image NDVI de MODIS. Par conséquent, pour classer un vecteur de mesure  $X$  d'un pixel inconnu dans une classe, la règle de décision du maximum de vraisemblance calcule la valeur de  $P_c(X)$  pour chaque classe puis affecte le pixel à la classe qui présente la plus grande valeur. Plusieurs essais ont été menés pour améliorer la qualité de la classification. Cette méthode classe tous les pixels, sauf si on applique un seuil de probabilité en dessous duquel les pixels n'ont pas d'affectation [12].

### III-2-2-2. Validation des traitements numériques

Le traitement numérique (classification) a été évalué par l'élaboration et l'analyse de la matrice de confusion. Ce rapport statistique réalisé sur la base des parcelles de contrôle (parcelles n'ayant pas servi d'entraînement) permet d'évaluer la capacité des images satellitaires à discriminer les différentes classes de végétations retenues. Une localisation parfaite des sites est également requise en phase de contrôle [5]. Une fois la classification validée par les différents tests de performances ci-dessus, un filtre médian 3\*3 permet de réduire l'hétérogénéité intra classes par élimination des pixels isolés. Cette méthode est reprise à l'identique pour la production des cartes d'occupation du sol du bassin versant du Bandama avec les images MODIS de 2000 et 2006 en utilisant comme réalité de terrain les données d'occupation du sol de la Côte d'Ivoire [13].

### III-2-2-3. Evaluation de la dynamique de l'occupation du sol

La combinaison des composantes spatiale et temporelle en télédétection permet une analyse quantitative et qualitative de la dynamique de la végétation. En effet, l'évaluation spatio-temporelle des différents types de végétation du bassin versant du Bandama entre 2000 et 2006 permet de déterminer le sens de leur évolution (augmentation ou réduction). Un accent particulier sera mis sur les formations forestières pour lesquelles une carte de la dynamique sera élaborée. Une synthèse des traitements de télédétection est résumée à la **Figure 2**.



**Figure 2 :** Synthèse des traitements de télédétection et cartographie de la végétation



## IV - RÉSULTATS ET DISCUSSION

### IV-1. Indices de télédétection et discrimination des types de végétation

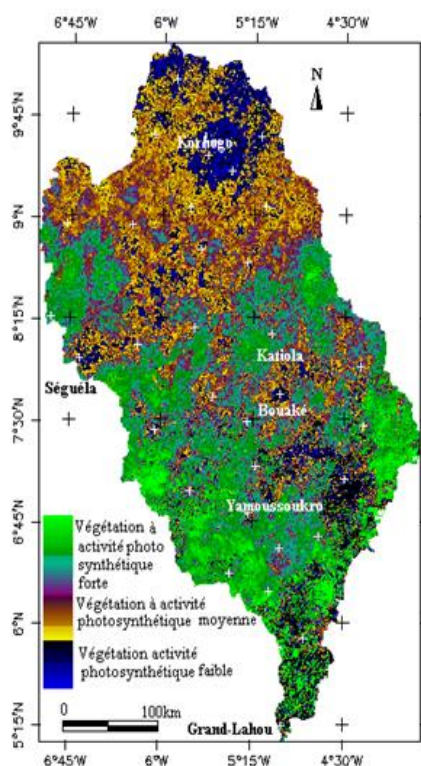
La bande NDVI (Normalized Difference Vegetation Index ou Indice de Végétation Normalisé) de l'image satellitaire MODIS a permis d'évaluer les données de la structure et de la physiologie de la couverture végétale telles que le recouvrement au sol et l'humidité. Ainsi, cette bande, affichée avec la palette fausse couleur « Beach » est représentée par la **Figure 3**. Le NDVI a permis de discriminer globalement quatre types d'occupation du sol caractérisés par différentes colorations. Celles-ci sont en rapport avec l'intensité de l'activité photosynthétique des peuplements. Ces données d'imageries satellitaires confrontées à la carte de vérité terrain indiquent que les surfaces rehaussées en vert sont les plus actives au niveau de la photosynthèse. Ces surfaces localisées au centre et au Sud du bassin versant, représentent, d'une part, les types de végétation à forte densité ligneuse comme les forêts denses humides et les cultures pérennes (caféiers et cacaoyers). Les surfaces en orange ou mosaïque orange violet dans la partie centrale du bassin versant sont moins actives que les précédentes au niveau photosynthétique. Ces zones sont couvertes de végétation avec une strate ligneuse moins dense que la première. Il s'agit des forêts denses semi-décidues ou dégradées et des cultures.

En jaune, dans la partie centrale et nord-ouest, nous avons les types de végétations caractérisées par une faible activité photosynthétique. Il s'agit des savanes présentant une faible densité ligneuse et un stade de dessèchement avancé de la strate herbacée lors de la prise de l'image. En bleu, nous avons les surfaces avec une végétation complètement desséchée par les feux ou la sécheresse. Il s'agit de savanes ayant subi l'action des feux, au Nord du bassin. On note que le NDVI qui mesure l'intensité de l'activité photosynthétique est élevé pour les types de végétation présentant une importante quantité de biomasse. Toutefois, il existe une légère confusion à l'extrême Sud, où la zone très humide voire hydromorphe du bassin versant est affichée en mosaïque vert bleu. Cette confusion est clairement dissipée sur la bande EVI (Enhanced Vegetation Index ou indice de végétation rehaussé) (**Figure 4**). En effet, en complément au NDVI, l'EVI permet de mieux discriminer les différentes formations végétales. Cet indice, confronté à la carte de vérité terrain permet de faire les observations suivantes :

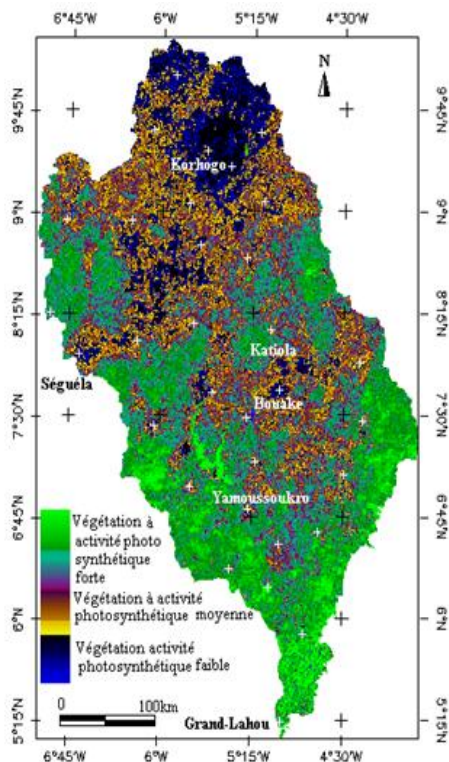
- les surfaces rehaussées en bleu sont les savanes arbustives, au Nord ;
- les savanes arborées sont affichées jaune, du centre au Nord;

- les forêts claires et surfaces de cultures pérennes sont représentées en orange ou mosaïque orange violet, au Centre;
- en vert, nous avons les surfaces végétales à forte densité ligneuse comme les forêts denses, au Sud du bassin versant.

Cet indice de végétation (EVI) donne un plus dans discrimination des différentes formations végétales. En effet, la zone très humide voire hydromorphe (Grand-Lahou) à activité photosynthétique très forte, qui a tendance à se confondre aux savanes du Nord sur l'image de l'indice NDVI a été nettement intégrée à la zone forestière sur l'image de l'indice EVI. La faible précision de l'indice de végétation dans la caractérisation des surfaces à forte intensité chlorophyllienne est due à sa saturation rapide. Le NDVI fournit de bons résultats mais a tendance à la saturation dans les types de végétation denses.



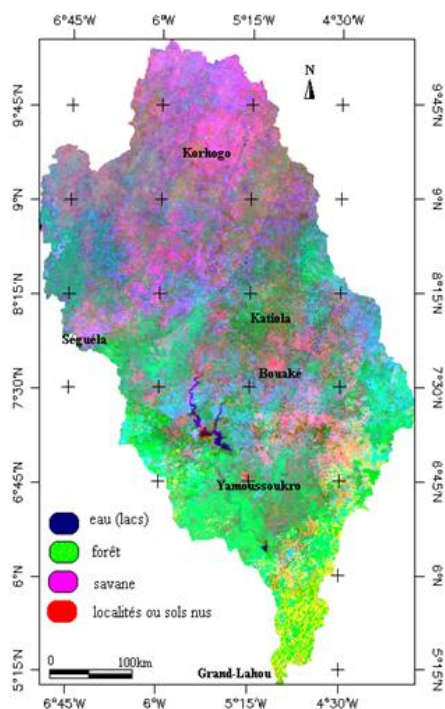
**Figure 3 :** Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) sur l'image MODIS-NDVI de Février 2006 (palette d'affichage fausses couleurs « Beach »)



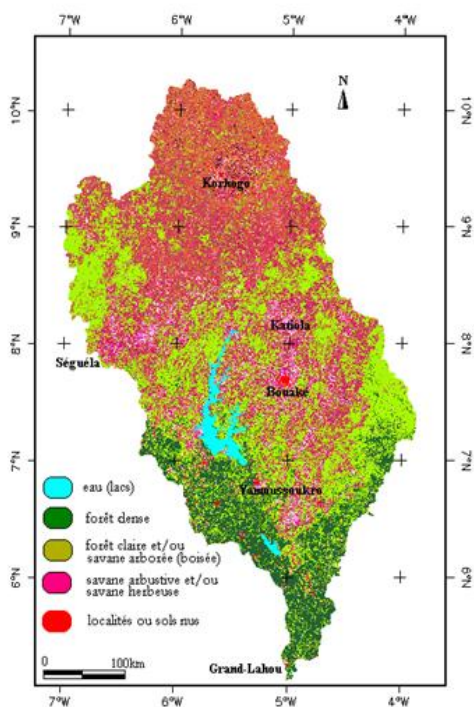
**Figure 4 :** Enhanced Vegetation Index (EVI) sur l'image MODIS-NDVI de Février 2006 (palette d'affichage fausses couleurs « Beach »)

#### IV-2. Compositions colorées, analyse en composantes principales et discrimination des types de végétation

Les compositions colorées NDVI/MIR/NIR et CP1/CP2/CP3 représentées respectivement par les **Figures 5** et **6** montrent les différents types d'occupation du sol du bassin versant du Bandama. En effet, ces compositions ont permis à travers une gamme variée de coloration de différencier et d'apprécier la répartition spatiale des différents types de végétation. Elles ont servi, appuyées par la carte de vérité terrain, à la reconnaissance et à la description des formations végétales du bassin. Ainsi, sur la composition NDVI/MIR/NIR (**Figure 5**), les forêts sont globalement caractérisées par la coloration verte, les savanes par le rose, les localités et sols nus par la couleur rouge et l'eau par le bleu. Quant à la composition CP1/CP2/CP3 (**Figure 6**), elle affiche les forêts en vert foncé ou vert citron. Les savanes sont en rose, les localités et sols nus en rouge. On note que les forêts denses en vert-clair se confondent spectralement aux savanes arbustives en vert-foncé sur la composition colorée classique NDVI/MIR/NIR (**Figure 5**). Ces deux formations sont nettement discriminées sur la composition colorée CP1/AP2/CP3 où les forêts denses ont une coloration vert-foncé et les savanes arbustives sont en vert-citron (**Figure 6**). Cette meilleure qualité discriminatoire de la composition ACP s'explique par la qualité visuelle des bandes. En effet, l'ACP a contribué à décorréler les canaux MODIS et à maximiser les informations sur les trois premières composantes qui ont servi à la composition colorée. Or, la composition colorée classique n'utilise que les informations des bandes NDVI, MIR et NIR qui présentent certaines corrélations (80 % entre les bandes NIR et MIR) ne contribuant pas à améliorer la qualité visuelle d'une composition colorée.



**Figure 5 :** *Composition Colorée NDVI/MIR/NIR sur l'image MODIS-NDVI de février 2006*



**Figure 6 :** *Composition Colorée CP1/CP2/CP3 sur l'image MODIS-NDVI de février 2006*

### IV-3. Classifications d'images

Les *Tableaux 2 et 3* indiquent que les précisions globales des classifications sont de 88,176 et 82,075 % respectivement pour les images de 2000 et 2006. Ces tableaux affichent dans la diagonale le pourcentage de pixels bien classés et hors diagonale le pourcentage de pixels mal classés. Une analyse plus fine de ces données montre que la classe 1 (forêt dense) présente de fortes confusions avec la classe 2 (forêt claire et/ou savane arborée). En effet, 10,46 à 12,16 % des pixels forêt dense se retrouvent classés dans les forêts claires, d'où le faible pourcentage de pixels de forêts denses bien classés (87,84 à 89,54 %). Les classes de savane arbustive présentent également de faibles pourcentages de pixels bien classés (78,33 à 87,05 %) compte tenu de leur confusion avec les classes de forêt claire.

Les autres types d'occupation du sol ont en général des taux de pixels bien classés (93 à 100 %), donc bien discriminés. Les couples de végétation qui présentent les plus importantes différences dans leur structure telles que la forêt dense et la savane arbustive sont ceux qui sont les mieux discriminés, c'est-à-dire ont les plus faibles pourcentages de pixels mal classés (0 %). Les savanes arborées et savanes arbustives présentant de faibles différences dans leur structure ont un fort pourcentage de pixels mal classés (18,88 %), c'est-à-dire qu'ils sont moins bien discriminés. En d'autres termes, dans les formations forestières, les peuplements les mieux discriminés par l'image satellitaire sont ceux qui affichent des différences importantes dans leur structure ligneuse.

**Tableau 2 :** Matrice de confusion de la classification de l'image MODIS-NDVI de 2000

Classes	Forêt dense	Forêt claire et/ou savane arborée	Savane arbustive	Sols nus ou localités	Eau
Forêt dense	<b>89,54</b>	7,00	0,00	0,00	0,00
Forêt claire et/ou savane arborée	10,46	<b>90,90</b>	12,00	1,00	0,00
Savane arbustive	0,00	2,10	<b>87,05</b>	6,00	0,00
Sols nus ou localités	0,00	0,00	0,95	<b>93,00</b>	0,00
Eau	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

*Précision globale = 88,176 %*

**Tableau 3 :** Matrice de confusion de la classification de l'image MODIS-NDVI de 2006

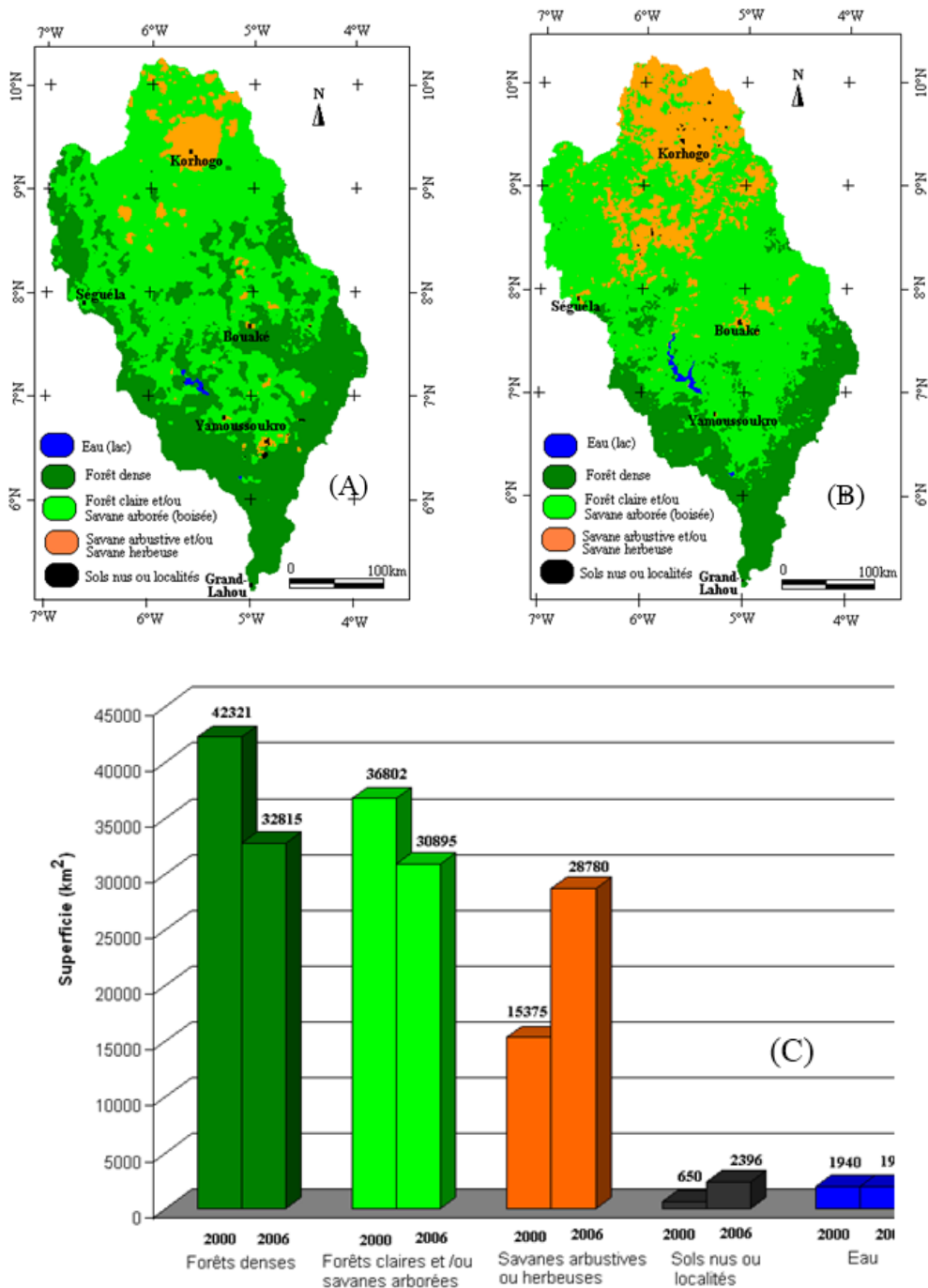
Classes	Forêt dense	Forêt claire et/ou savane arborée	Savane arbustive	Sols nus ou localités	Eau
Forêt dense	<b>87,84</b>	0,00	0,00	0,00	0,00
Forêt claire et/ou savane arborée	12,16	<b>83,72</b>	18,88	1,89	0,00
Savane arbustive	0,00	16,28	<b>78,33</b>	5,21	0,00
Sols nus ou localités	0,00	0,00	2,30	<b>92,91</b>	0,00
Eau	0,00	0,00	0,49	0,00	<b>100,00</b>
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

*Précision globale = 82,075 %*

#### IV-4. Dynamique de la couverture végétale du bassin (2000-2006)

Les cartes de végétation issue de la classification des images NDVI de MODIS de 2000 et 2006 sont représentées par la *Figure 7-A et 7-B*. Ces cartes affichent cinq (5) types d'occupation du sol que sont : (1) les forêts denses, (2) les forêts claires et/ou savanes arborées, (3) les savanes arbustives, (4) les sols nus et localités, et (5) l'eau. La *Figure 7-C* montre la dynamique végétale du bassin versant du Bandama de 2000 à 2006. L'évolution temporelle de l'occupation du sol du bassin versant du Bandama est représentée sous forme graphique (*Figure 7-C*) permettant le regroupement des classes thématiques. Ce regroupement facilite ainsi l'analyse de l'évolution globale de l'occupation du sol en fonction du temps. Le graphe de la *Figure 7-C* résume l'évolution des surfaces occupées par les différents types d'occupation du sol du bassin versant du Bandama de 2000 à 2006. Cette *Figure* démontre qu'en 2000, les forêts denses occupaient 43,63 % du bassin versant du Bandama, soit 42 321 km<sup>2</sup>.

Les forêts claires et/ou savanes arborées (boisées) occupaient quant à elles un espace moindre : 37,94 % soit 36 802 km<sup>2</sup>. Ces deux classes sont en légère diminution. En effet, en 2006 les forêts denses passent à 33,83 % soit 32815 km<sup>2</sup> tandis que les forêts claires sont ramenées à 31,85 % soit 30 895 km<sup>2</sup>. Pour leur part, les savanes arbustives recouvraient 15,85 % (15375 km<sup>2</sup>) et les sols nus (espaces culturales), 0,67 % (650 km<sup>2</sup>) du bassin en 2000. Ces deux dernières classes ont quant à elles subi nette augmentation. En effet, elles sont passées respectivement à 29,67 % (28780 km<sup>2</sup>) et 2,47 % (2396 km<sup>2</sup>) en 2006. Les surfaces utilisées pour l'exploitation abusive du bois, l'agriculture intensive et l'élevage ont graduellement empiété sur le milieu forestier (forêts denses et forêts claires) de 2000 à 2006 au profit des savanes et des sols nus, zones de cultures ou localités. La cinquième classe (eau) ne présente pas de fluctuation remarquable et son évolution reste relativement constante au cours du temps. Finalement, l'observation de la *Figure 7* montre que le milieu forestier évolue en opposition au milieu savanicole et aux sols nus.

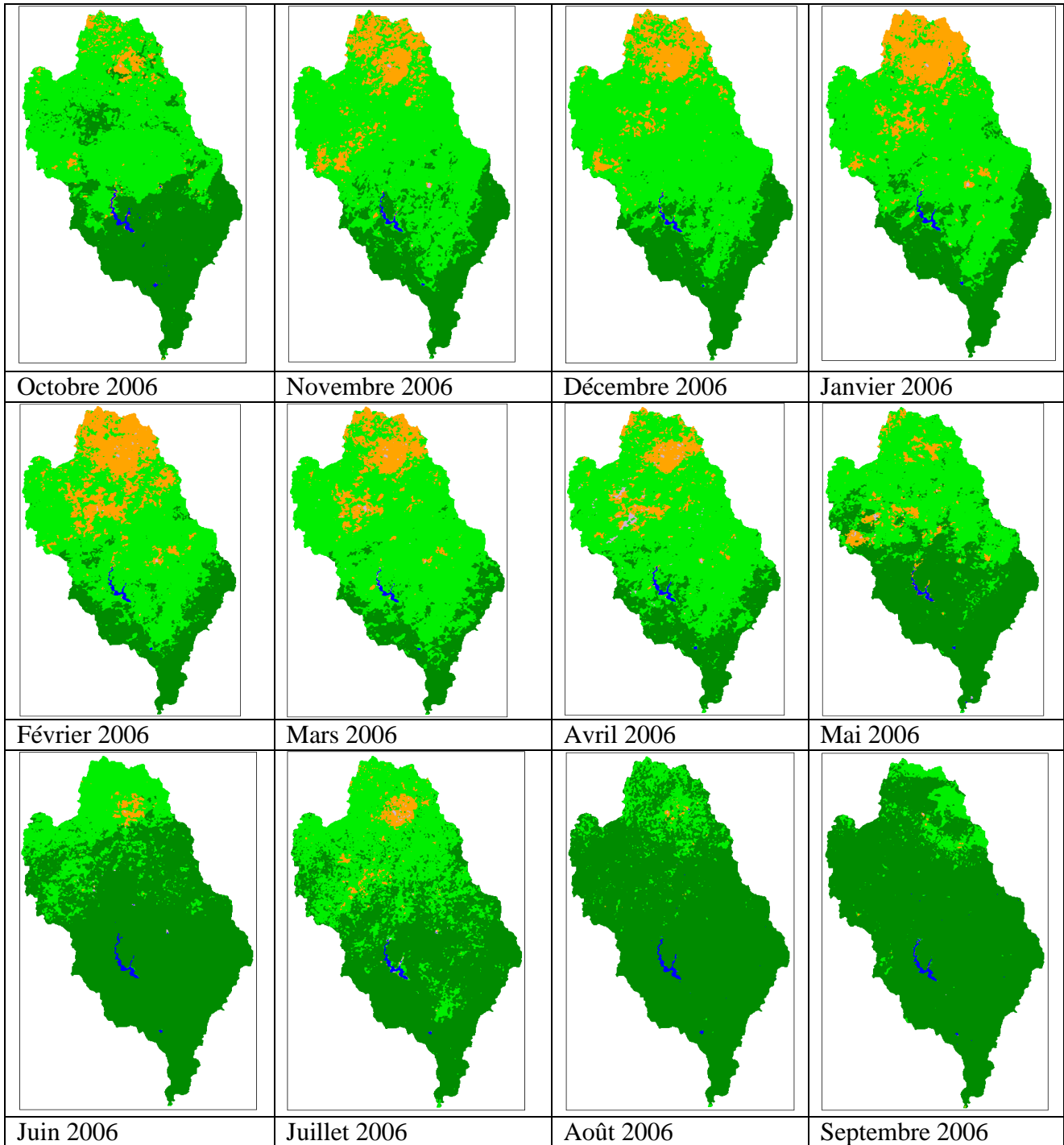


**Figure 7 :** Dynamique de l'occupation du sol du bassin versant du Bandama de 2000 à 2006

#### IV-5. Rythme saisonnier de la végétation du bassin au cours de l'année 2006

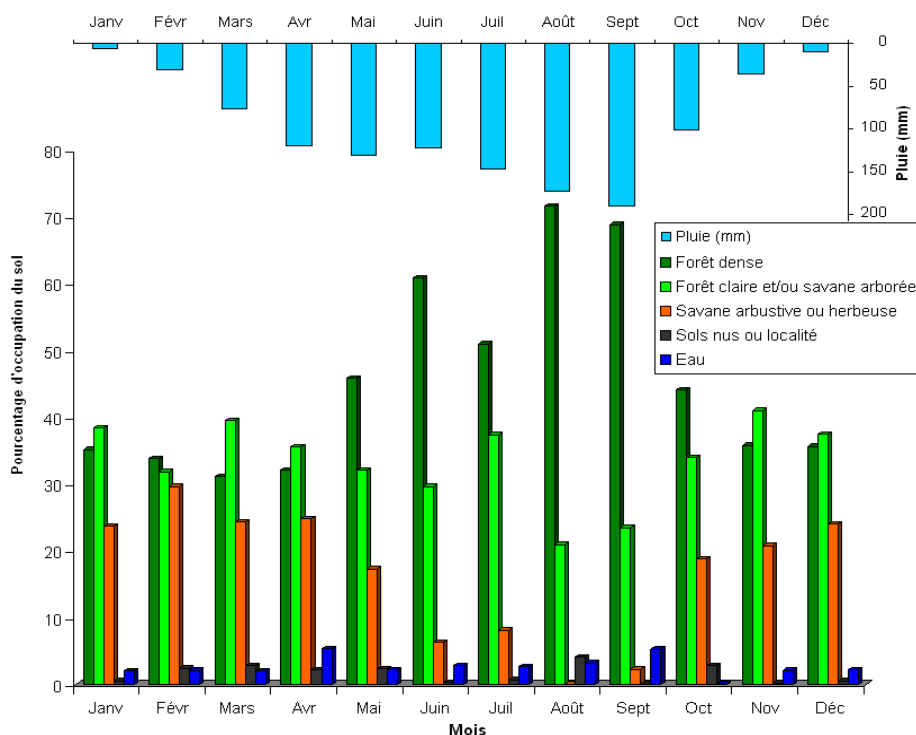
La dynamique du couvert végétal du bassin versant du Bandama de janvier à décembre 2006 est représentée par la *Figure 8*. Une observation attentive de cette *Figure* permet de remarquer le rythme saisonnier de la végétation au cours de l'année. D'octobre à mars, c'est la grande saison sèche où il est possible de séparer les deux grandes zones à potentialités écologiques différentes : région des savanes et région de la forêt dense humide. La première région est caractérisée par un faible indice de végétation correspondant à un dessèchement des herbacées et à une température de surface élevée, alors que la seconde montre un indice plus élevé dû à la présence du feuillage des arbres et à une température plus faible due à la protection du couvert végétal. Le NDVI peut donc aider, en saison sèche, à mettre en évidence des différences de recouvrement arboré. Pour la zone soudanaise, la savane arbustive (orange) présente un indice de végétation faible par rapport à la savane arborée (vert clair). Il est donc facile de séparer le comportement de ces deux types de végétation. Pour la zone guinéenne, il est possible de séparer le comportement de la savane arborée de celui de la forêt dense (vert pur) qui a un indice de végétation plus élevé. En saison sèche, l'indice de végétation est élevé à partir du moment de la feuillaison des arbres décidus. Toutefois, il est impossible de séparer le comportement des cultures et de la formation végétale au sein de chaque zone. Les cultures tropicales en zone guinéenne telles que le café, le cacao, l'hévéa, le palmier à huile etc. ont les mêmes cycles d'activité chlorophyllienne que la forêt dense et leurs réponses photosynthétiques sont très voisines. Il en est de même pour le coton, le maïs, le riz etc. et la savane arbustive en zone soudanaise dont les indices de végétation prennent à peu près les mêmes valeurs tout au long d'un cycle végétatif complet. De mars à juin, c'est la 1<sup>ère</sup> saison des pluies ; il devient impossible de séparer le comportement des savanes arborées et de la forêt dense dans la partie préforestière du bassin (zone de contact forêt/savane). Les indices de végétation viennent à saturation ; il n'existe progressivement plus de différence entre l'activité photosynthétique et la structure ligneuse. C'est ce qui explique le passage de cette partie de savane arborée dans la même réflectance que la forêt dense dans la zone guinéenne. Ce même phénomène se répète dans la zone soudanaise du bassin où une partie de la savane arbustive se retrouve dans la même réflectance que la savane arborée. De juin à juillet, c'est la petite saison sèche ; la séparation du comportement de la savane arborée de celui de la forêt dense redémarre sans toutefois aller à son terme ; elle est interrompue par la reprise des pluies. De juillet à septembre, c'est la grande saison des pluies ; la saturation des indices de végétation entamée au cours de la 1<sup>ère</sup> saison des pluies devient totale. Il est quasiment impossible de séparer les savanes et la forêt dense sur tout le bassin. Les indices de ces différents types de végétation sont sensiblement identiques et la quasi-totalité du bassin apparaît dans la réflectance de la forêt dense.





**Figure 8 :** Rythme saisonnier de la végétation du bassin versant du Bandama au cours de l'année 2006

Le cycle végétatif mis en relation avec la pluviométrie moyenne mensuelle du bassin est représenté par la **Figure 9**.



**Figure 9 :** Relation entre le rythme saisonnier de la végétation et la pluviométrie moyenne mensuelle dans le bassin versant du Bandama

Au cours de la grande saison sèche, d'octobre à mars, la diminution progressive de la biomasse entraîne une régression des surfaces à forte activité photosynthétique jusqu'à la limite du « V Baoulé ». En conséquence, les surfaces à faible indice de végétation augmentent. Pendant la 1<sup>ère</sup> saison des pluies, de mars à juin, c'est le phénomène contraire. Les surfaces à forte activité photosynthétique augmentent au détriment de celles à faible indice de végétation. Cette tendance à l'augmentation est interrompue dans sa progression et même inversée par la petite saison sèche de juin à juillet. De Juillet à septembre, c'est la 2<sup>ème</sup> saison des pluies. La biomasse reprend son augmentation et atteint son maximum. La quasi-totalité du bassin versant est soumise à une forte activité photosynthétique. L'interprétation des cartes du rythme saisonnier de la végétation du bassin versant du Bandama nous suggère que le NDVI n'est pas, dans le cas de la zone soudano-guinéenne, le meilleur outil de différenciation des divers types de couvert végétal.

En effet, à la résolution du kilomètre, l'indice de végétation (NDVI) est insuffisant, seul, pour caractériser les paysages complexes des zones soudanaise et guinéenne. Un indice des sols ou un indice de brillance serait probablement plus approprié [14,15]. Selon ces auteurs, la température de surface est un complément très utile au NDVI : ce paramètre permet, d'une part, de mieux différencier les types de végétation et apporte, d'autre part, une information supplémentaire sur l'état du couvert. La qualité des images enregistrées par le capteur MODIS est fortement limitée par les perturbations atmosphériques présentes dans la région : vent d'Harmattan ou nuages de la mousson. Cependant, la séparation entre les deux zones à potentialités écologiques différentes que sont la zone forestière (forêt dense humide) et la zone de savanes (forêt claire ou sèche) est possible en milieu de saison sèche.

## **V - CONCLUSION**

L'approche méthodologique adoptée montre que les indices calculés mettent en évidence différents aspects de la physiologie et de la biologie de la végétation. Il s'agit des indices NDVI et EVI qui ont permis de discriminer les types de végétation par rapport à leur activité photosynthétique, leur stress hydrique pendant la saison sèche et leur recouvrement au sol. Ces indices ont permis de caractériser les grands ensembles de végétation que sont les forêts, les savanes et les sols nus ou zones de cultures. Quant aux compositions colorées (NDVI/MIR/NIR et ACP1/ACP2/ACP3), elles ont permis, de caractériser avec un peu plus de précision les différents types d'occupation du sol. Ces traitements numériques d'images NDVI de MODIS associés aux observations de terrain ont permis de cartographier la couverture végétale du bassin avec discrimination des forêts denses, des forêts claires, des savanes arborées ou boisées, des savanes arbustives ou herbeuses peu denses, des sols nus et/ou zones de cultures. La capacité de discrimination des différents types de végétation par les images NDVI de MODIS est fortement corrélée à la structure aérienne des ligneux dans les formations forestières. Dans les formations savanicoles, la faible densité de la strate ligneuse ne permet pas d'expliquer la réflectance de la végétation. La dynamique de la couverture végétale élaborée à partir des cartes de végétation de 2000 et 2006 indique que les surfaces savanicoles ont subi la plus importante hausse estimée à 13405,4 km<sup>2</sup> (13,82 %). Quant aux surfaces forestières, elles ont subi une très grande régression de : 9506 km<sup>2</sup> (9,8 %) pour les forêts denses et 5907,3 km<sup>2</sup> (6,09 %) pour les forêts claires. Les sols nus ont subi une légère croissance chiffrée à 1746 km<sup>2</sup> (1,8 %). Enfin l'eau est restée quasiment constante au cours de cette période.

Le cycle végétatif mis en relation avec la pluviométrie moyenne mensuelle du bassin montre qu'au cours de la grande saison sèche, d'octobre à mars, la diminution progressive de la biomasse entraîne une régression des surfaces à forte activité photosynthétique jusqu'à la limite du « V Baoulé ». En conséquence, les surfaces à faible indice de végétation augmentent. Pendant la 1<sup>ère</sup> saison des pluies, de mars à juin, c'est le phénomène contraire. Les surfaces à forte activité photosynthétique augmentent au détriment de celles à faible indice de végétation. Cette tendance à l'augmentation est interrompue dans sa progression et même inversée par la petite saison sèche de juin à juillet.

### REMERCIEMENTS

*L'acquisition des images satellitaires utilisées dans cette étude a été possible grâce à la collaboration de personnes étrangères via internet. Merci donc à Mr Brett de la NASA pour sa disponibilité et ses conseils avisés depuis le téléchargement des images MODIS-NDVI jusqu'à leur traitement final. Merci également à Dr OUATTARA Adama du CURAT pour la programmation des algorithmes nécessaires à l'exploitation des images MODIS.*

### RÉFÉRENCES

- [1] - FAO, Les conséquences de l'accord sur l'agriculture du cycle d'Uruguay pour les pays en développement (1998).
- [2] - K. E. N'GUESSAN, Etude de l'évolution de la végétation du « V Baoulé » contact forêt/savane en Côte d'Ivoire. In LAFRANCE, P. DUBOIS, J.M. Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse. Editions AUPELF et John Libbey Eurotext, Paris, (1990) 181-186.
- [3] - 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.
- [4] - A. KANGAH, Utilisation de la télédétection et d'un système d'information géographique (SIG) pour l'étude des pressions anthropiques sur les paysages géomorphologiques des savanes subsahariennes : exemple du degré carré de Katiola (centre-Nord ivoirien), Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, (2006) 186p.
- [5] - D. H. N'DA, Étude et suivi par télédétection et système d'information géographique d'une aire protégée soumise aux pressions anthropiques : cas du parc national de la Marahoué, Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, (2007) 139p.

- [6] - 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 Unique, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, (2007) 210p.
- [7] - G. E. AKE, Impact de la variabilité climatique et des pressions anthropiques sur les ressources hydriques de la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire), Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, (2010) 200p.
- [8] - Z. A. KOUADIO, Dynamique de l'occupation du sol et comportement hydrologique : cas des bassins versants côtiers de l'Agneby et du Boubo (Côte d'Ivoire), Thèse Unique de Doctorat, Université d'Abobo-Adjamé (Côte d'Ivoire), (2011) 188p.
- [9] - K. F. KOUAME, Influences de la variabilité climatique et de la dégradation environnementale sur le fonctionnement de l'hydrosystème du N'zo dans la région guinéenne humide et semi-montagnaise de la Côte d'Ivoire. Contribution de la télédétection, des Systèmes d'Informations Géographiques et du modèle hydrologique HYDROTEL, Thèse d'Etat ès sciences naturelles, Université de Cocody, (2011) 379p.
- [10] - H. CAMUS, Hydrologie du Bandama, Tome 1, « Le Bandama Blanc », (1972a) 89p.
- [11] - H. CAMUS, Hydrologie du Bandama, Tome 2, « La Marahoué », (1972b) 81 p.
- [12] - E. TONYE, A. AKONO et N. A. NDI, Le traitement par exemple des images de télédétection, Université de Yaoundé 1, Ecole National Polytechnique de Yaoundé, Laboratoire d'électronique et de traitement du signal, (1999) 250p.
- [13] - Y. T. BROU, 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 Techniques de Lille, France, (2005) 212p.
- [14] - F. ACHARD et F. BLASCO, Rythmes saisonniers de la végétation en Afrique de l'Ouest par télédétection spatiale. Télédétection et sécheresse. Editions AUPELF et John Libbey Eurotext, Paris, (1990) 1-14.
- [15] - M. G. ADJA, Étude de l'état hydrique saisonnier du bassin versant de la Bagoé dans un contexte de variabilité climatique, Départements de Boundiali et Tengréla (milieux soudano-sahéliens au Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire), Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody, Côte d'Ivoire, (2009) 184p