Télédétection, 2006, vol. 5, n°4, p. 307-323
© 2006 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions Scientifiques GB*

PRESSION ANTHROPIQUE SUR UNE RÉSERVE FORESTIÈRE EN CÔTE D'IVOIRE : APPORT DE LA TÉLÉDÉTECTION

Édouard N'GUESSAN[1], Hyppolite DIBI N'DA[2], Marie-France BELLAN[3]*, François BLASCO[4]

[1]*Département de Botanique et Biologie Végétale, Faculté des Sciences et Techniques, Université Nationale d'Abidjan, 22 B.P. 582, Abidjan, Côte d'Ivoire.*
Téléphone : 225 22 44 98 60 ; télécopie : 225 44 03 07,
courriel : k_nguessan@yahoo.fr

[2]*Département de Botanique et Biologie Végétale, Faculté des Sciences et Techniques, Université Nationale d'Abidjan, 22 B.P. 582, Abidjan, Côte d'Ivoire.*
Téléphone : 225 22 44 98 60 ; télécopie : 225 44 03 07,
courriel : hyppolited@yahoo.fr

[3]*Laboratoire « Dynamique de la Biodiversité », CNRS/Université Toulouse III, B.P. 4349, 31055 Toulouse cedex 4, France.*
Téléphone : 33 (0)5 61 55 85 45 ; télécopie : 33 (0)5 61 55 88 62 ;
courriel : Marie-France.Bellan@cict.fr

[4]*Laboratoire « Dynamique de la Biodiversité », CNRS/Université Toulouse III, B.P. 4349, 31055 Toulouse cedex 4, France.*
Téléphone : 33 (0)5 61 55 85 42 ; télécopie : 33 (0)5 61 55 88 62 ;
Courriel : francois.blasco2@wanadoo.fr

Soumis le 25 juillet 2005 ; révisé le 21 décembre 2005 ; accepté le 4 mai 2006

La régression accélérée des forêts denses humides de Côte d'Ivoire a été signalée par de nombreux auteurs, y compris dans la zone soudanienne. Les outils spatiaux confirment de fortes pressions anthropiques, même dans les aires protégées. Dans cette étude, nous avons utilisé des données spatiales (TM et ETM + de LANDSAT) de 1986 et 2000, pour tenter d'abord de discriminer et de cartographier l'évolution des formations végétales, puis d'évaluer les pressions anthropiques sur la forêt classée de Badenou, en zone soudanienne. Les données satellitales ont subi un traitement numérique complété par plusieurs missions de contrôle sur le terrain. L'interprétation visuelle des compositions colorées ETM + et TM 4-7-3 et de la classification non dirigée des canaux CP1, CP2 et NDVI a permis de sélectionner 70 sites tests, qui ont été ensuite observés et étudiés sur le terrain pour réaliser une classification dirigée. Ainsi, deux cartes de la végétation de la forêt classée de Badenou pour 1986 et 2000 ont été élaborées. Elles permettent de mettre en évidence l'évolution de la végétation de la réserve forestière et de sa périphérie au cours de ces 14 années. Curieusement, en dehors des zones très urbanisées, la végétation ligneuse apparaît de plus en plus dense et de mieux en mieux protégée.

Mots clés : Côte d'Ivoire ; Badenou ; LANDSAT ; Activités agricoles ; Zone soudanienne

HUMAN IMPACT ASSESSMENT ON A FOREST RESERVE IN THE IVORY COAST USING REMOTE SENSING

The rapid depletion of Ivory Coast humid dense forests was pointed out by many authors. For some decades, it has also concerned the Sudanian zone, on the northern part of the country. This area, covered with mixed forest and herbaceous vegetation, has been disturbed for opening new cultivated lands and extending pastures. In these vegetation types, this phenomenon is increased because when crops are abandoned, they are burnt. Spaceborne sensors confirm important anthropic pressures even in protected areas (National Parks and Forest Reserves), created by the Forest Department to prevent desertification and for biodiversity conservation. However, there is a lack of accurate data on the reduction or extension of the various vegetation types. Therefore, very few studies were carried out in the Ivory Coast on vegetation changes using high resolution satellite imagery. Following preliminary studies on the

Badenou Forest Reserve, in the Sudanian Zone, we wanted to assess the real changes in a theoretically protected area over a 15-year period. In the present study, we used satellite data (LANDSAT-TM and ETM +) from 1986 and 2000 first for recognizing and mapping vegetation types and their evolution and, then also for estimating human impacts on the Badenou Forest Reserve. Methodologically, satellite data, after resampling, were digitally processed with validation through four field trips between 1986 and 2002. A forest map (produced by SODEFOR based on aerial photographs and field inventories between 1979 and 1988) was also used for validating the 1986 image processing. ETM + and TM 4-7-3 colour composites were analysed, as well as an unsupervised classification of channels PC1, PC2 and NDVI. This analysis allowed to select 70 test-sites representative of the various vegetation types and land uses. These test-sites were then inventoried in the field to improve the visual interpretation results and to carry out a supervised classification through a maximum likelihood algorithm. This work emphasizes the difficulty in discriminating between mixed vegetation types from space, the disturbance due to fires in vegetation mapping and, the importance and difficulties in the choice of image dates. However, two vegetation maps of the Badenou Forest Reserve were produced for 1986 and 2000. These show the changes having occurred in the Forest Reserve and its surroundings during these 14 years. Surprisingly, during this period and except on densely populated areas, the forest seems to be increasingly denser as well as better protected.

Keywords : Ivory Coast ; Badenou Forest Reserve ; LANDSAT ; Agriculture ; Sudanian zone

1. INTRODUCTION

Les écosystèmes forestiers africains en général, et ceux de la Côte d'Ivoire en particulier, subissent des dégradations d'origines diverses (climatique ou anthropique), l'action anthropique étant de loin la plus importante. En effet, dans un pays comme la Côte d'Ivoire où l'économie repose essentiellement sur l'agriculture, l'exploitation forestière anarchique et la forte croissance démographique ont eu pour conséquence la plus visible, en maints endroits, une dégradation parfois spectaculaire du couvert forestier. Ce phénomène de déforestation a été signalé depuis longtemps par plusieurs auteurs, dont Lanly (1969), sodefor (1976), Arnaud et Sournia (1980), Bertrand (1983), Mecv (1991), MINEF (1998) et la FAO (2000). Cette régression concerne aussi bien les forêts denses humides que les formations mixtes forestières et graminéennes de la zone soudanienne du nord du pays, constituées de forêts claires sèches, forêts galeries et savanes. Pour ces dernières, ce phénomène de dégradation est accentué par le fait que même lorsque les cultures sont abandonnées, elles sont régulièrement parcourues par les feux. Aujourd'hui, les savanes occupent le tiers de la superficie de la Côte d'Ivoire (environ 100 000 km2 sur 320 000 km2). Ce sont les savanes soudaniennes au nord et les savanes guinéennes au centre. Celles-ci ont fait l'objet de nombreuses études biogéographiques (Adjanohoun, 1963 ; Adjanohoun et Aké, 1967 ; César, 1971 ; Fournier, 1983 ; Poilécot, 1987). La plupart de ces travaux ont contribué à la connaissance de la structure, de la dynamique et de la flore des savanes soudaniennes.

Pour les botanistes, ces savanes sont très hétérogènes et présentent plusieurs types physionomiques et floristiques sur de petites surfaces. Elles subissent des dégradations du fait des actions anthropiques telles que les feux de brousse, l'agriculture itinérante, l'extraction du bois de chauffe et l'utilisation des ligneux à des fins diverses (pharmacopée, alimentation, construction d'habitat traditionnel, artisanat).

Pour remédier à cette situation, plusieurs types d'aires protégées ont été délimités et classés dès le début 1950 (Forêts classées, Parcs nationaux et Réserves botaniques) dans cette zone soudanienne. Malheureusement, ces aires protégées qui constituent le Domaine Permanent de l'État et l'essentiel des surfaces de ces formations mixtes forestières et graminéennes n'échappent pas, elles non plus, aux pressions d'origines diverses qui menacent dangereusement leur conservation. On constate ainsi que les limites de la majorité de ces forêts classées, tracées depuis plusieurs années grâce à des couvertures aériennes, ne correspondent plus aujourd'hui à ce qu'elles étaient il y a 10, 30 ou 50 ans.

Il est aujourd'hui tenu pour certain que la plupart de ces forêts sont menacées de disparition car leur surface diminue régulièrement de façon accélérée. Cependant les données précises sur la réduction des surfaces et sur l'appauvrissement de la flore font encore défaut. C'est pourquoi nous nous proposons, dans cette étude, d'analyser ce phénomène de dégradation du couvert forestier dans la forêt classée de Badenou et dans sa périphérie, au nord-ouest de la Côte d'Ivoire, à partir de deux images LANDSAT acquises à 14 ans d'intervalle (1986 et 2000).

2. TRAVAUX ANTÉRIEURS

Ailleurs dans le monde tropical, plusieurs recherches ont montré toute l'importance des produits spatiaux pour mesurer les changements du couvert forestier. Parmi ces nombreuses études, nous pouvons signaler celles de Singh (1989), Cristh et Kauth (1996), Collins et Woodcock (1996), (1998), Sader (1995), Sader et Winne (1992), Sader *et al.*, (2001), Phulpin *et al.*, (2002) et Tole (2002). En Afrique de l'Ouest, Achard (1989), Achard et Blasco (1990), Lupo *et*

al., (2001) ont étudié la capacité des capteurs à faible résolution géométrique (NOAA-AVHRR, SPOT-VEGETATION) pour le suivi de la végétation. Mais même en utilisant des méthodes sophistiquées (Foody *et al.*, 1997) pour décomposer l'information de chaque pixel, ces capteurs ne permettent pas une cartographie précise des formations végétales. C'est pourquoi, lorsqu'on a voulu vérifier l'efficacité de la zone protégée du Parc national de Taï en Côte d'Ivoire, on a utilisé des images MSS et TM de LANDSAT (Chatelain *et al.*, 1996). Toujours en Afrique de l'Ouest (Nigéria et Guinée), Gilruth *et al.* (1990), Salami *et al.* (1999) et Couteron *et al.* (2001) ont étudié la déforestation à partir d'images à haute résolution. En Côte d'Ivoire, N'Guessan et Condé (1989), N'Guessan (1990), N'Guessan (2004) ont travaillé sur la région du « V baoulé », la forêt de Khorogo et la forêt du Haut Sassandra d'après des images TM de LANDSAT et HRV de SPOT. Les résultats encourageants nous ont conduits à étendre ces études à d'autres forêts classées de Côte d'Ivoire, où manque une vision synthétique de l'évolution du couvert forestier depuis 15 à 20 ans.

Parmi les études déjà réalisées sur la surveillance des forêts par télédétection, diverses méthodes ont été utilisées, de l'analyse visuelle des compositions colorées (Sader and Winne, 1992) aux études de texture en Amazonie (Imberson and Branthomme, 2001). D'autres tentent de comparer les radiométries de telle ou telle formation végétale sur des images de dates différentes. Cela suppose la conversion des comptes numériques en réflectances et des corrections atmosphériques, mais les données manquent souvent pour ces calculs. Certains auteurs préfèrent utiliser des cibles invariantes ; encore faut-il que de telles cibles existent sur les images (Collins and Woodcock, 1996). Coppin *et al.* (2004) font une intéressante revue critique d'où il ressort qu'aucune méthode d'analyse standard extrapolable à toutes les régions tropicales n'existe encore. Mais pratiquement rien n'a été réalisé en Côte d'Ivoire, à l'exception des deux exemples cités plus haut. Notre bonne connaissance de la forêt de Badenou (N'Guessan, 2004) en faisait un terrain d'étude favorable. Des images TM et ETM+ de LANDSAT étaient disponibles gratuitement sur Internet et pouvaient permettre le suivi de l'évolution de cette forêt classée en zone soudanienne.

ll s'agit ici de caractériser puis de cartographier les différents types de végétation à l'aide de deux images TM (1986) et ETM + (2000) de LANDSAT, puis d'en déduire les changements survenus durant cette période. Notons qu'en Côte d'Ivoire, la situation rend les études de terrain extrêmement difficiles, ce qui stimule l'utilisation des produits spatiaux.

3. CADRE DE L'ÉTUDE

La forêt classée de Badenou est située au nord-ouest de la Côte d'Ivoire, entre les longitudes 5 °26' et 5 °59' ouest et les latitudes 9 °36' et 10 °01' nord comme l'indique la figure 1. Elle est localisée plus précisément à 40 km de Korhogo sur l'axe Korhogo-M'bengue. La forêt classée de Badenou a été délimitée et érigée en massif forestier classé du Domaine Permanent de l'État sur une superficie de 31 080 hectares par décret n° 3499 SE / F du 29 janvier 1937. Cette forêt tire son nom de la rivière Badenou qui draine sa partie nord (figure 1).

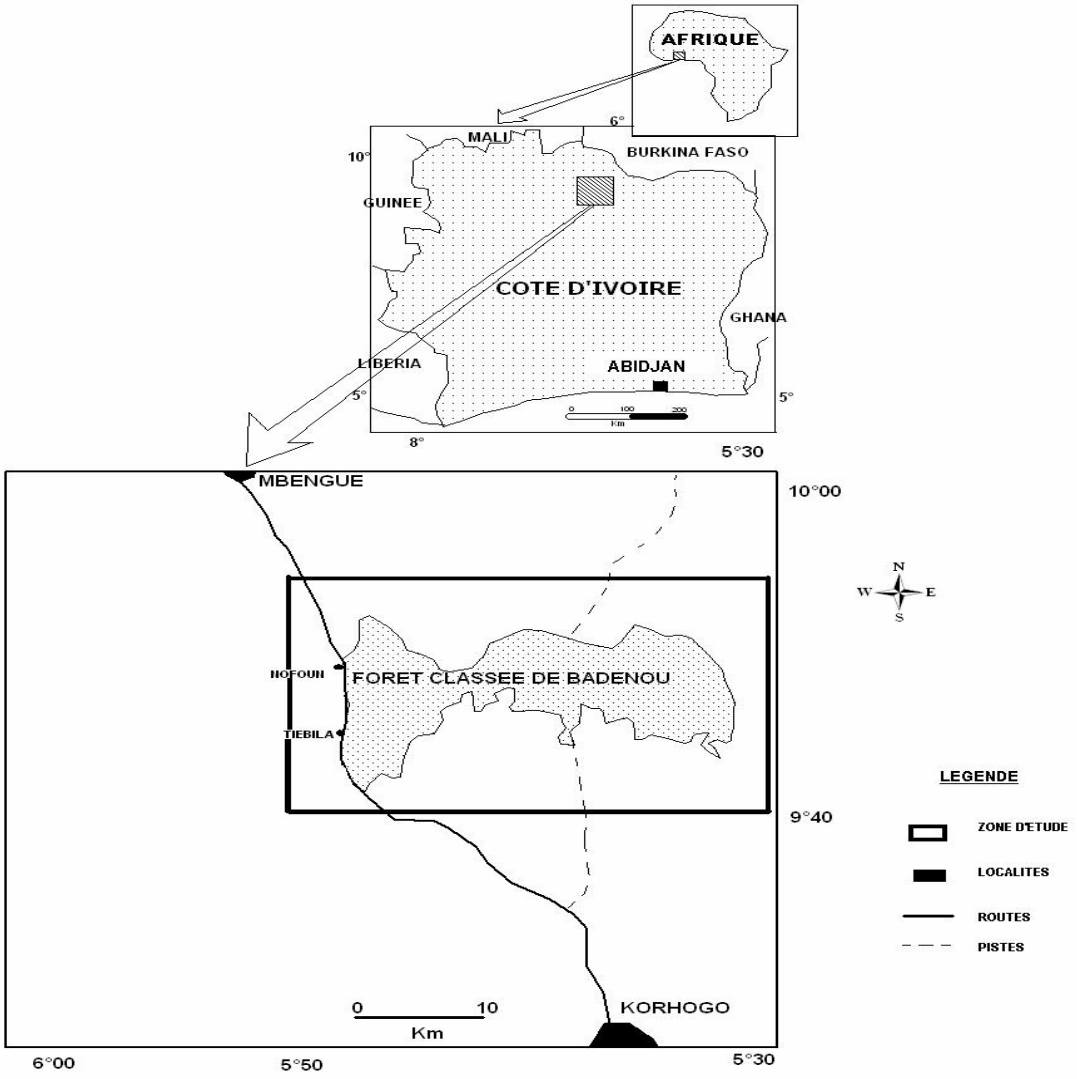


FIGURE 1 : Situation de la zone d'étude**.** *Location of the study area*

La région étudiée comprend, en plus de la forêt classée, une importante zone périphérique, soit une surface totale de 100 700 hectares. Le relief est peu accidenté et formé de plateaux granitiques. Les sols sont essentiellement ferralitiques avec, dans les bas-fonds, des sols hydromorphes à engorgement temporaire ou permanent. Sur le plan hydrographique, cette forêt est bien drainée par le fleuve Bandama et ses affluents.

La pluviométrie moyenne annuelle est comprise entre 1 300 et 1 400 mm. Elle est sous l'influence du régime climatique soudanais caractérisé par une saison sèche longue de six à sept mois (novembre à mai, avec une période d'harmattan de décembre à février) et une saison pluvieuse de juin à octobre avec un maximum pluviométrique en août. La végétation appartient au secteur « sub-soudanais » ; elle est essentiellement constituée d'îlots de forêt claire, de forêt galerie le long des rivières et fleuves, de savanes boisées, arborées, arbustives et herbeuses.

Les feux de brousse sont des pratiques traditionnelles pour la préparation des terres agricoles, la chasse, le renouvellement des pâturages et le nettoyage pour éliminer la broussaille, les mauvaises herbes et les insectes ainsi que tous les « nuisibles ». Les feux sont donc utilisés comme outil de gestion du milieu et constituent un facteur écologique important. Les résultats du passage des feux sont très souvent spectaculaires. Selon Vickos (1991), le passage

régulier des feux de brousse pérennise les paysages de savanes. De même, les expériences menées sur une quarantaine d'années à Kokondékro (1956-1989) et à Lamto (1962-1989) en Côte d'Ivoire ont montré que l'action des feux sur la végétation était variable suivant la période de mise en feu. Les feux tardifs conduisent progressivement à la disparition des espèces ligneuses.

Selon l'Institut National de la Statistique (INS, 1988 et 1998), la population de la zone est passée de 21 664 à 29 264 habitants entre 1988 et 1998, soit une augmentation de 25,97 % en l'espace de 10 ans. Cette population est composée des peuples Senoufo et Malinké mais également de Peulh, de Maliens et de Burkinabés reconnus pour leur solide tradition agricole (Kottia et Konan, 1996). Cette agriculture est caractérisée par des techniques archaïques telle la culture attelée sur brûlis. En plus de l'agriculture, les métiers de tisserand, forgeron et potier sont également exercés. Cependant, tous redeviennent agriculteurs et travaillent la terre pendant la saison des pluies.

On note également que les principales cultures pratiquées autour de la forêt sont des cultures vivrières surtout céréalières (mil, *Pennisetum sp.* ; maïs, *Zea mays* ; riz, *Oriza sp.* ; sorgho, *Sorghum sp.*) et les ignames (*Dioscorea sp.*) ainsi que des cultures industrielles telles que le coton (*Gossypium sp.*) et l'anacarde *(Anacardium occidentale*) qui occupaient plus de 50 % des surfaces exploitées en 1996. Ainsi, la forêt classée a été infiltrée pour le développement de ces différentes cultures. Selon Berger (1996), après le constat des premières exploitations dans la forêt classée, la surveillance a été accrue et les populations clandestines ont été expulsées entre 1976 et 1981. La forêt classée constitue également pour les riverains une réserve de chasse ; d'autre part, ils y prélèvent divers produits végétaux destinés à la commercialisation, la médecine traditionnelle ou la construction.

4. MATÉRIEL ET MÉTHODE

4.1 Matériel

Deux types de données ont été utilisés dans cette étude : le premier est constitué de deux images satellitales à haute résolution : une image TM de LANDSAT 5, scène 197 - 53 du 16/01/1986 et une image ETM + de LANDSAT 7, même scène (197 - 53) datant du 31/01/2000 couvrant la forêt classée de Badenou et sa périphérie. Les deux images sont de saison sèche, sans nuage. Bien qu'on soit en période d'harmattan, l'atmosphère ne semble perturbée sur aucune des deux images. Le second comprend les données dites « complémentaires ». Elles sont composées de documents cartographiques réalisés par l'Institut Géographique de Côte d'Ivoire (IGCI) ainsi que des données recueillies sur la végétation et la flore de la forêt classée lors des missions de contrôle sur le terrain du 15 au 25 septembre 1986, du 10 au 22 décembre 1987, du 20 au 30 mars 1988 et du 07 au 17 février 2002. Les données cartographiques sont constituées d'une carte topographique au 1 : 200 000 des sous-préfectures de Korhogo, Dikodougou, M'bengue : (feuille de Korhogo NC 29 XIII datant de 1971). Les autres documents cartographiques utilisés sont : la carte de végétation de la Côte d'Ivoire au 1 : 500 000 (Adjanohoun et Guillaumet, 1971) et la carte d'occupation du sol de la forêt classée de Badenou au 1 : 100 000 (DCGTX, 1989) de la SODEFOR-Société pour le développement des plantations forestières (figure 2). Cette dernière a été réalisée à partir de photographies aériennes de 1979, actualisées par des missions sur le terrain en 1988. Les données sur la végétation concernent essentiellement la physionomie des principaux types de formations mixtes forestières et graminéennes ainsi que la composition floristique. Enfin, le traitement des images a été effectué grâce aux logiciels PCI, IDRISI et MAPINFO pour la cartographie. Les produits spatiaux et cartographiques utilisés sont indiqués dans le tableau 1.

TABLEAU 1 : Produits spatiaux et cartographiques utilisés. *Space data and maps used in the study*

Produits spatiaux
Image TM de LANDSAT 5 : 197 - 53 du 16/01/1986 Image ETM + de LANDSAT 7 : 197 - 53 du 31/01/2000 couvrant la forêt
Produits cartographiques
Carte topographique à l'échelle du 1 : 200 000 des sous - préfectures de Korhogo, Dikodougou, M'bengue : feuille de Korhogo NC 29 XIII datant de 1971 Carte de végétation de la Côte d'Ivoire au 1 : 500 000 (Adjanohoun et Guillaumet, 1971) Carte d'occupation du sol de la forêt classée de Badenou au 1 : 100 000 (DCGTX, 1989)

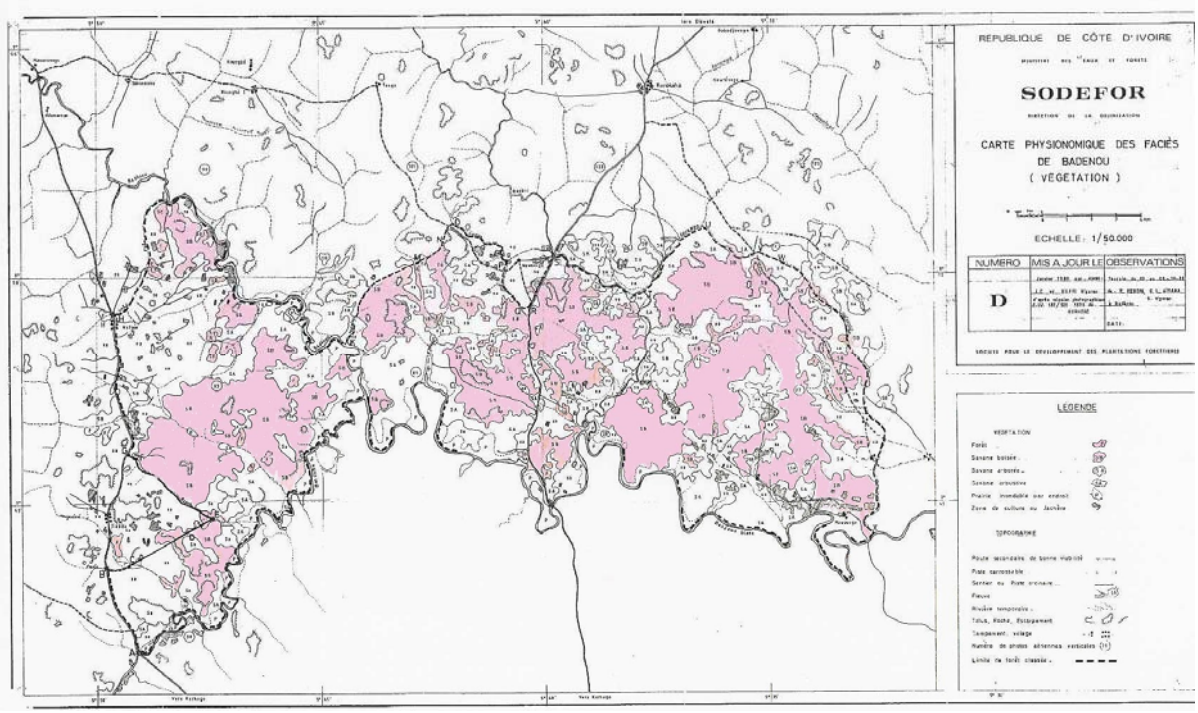


FIGURE 2 : Carte de la SODEFOR montrant, en rouge, les forêts claires et savanes boisées en 1989.
SODEFOR map showing in red the woodlands and savanna forests in 1989

4.2 Méthode

Dès 1986, nous avions acquis la première image et nous avions la possibilité de faire des missions sur place pour des observations détaillées de la végétation. Nous avons utilisé une méthode classique de traitement de l'image pour obtenir les limites des formations végétales avec l'appui constant des données de terrain. Par la suite, nous avons acquis la deuxième image ; la même méthode de classification a été appliquée, toujours appuyée sur notre connaissance du terrain, pour la comparaison des deux dates. La comparaison de deux classifications permet de s'affranchir des corrections atmosphériques, puisque chacune vise à la distinction relative des formations végétales à une date donnée (Conghe *et al*., 2001 ; Foody *et al*., 1996 ; Kawata *et al.*, 1990). Dans les deux cas (1986 et 2000), une synthèse des traitements effectués est résumée à la figure 3. Les différentes étapes ont été les suivantes :

1) l'étape de collecte des données a servi à réunir les données satellitales et complémentaires : cartes topographiques, carte d'occupation du sol, données de terrain et bibliographiques sur la forêt de Badenou.
2) la seconde étape correspondant à la phase d'extraction et de correction géométrique des données satellitales a consisté à extraire sur les deux images TM et ETM + de LANDSAT, pour les années 1986 et 2000, une portion d'image de 1 175 pixels sur 806 lignes centrée sur la forêt de Badenou à l'aide des logiciels IDRISI et PCI. Ensuite, nous avons procédé à la correction géométrique avec 20 points de calage à partir des cartes topographiques au 1 : 200 000. Nous avons opté pour un ré-échantillonnage « cubique », qui, comparé à la méthode du plus proche voisin, améliore la netteté de l'image et permet une meilleure discrimination des surfaces forestières, sans trop altérer la radiométrie (Caloz et al., 1993).
3) dans la troisième étape, nous avons procédé à l'amélioration des images par étalement linéaire et égalisation d'histogramme, ainsi que le calcul de différents indices. En effet, les compositions colorées servent de base à l'interprétation des images, à la définition des classes, à l'établissement des parcelles d'entraînement en vue d'une classification dirigée. La linéarisation a été effectuée, dans les deux cas, avec un seuillage de 1 % aux deux extrémités de l'histogramme, de manière à augmenter les contrastes en perdant le moins possible d'information. Le nombre élevé de bandes (6) des

capteurs TM et ETM+ permet de réaliser un grand nombre de compositions colorées. On note également que certains canaux sont corrélés. Aussi, une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée pour maximiser l'information sur les trois premières composantes devant servir à la composition colorée. Cette ACP permet également une décorrélation entre les bandes afin d'améliorer la capacité de l'image à discriminer les classes d'occupation du sol. Toutes ces données, notamment les canaux bruts et les néocanaux, ont été utilisées dans la réalisation de compositions colorées. D'autre part, une classification non dirigée sur les trois canaux CP1, CP2, NDVI rend compte de la séparabilité des classes et de leur extension.

4) la quatrième étape est celle des contrôles de terrain. Le choix des parcelles à visiter a été réalisé avant la visite de terrain sur la base des connaissances théoriques et des classes non dirigées. Il s'agit de parcelles suffisamment grandes (10 à 30 pixels) et spectralement homogènes pour être reconnaissables sur le terrain. Lors des missions d'observations dans la forêt et sa périphérie, nous avons confirmé et précisé la définition des classes, réalisé une analyse physionomique de la végétation, identifié la flore des espèces principales, noté le niveau de dégradation et l'état de l'occupation du sol. Une partie des parcelles ont été utilisées comme parcelles d'entraînement, les autres ont été réservées à la validation. Ainsi, 70 parcelles (nombre arbitraire) par image couvrant les différents types d'occupation du sol ont été retenues comme vérité terrain pour la classification des images de LANDSAT de 1986 et 2000 de résolution 30*30 mètres. À ce stade, nous avons identifié des parcelles de forêt galerie, forêt claire, savane boisée, savane arborée, savane arbustive, savane herbeuse et sol nu. Le choix des classes a été déterminé par notre connaissance du terrain, le but de l'étude qui était la distinction des types physionomiques de végétation, enfin par l'analyse des compositions colorées et des classifications non supervisées.

5) la cinquième étape correspond aux classifications. En effet, sur la base des sites visités, nous avons effectué sur les images de 1986 et de 2000 des classifications dirigées par la méthode de maximum de vraisemblance en exploitant les informations des canaux bruts et des néocanaux. Ensuite une validation qualitative des classifications a été réalisée par comparaison avec la carte de la SODEFOR et surtout par les missions de terrain, sur des sites différents des parcelles d'entraînement. Un filtre modal 5*5 a été appliqué ensuite pour éliminer les pixels isolés à l'intérieur de classes homogènes et améliorer la lisibilité du résultat. Finalement, la comparaison de l'image classée de 2000 et de la carte de la SODEFOR a permis d'estimer les variations du couvert végétal entre 1986 et 2000.

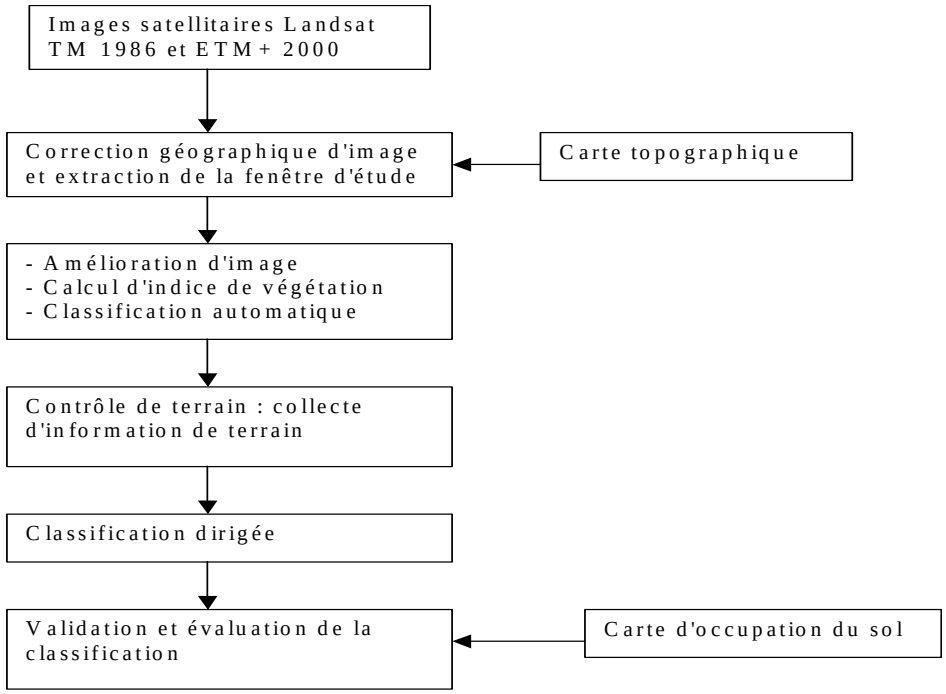


FIGURE 3 : Organigramme des traitements. *Processing scheme*

5. RÉSULTATS

5.1 Traitements numériques des produits spatiaux

Les compositions colorées TM4 (rouge) - TM7 (vert) - TM3 (bleu) (figures 4 et 5) se sont avérées les meilleures pour l'interprétation. Elles font ressortir en rouge les formations arborées denses, à deux ou trois strates, encore feuillées en janvier : forêts galeries, forêts claires, savanes boisées, qui ont une forte réflectance dans le proche infrarouge. Les savanes arborées et arbustives ainsi que les prairies le long des rivières apparaissent en bleu-vert, car la couverture herbacée, sèche en cette saison, réfléchit assez bien les rayonnements visible et thermique, mais pas le proche infrarouge. Enfin les sols nus, terres cultivables après récolte, réfléchissent fortement aussi bien le proche infrarouge que le visible et le thermique et ressortent en blanc. Les feux (noir) affectent aussi bien les savanes boisées que les savanes arborées et arbustives. La comparaison des figures 4 et 5 met en évidence la variation des réponses spectrales des formations ligneuses (forêts claires et savanes boisées) en janvier pour 2 années différentes. Les forêts claires et savanes boisées, dont l'existence est attestée dès avant 1989 par la carte de la SODEFOR (figure 2) se traduisent par un signal presque saturé le 31 janvier 2000, alors que le 16 janvier 1986, les mêmes formations apparaissaient très claires. Or le tableau des pluviométries mensuelles en 1985, 1986, 1999 et 2000 (tableau 2) montre que d'octobre 1985 au 16 janvier 1986 (date d'acquisition de l'image), il est tombé 70,9 mm de pluie, alors qu'il est tombé 245 mm d'octobre 1999 au 31 janvier 2000. Ceci explique sans doute en grande partie la différence d'aspect d'une même formation aux deux dates, le sous-bois et le tapis herbacé étant desséchés en janvier 1986.

TABLEAU 2 : Pluviométrie mensuelle des années 1985, 1986, 1999 et 2000 de la forêt classée de Badenou *Monthly rainfall for the years 1985, 1986, 1999 and 2000 in the Badenou Forest Reserve*

	Hauteur mensuelle de pluie (mm)			
Mois	1985	1986	1999	2000
janvier	0	0	0,0	13,6
février	1,9	8,1	0,5	0,0
mars	103,3	2,3	31,5	10,1
avril	91,4	88,3	50,5	61,7
mai	155,5	127,4	86,9	187,7
juin	118,7	167,3	125,3	133,7
juillet	226,4	197,3	108,2	206,7
août	373,5	262,2	305,7	184,5
septembre	283,8	321,2	219,2	142,2
octobre	63,1	53,7	192,8	69,4
novembre	7,8	50,5	9,3	9,2
décembre	0	0	0,0	0,0
Hauteur de pluie annuelle	**1 425,4**	**1 278,3**	**1 129,9**	**1 018,8**

Source : station pluviométrique de Khorogo

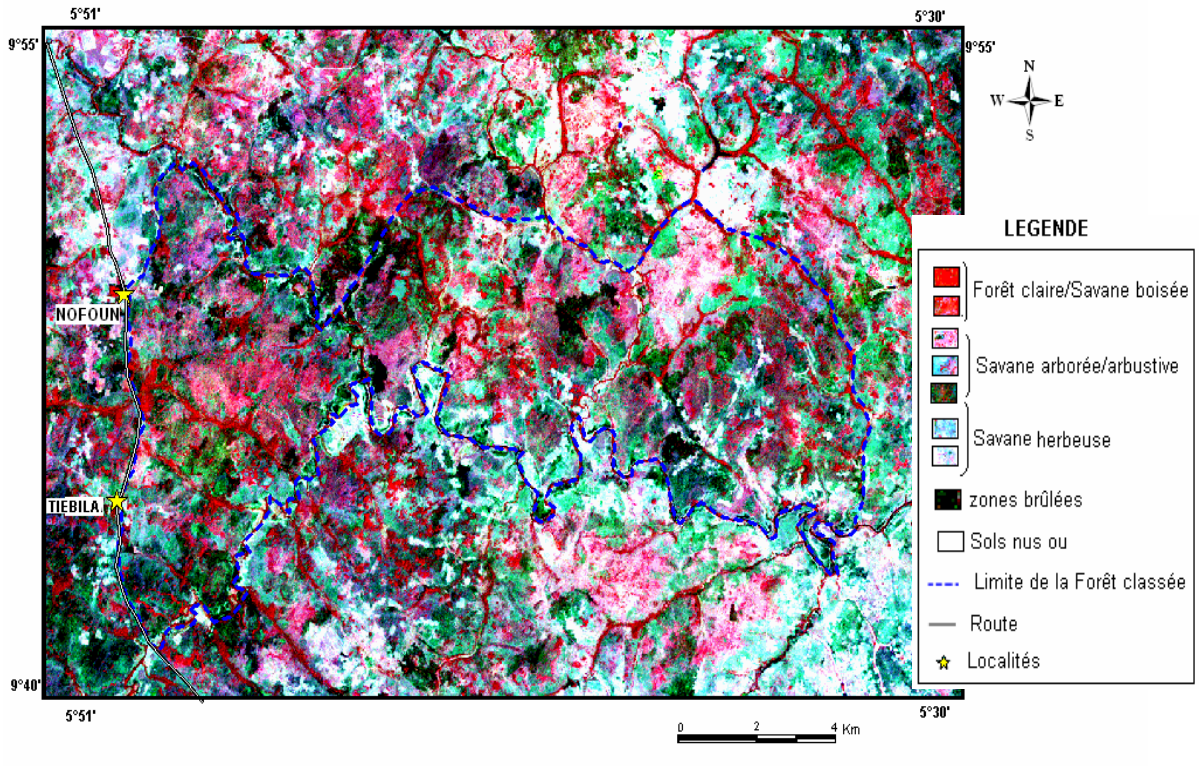


FIGURE 4 : Composition colorée TM4 (R) / TM7 (V) / TM3 (B) de l'image LANDSAT 5 du 16 janvier 1986.
LANDSAT 5 colour composite TM4 (R) / TM7 (G) / TM3 (B) using the 16 January 1986 LANDSAT 5 image

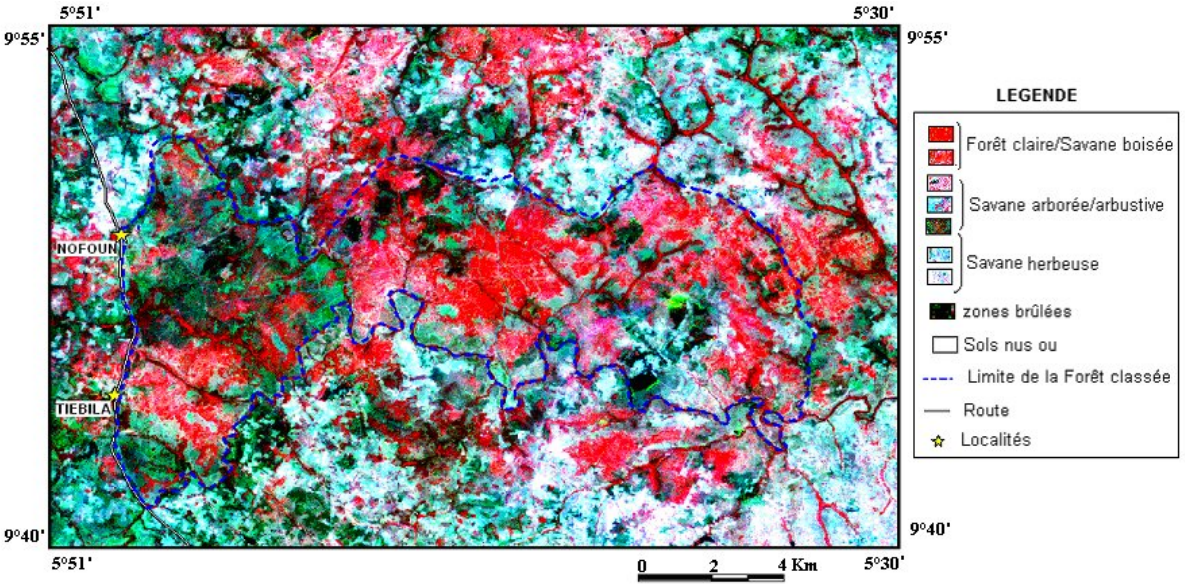


FIGURE 5 : Composition colorée TM4 (R) / TM7 (V) / TM3 (B) de l'image LANDSAT 7 du 31 janvier 2000.
LANDSAT 7 colour composite TM4 (R) / TM7 (G) / TM3 (B) using the 31 January 2000 LANDSAT 7 image

La conséquence est que la classification de 1986 présente certaines confusions entre les classes de savanes boisées, savanes arborées et savane arbustives (figures 2 et 6). Par contre, sur l'image de 2000, la classification dirigée (figure 7) permet de distinguer forêts claires (classe 1), forêts galeries (classe 2), savanes boisées (classe 3), savanes arborées (classe 4), savanes arbustives (classe 5), savanes herbeuses ou prairies (classe 6), sols nus (comprenant souvent des zones de culture après récolte) et zones dégradées (classe 7) et zones brûlées (classe 8). Les matrices de confusion des 2 classifications sont présentées dans les tableaux 3 et 4. Elles ont été calculées avec IDRISI, en utilisant des parcelles différentes des parcelles d'entraînement.

Coefficient Kappa = 0,8678

TABLEAU 3 : Matrice de confusion de la classification à partir des canaux bruts de l'image TM de LANDSAT 5 de 1986. *Error matrix of the classification using the original bands of the LANDSAT 5 TM image of 1986*

2000	**Forêt claire**	**Savane boisée**	**Savane arborée**	**Savane arbustive**	**Galerie forestière**	**Savane herbeuse**	**Sols nus**	**Zone brûlée**	**ErreurC**
Forêt claire	**95,36**	4,29	0,00	0,00	0,36	0,00	0,00	0,00	0,0464
Savane boisée	16,17	**83,83**	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,1617
Savane arborée	0,00	3,64	**92,72**	0,00	0,00	2,98	0,66	0,00	0,0728
Savane arbustive	0,00	0,00	0,00	**91,56**	0,00	0,00	0,00	8,44	0,0844
Galerie forestière	10,86	0,00	0,00	0,00	**89,14**	0,00	0,00	0,00	0,1086
Savane herbeuse	0,00	0,00	14,02	0,00	0,00	**79,15**	6,84	0,00	0,2085
Sols nus	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	**100,00**	0,00	0,0000
Zone brûlée	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,0000
ErreurO	0,1884	0,1045	0,2265	0,0000	0,0051	0,0191	0,2763	0,1737	0,1105

TABLEAU 4 : Matrice de confusion de la classification à partir des canaux bruts de l'image ETM+ de LANDSAT 7 de 2000. *Error matrix of the classification using the original bands of the LANDSAT 7 - ETM+ of 2000*

1986	Forêt claire	Savane boisée	Savane arborée	Savane arbustive	Galerie forestière	Savane herbeuse	Sols nus	Zone brûlée	Erreur C
Forêt claire	**71,75**	17,14	1,59	0,00	9,52	0,00	0,00	0,00	0,2825
Savane boisée	5,37	**90,16**	4,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0984
Savane arborée	0,35	0,00	**93,31**	6,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0669
Savane arbustive	0,00	0,00	6,67	**92,31**	0,00	0,00	0,00	1,03	0,0769
Galerie forestière	3,31	7,95	1,32	0,00	**87,42**	0,00	0,00	0,00	0,1258
Savane herbeuse	0,00	0,00	0,81	0,00	0,00	**82,93**	16,26	0,00	0,1707
Sols nus	0,71	0,71	0,00	0,00	0,00	8,57	**90,00**	0,00	0,1000
Zone brûlée	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	**100,00**	0,0000
Erreur O	0,1407	0,1173	0,1479	0,0909	0,1852	0,1053	0,1370	0,0062	0,1112

Coefficient Kappa = 0,8706

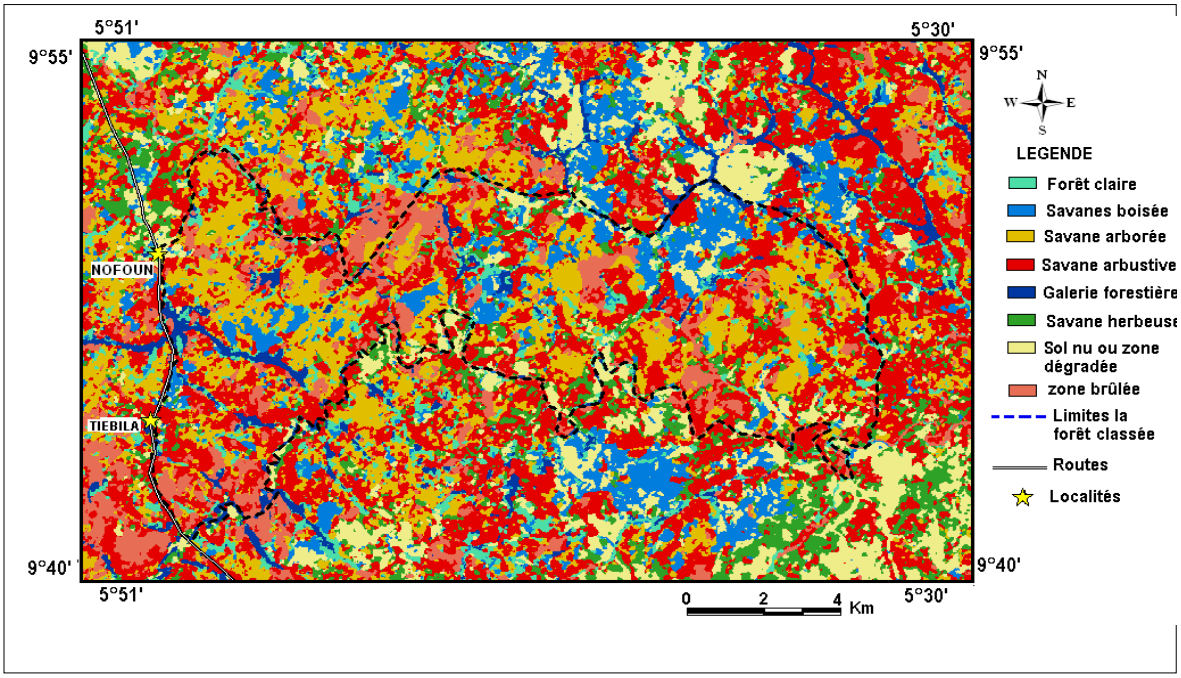


FIGURE 6 : Classification dirigée de l'image TM de LANDSAT 5 de 1986 de la forêt classée deBadenou.
Supervised classification of the LANDSAT 5 TM image of 1986 over the Badenou Forest Reserve

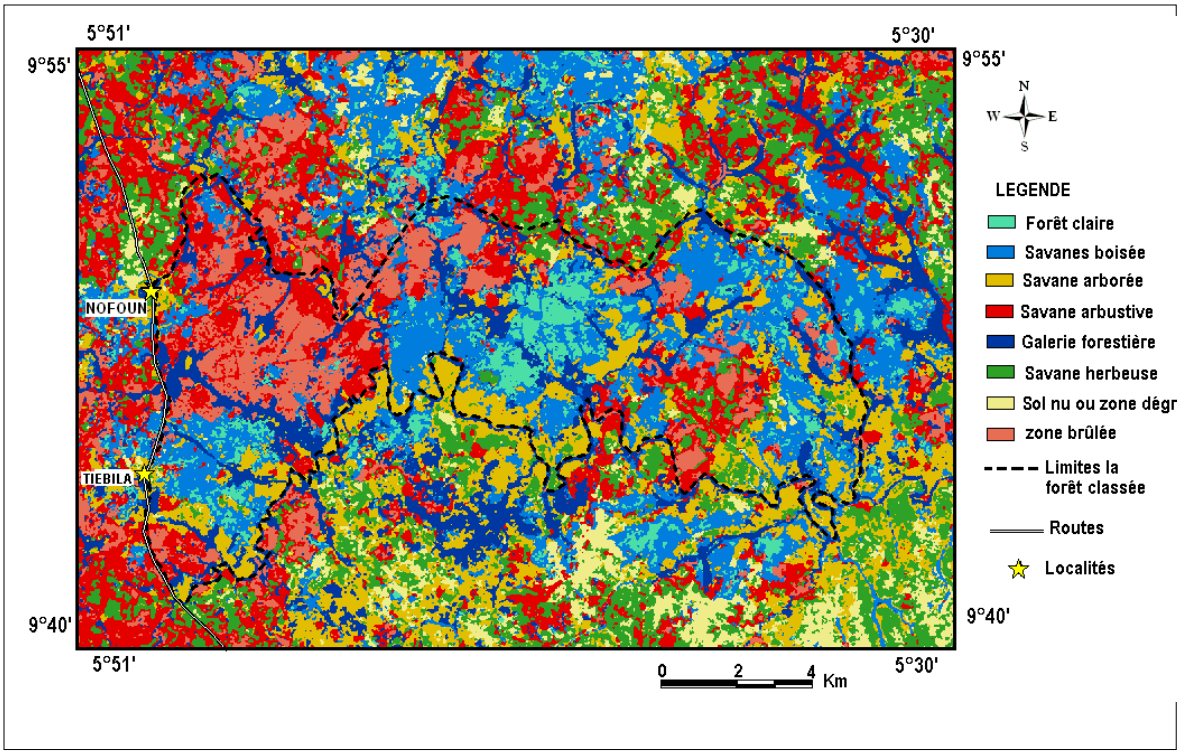


FIGURE 7 : Classification dirigée de l'image ETM+ de LANDSAT 7 de 2000 de la forêt classée de Badenou
Supervised classification of the LANDSAT 7 ETM+ image of 2000 over the Badenou Forest Reserve

On note que le coefficient Kappa qui évalue la précision globale du traitement est d'environ 87 % pour les deux dates (Cohen, 1960). La qualité légèrement inférieure de la classification de 1986 s'explique probablement par la couverture arborée trop faible des différents types de savanes dont les caractéristiques spectrales restent dominées par le sol ; elle s'explique aussi par l'hétérogénéité des types de végétation qui crée un chevauchement entre les différentes signatures spectrales. La comparaison des surfaces a été faite ensuite entre la carte de la SODEFOR, l'image classée de 1986 et celle de 2000. Cette comparaison porte uniquement sur le périmètre classé, seul représenté sur la carte, et sur les formations boisées : forêts claires, forêts galeries et savanes boisées. Le tableau 5 montre que ces formations ont été sous-estimées sur l'image de 1986. Par contre, l'augmentation du couvert boisé entre 1986 et 2000 paraît indéniable.

TABLEAU 5 : Évolution des surfaces boisées de la forêt classée de Badenou sans sa zone périphérique entre 1986 et 2000. *Evolution of the forest areas in the Badenou Forest Reserve without its surrounding area between 1986 and 2000*

Classes	SODEFOR 1988 (ha)	LANDSAT 1986 (ha)	LANDSAT 2000 (ha)	Évolution (ha)
Forêt claire+ Savane boisée + Forêt galerie	10 444	6 191	15 180	4 736

5.2 Description physionomique des classes de végétation

Toutes ces investigations, à savoir l'interprétation visuelle des compositions colorées, les classifications et l'étude sur le terrain ont servi à discriminer correctement les différentes unités de végétation de la zone étudiée. Les unités physionomiques représentant les différents types de végétation de la forêt classée de Badenou et sa périphérie déterminées dans cette étude sont :

Les forêts claires (figure 8) : ce sont des forêts à *Isoberlinia doka* composées de deux parties : une partie ligneuse et une partie herbacée. La partie ligneuse se compose de trois strates :

1) une strate arborée supérieure, 15 à 20 m de hauteur et atteignant parfois 30 m, composée d'espèces telles que Afzelia africana, Anogeissus leiocarpus, Ceiba pentadra, Cola gigantea var. glabrescens, Khaya senegalensis, Parkia biglobosa, et surtout d'Isoberlinia doka, espèce la plus fortement représentée dans cette forêt et même dans la région.
2) une strate arborée moyenne, 8 à 15 m de hauteur, constituée principalement de Isoberlinia doka et d'espèces comme Afromorsia laxiflora, Gardenia erubescens, Gardenia ternifolia, Pterocarpus erinaceus.



FIGURE 8 : Forêt claire dans la forêt classée de Badenou (Septembre 1998, photo N'Guessan). *Woodlands in the Badenou Forest Reserve (September 1998, photo N'Guessan)*

3) une strate arbustive inférieure, 1,5 à 5 m de hauteur, composée d'espèces telles que *Cochlospermum planchonii, Maytenus senegalensis, Moghania faginea, Securinega virosa*.

La strate herbacée constitue le sous-bois formé d'herbacées non graminéennes comme *Aspilia helianthoides subsp. ciliata, Pandiaka heudelotii, Sida rhombifolia, Tephrosia bracteolata,* etc. et de graminées telles que *Andropogon africanus, Andropogon ivorensis, Andropogon tectorum, Hyparrhenia subplumosa et Panicum phragmitoides.*

Les forêts galeries : ces formations végétales longent le cours du fleuve Bandama et de ses affluents (le Badenou et le Badeni) et forment une frange d'environ 500 m de largeur. Dans cette zone, elles se présentent sous forme d'une végétation ligneuse fermée dans laquelle on retrouve des épiphytes et des lianes. La végétation ligneuse dans ce milieu est multistratifiée comme en forêt claire et atteint 15 à 20 m de hauteur par ses plus grands arbres : *Cola cordifolia, Cola gigantea var. glabescens, Berlinia grandiflora, Ceiba pentandra et Khaya senegalensis.* D'autres arbres (*Anogeissus leoicarpus, Bridelia speciosa, Diospyros mespiliformis, Manilkara multiformis (?), Prosopis africana, Terminalia laxiflora*, etc.) tendent à fermer le couvert, avec le *Raphia sudanica,* qui est le seul palmier strictement Soudano Zambésien. La strate herbacée est très peu présente dans ces formations végétales.

Les savanes boisées : on y trouve trois niveaux dont le plus important est la strate supérieure constituée d'arbres dominants pouvant atteindre 15 à 20 mètres de hauteur mais très peu nombreux. Ces arbres appartiennent à des espèces telles que *Parkia biglobosa, Bombax costatum, Khaya senegalensis* et *Uapaca togoensis.* Une strate moyenne dense se situant entre 5 m et 10 m de hauteur est constituée de *Antisdesma venosum, Butyrospermum paradoxum subsp. parkii, Detarium microcarpum, Isoberlinia doka, Parinari curatellifolia, Pterocarpus santalinoides, Terminalia laxiflora, Monotes kerstingii,* etc. La partie herbacée est composée essentiellement de graminées héliophiles qui peuvent atteindre 60 cm de hauteur. Ces graminées sont associées à quelques herbacées non graminéennes : *Aspilia bussei, Aspilia helianthoides, Eriosema griseum* et *Afromomum alboviolaceum.* Cette strate très dense au début de la saison des pluies subit l'action des feux de façon régulière tous les ans.

Les savanes arborées : celles-ci sont constituées de petits arbres et d'arbustes disséminés parmi le tapis graminéen. Dans ces formations, on distingue encore deux strates pour la partie ligneuse dont la plus élevée est comprise entre 8 et 15 m de hauteur, formée principalement de *Burkea africana, Isoberlinia doka, Parkia biglobosa.* Notons la présence d'une strate arbustive basse généralement diffuse (1,5 à 3 m de hauteur). Elle est constituée d'arbustes tels que *Annona senegalensis, Cussonia barteri, Detarium microcarpum, Isoberlinia doka, Piliostigma thonningii, Swartzia madagascariensis et Syzygium guineense var. guineense.* La végétation herbacée est à dominante graminéenne pouvant atteindre 1,20 cm : *Andropogon gayanus, Andropogon tectorum* et *Panicum phragmitoides.* Cette formation est continue entre 0,60 et 0,70 m de hauteur. Les herbacées non graminéennes sont peu nombreuses.

Les savanes arbustives : celles-ci sont composées d'un tapis graminéen surmonté d'arbustes atteignant rarement 5 m. Ces ligneux sont très espacés avec un couvert herbacé pouvant être dégradé laissant apparaître le sol nu par endroits. C'est la formation typique des zones de culture après quelques années de jachère. Les espèces caractéristiques sont : *Acacia dudgeoni, A. polyacantha, Albizia zygia, Cassia sieberiana, Detarium microcarpum, Entada africana, Pericopsis laxiflora, Terminalia laxiflora, Terminalia macroptera, Securinega virosa, Securidaca longepedonculata* et *Sterculia setigera.* Ces savanes sont soumises chaque année à l'action des feux qui revigorent les graminées et maintiennent les ligneux pyro-résistants très rustiques.

Les savanes herbeuses : ce sont des savanes dites à *Loudetia simplex, Andropogon africanus* et *A. gayanus.* Ce sont des formations caractérisées par un tapis graminéen continu où arbres et arbustes sont pratiquement absents. Elles sont donc constituées essentiellement d'une strate formée de hautes graminées pouvant dépasser 2 m et recouvrant totalement le sol. Parmi les autres espèces les plus fréquentes on trouve : *Brachiaria jubata, Cymbopogon giganteus var. giganteus, Echinochloa stagnina, Hyparrhenia rufa, Hyperthelia dissoluta, Panicum fluviicola, P. phragmitoides, Vetiveria nigritana,* ainsi que de nombreuses *Cyperacées* telles que *Cyperus distans, C. sphacelatus, Fimbristylis dichotoma* et diverses herbacées ou semi-ligneuses non graminéenes : *Blumea aurita, Borreria stachydea, Vernonia perrottetii.* En saison sèche, cette végétation

herbacée se dessèche. Ces savanes herbeuses sont situées sur les "bowé" (zones dénudées à cuirasse affleurante) et dans les bas-fonds inondables. Sur sols drainés, elles sont post-culturales et de faibles étendues. Atteignant plus de 2 m en fin de saison des pluies, les graminées sont brûlées chaque année durant la saison sèche. Les genres les plus nombreux au sein des familles inventoriées dans cette forêt sont : *Cassia* (3 espèces), *Panicum* (3 espèces), *Vernonia* (3 espèces), *Combretum* (5 espèces) et *Andropogon* (5 espèces). Le faible couvert arboré dans beaucoup de ces savanes fait que les caractéristiques spectrales restent dominées par le sol.

5.3 Bilan issu des données spatiales

Les classifications dirigées effectuées sur les images LANDSAT de 1986 et 2000 correspondent respectivement aux figures 6 et 7. L'image de 1986, du fait de la sécheresse, conduit à sous-estimer les formations boisées ou arborées (tableau 5) : c'est pourquoi la carte SODEFOR 1988 (figure 2) issue de photographies aériennes a été également utilisée pour l'estimation de l'évolution de types de végétation entre 1986 et 2000, par comparaison avec l'image TM de 2000. Les chiffres obtenus ont une valeur relative, étant donné l'impact des feux et les confusions possibles entre les divers types de savanes. Ainsi, nous avons préféré considérer uniquement les formations boisées assez denses, plus facilement identifiables et moins affectées par les feux.

L'augmentation du couvert boisé est indéniable dans la forêt classée. En dehors de ce périmètre, probablement du fait des conditions météorologiques, la reprise de la végétation est également perceptible. Cela se traduit qualitativement, essentiellement par la densité des strates inférieures (herbacée et arbustive) des savanes boisées qui occupent la plus grande partie du périmètre forestier. Dès lors, ces formations, très dégradées en 1986 et classées en savanes arborées ou arbustives, ont été effectivement classées en savanes boisées en 2000, grâce à la fermeture du couvert, notamment de la strate intermédiaire. Ceci est confirmé par nos observations lors de nos visites sur le terrain. Quant aux zones brûlées, leur surface varie d'une semaine à l'autre, mais il semble qu'en 2000, elles affectent surtout les savanes arborées et arbustives ; les savanes boisées paraissent épargnées, sauf au nord-est de Tiebila où une vaste étendue de ces savanes vient d'être parcourue par le feu (figure 5).

Les images satellitales ont donc permis la discrimination des forêts galeries / forêts claires, savanes boisées / savanes arborées, arbustives et herbeuses, ainsi que des sols nus et des zones brûlées de la forêt classée de badenou (figures 6 et 7). Elles mettent en évidence une nette reprise de la végétation entre 1986 et 2000, avec la fermeture du couvert ligneux, à l'intérieur et à la périphérie de la forêt classée, alors que les limites des formations n'ont guère changé. Ce que l'on ne voit pas sur les produits spatiaux, c'est que ces changements dans la structure des peuplements végétaux s'accompagnent d'une meilleure protection des sols et d'un enrichissement en matière organique.

6. DISCUSSION

6.1 Au niveau des traitements numériques

Les classifications dirigées effectuées permettent de distinguer des formations relativement homogènes. Des formations mixtes comme les savanes boisées, dont le taux de couverture est variable, ne sont pas toujours bien identifiées. L'état des strates inférieures est également important ; la dégradation de la strate inférieure en 1986 entraîne la confusion avec des savanes ouvertes. C'est un fait qu'il est plus facile d'obtenir un bon résultat sur une image présentant des forêts denses au milieu d'un paysage agricole que dans le cas présent, où tous les intermédiaires existent entre la savane arbustive et la forêt.

Ceci met l'accent sur le soin que l'on doit apporter au choix des images à analyser, mais aussi sur les difficultés de ce choix. Ceci a été également souligné par Coppin *et al.* (2004). En effet, en région tropicale, les seules acquisitions utilisables sont celles de saison sèche, exemptes de nuages. Le début de la saison sèche est aussi la meilleure période pour distinguer le couvert ligneux, encore feuillé, des strates herbacées en cours de flétrissement. On n'évite pas alors l'inconvénient des feux de brousse, qui parcourent la plupart des types de formation, des jachères aux forêts claires. Dans ces conditions, la cartographie de ces types de végétation devient difficile, et *a fortiori* l'estimation des surfaces et l'évaluation quantitative de leur évolution. À ces difficultés s'ajoutent celles liées aux variations climatiques d'une année à l'autre, illustrées par ce travail. En d'autres termes, la seule comparaison des deux images LANDSAT n'aurait pas permis une estimation correcte de l'évolution du couvert végétal ; cette étude n'a été possible que grâce aux données complémentaires de la carte de la SODEFOR. Pourtant les images spatiales restent des documents irremplaçables dans la mesure où elles donnent une image objective d'un territoire donné à un instant donné ; mais nous sommes

tenus de les exploiter avec le maximum possible de documents associés, avec l'appui de contrôles sur le terrain aussi précis que possible. La plus grande prudence dans l'interprétation des résultats doit être de règle. Ainsi, on touche du doigt les limites des capteurs de résolution 10 à 30 m pour ce type d'étude. Des données à très haute résolution (HRG de SPOT 5, IKONOS, Quickbird, photos aériennes) permettraient peut-être d'affiner, localement, la perception de la dégradation d'un couvert forestier ou de la régénération.

Ces classifications nous ont quand même permis de déterminer les principaux types de végétation et d'observer une étonnante vitalité des formations ligneuses, qui semblent progresser. Ceci est très rare en milieux tropicaux. Notons qu'en ce qui concerne la classe 5 (forêt galerie), l'interprétation visuelle selon les critères classiques des compositions colorées (forme, couleur, texture) permet de l'identifier et de la cartographier.

6.2 Évolution de la forêt et pression anthropique

La « forêt classée » de Badenou est en grande partie occupée par les savanes boisées et arborées, alors que la zone périphérique est dominée par les savanes arbustives et les sols nus cultivables. À l'intérieur du périmètre forestier, les formations boisées paraissent en expansion de 1986 à 2000. Par contre, à la périphérie, les cultures sont en extension aux environs immédiats de Nofoun et Tiebila, ainsi que le long de la route Khorogo-M'bengue. Ceci est la conséquence normale de la forte augmentation de la population (INS, 1988 et 1998). Les derniers vestiges forestiers disparaissent, remplacés par des savanes arbustives ou défrichés, en particulier au nord de Tiebila où la forêt classée a été infiltrée pour le développement de cultures vivrières surtout céréalières (mil, maïs, riz, sorgho, ignames), mais également de cultures industrielles telles que l'anacarde et le coton. Enfin l'étendue des feux à l'est de la route, entre Tiebila et Nofoun, montre que cette partie de la forêt classée est toujours soumise à la pression du pâturage (Figures 4 et 5), pratiqué illégalement par les populations peulhs dont l'élevage constitue la principale activité dans cette région. Pourtant, le phénomène le plus remarquable est la reprise marquée de la végétation entre les deux dates. Notons que cette reprise, qui se traduit par une relative luxuriance du sous-bois et par une tendance à la fermeture du couvert, ne modifie pas forcément la nature des formations (savane arborée ou savane boisée). Nous avons observé, sur le terrain, cette reprise dans les forêts et savanes boisées, peut-être due à une meilleure surveillance du périmètre (Berger, 1996). En effet, avant 1986, la forêt était à peu près abandonnée à elle-même, alors que depuis cette date, elle a bénéficié d'un financement dans le cadre d'un projet d'aménagement de la Banque Africaine de Développement. Pourtant la pluviométrie joue probablement un rôle important, car la reprise est perceptible également à la périphérie de la forêt classée. Ce dynamisme végétal peut être expliqué par la pluviométrie des 3 mois précédant les dates des enregistrements spatiaux, mais aussi par une pluviométrie moyenne plus régulière de 1990 à 2000.

7. CONCLUSION

À l'issue de cette étude, il apparaît que :

1) la forêt classée de Badenou a été assez bien protégée, à l'exception de sa partie ouest, car nous notons une reprise de la végétation et même des ligneux. Ces résultats peuvent paraître surprenants car ils iraient à l'encontre d'une idée très répandue de l'aridification climatique dans ces régions sèches et aussi à l'encontre de l'opinion généralement admise selon laquelle la pression anthropique sur les ressources ligneuses s'aggrave sans cesse, notamment en régions soudaniennes et sahéliennes. Cela n'est pas vérifié dans le cas particulier de la forêt de Badenou. La périphérie de la forêt classée a subi une agression plus sévère, avec réduction des formations boisées et augmentation des savanes arbustives surtout dans la partie ouest.

Cette étude met donc en évidence un phénomène rare en pays secs, sahéliens et soudanais : un dynamisme positif de la végétation naturelle. Plus précisément, la comparaison des données ETM+ de LANDSAT 7 (2000) à la carte de la SODEFOR (1986) montre une augmentation sensible des formations boisées à l'intérieur de la forêt classée, alors qu'à l'extérieur, les défrichements et la dégradation s'accélèrent autour de l'axe Khorogo - M'bengue. L'extension des feux atteste que même la forêt classée est agressée, notamment dans sa partie ouest, le long de la route. D'autre part, la comparaison des mêmes données ETM+ (2000) avec une image TM de LANDSAT 5 (1986) montre dans les savanes boisées et arborées une nette tendance à la reprise de la végétation et à la fermeture du couvert. La principale cause de cette reprise semble être une pluviométrie plus régulière entre 1990 et 2000, sans toutefois exclure l'efficacité d'une meilleure protection de la forêt depuis 1986.

Dans cette étude, l'analyse des compositions colorées et les classifications ont été couplées avec

plusieurs missions d'inventaire au sol de la végétation. Ainsi, l'appui des contrôles de terrain à l'exploitation des images spatiales a été privilégié par rapport à des traitements difficiles à mettre en oeuvre faute de données complémentaires.

Références

Achard, f. (1989) Étude des rythmes saisonniers de la végétation en afrique de l'ouest par télédétection spatiale. Thèse de doctorat, université paul sabatier, toulouse, France. 243 p.

Achard, f. et Blasco, F. (1990) analysis of vegetation seasonal evolution and mapping of forest cover in west Africa with the use of noaa avhrr hrpt data. photogrammetric engineering and remote sensing, Vol. 56, n° 10, p. 1359-1365.

Adjanohoun, E. (1963) Végétation des savanes et des rochers découverts en Côte d'Ivoire Centrale. Thèse, Faculté des Sciences, Université de Paris, 178 p.

Adjanohoun, E. et Aké Assi, L. (1967) Inventaire floristique des forêts claires sub-soudanaises et soudanaises en Côte d'Ivoire septentrionale. Annales de l'Université d'Abidjan, Sc. 3, p. 89-148.

Adjanohoun, E. et Guillaumet, J.L. (1971) La végétation. In J.M. Avenard et al. (Eds) Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoires ORSTOM, n° 50 p. 157-262.

Arnaud, J.C. et Sournia, G. (1980) Les forêts de Côte d'Ivoire : Essai de synthèse géographique. Annales de l'Université d'Abidjan, Côte d'Ivoire, série G, tome IX, p. 5-93.

Berger, R. (1996) Évaluation d'impact environnemental du Projet Sectoriel Forestier II. Rapport SODEFOR Côte d'Ivoire, 167 p.

Bertrand, A. (1983) La déforestation en zone de forêt en Côte d'Ivoire. Bois et Forêts des Tropiques, n° 202 p. 3-17.

Caloz, R., Blazer, T.J. et Willemin, G. (1993) Création d'une ortho-image à l'aide d'un modèle numérique d'altitude : influences des modes de rééchantillonnage radiométrique. In J.-M.M. Dubois (dir.) Télédétection appliquée à la cartographie thématique et topographique. AUPELF et Presses de l'Université du Québec, p. 17-30.

César, J. (1971) Étude quantitative de la strate herbacée de la savane de Lamto (Moyenne Côte d'Ivoire). Thèse 3e cycle, Université de Paris, 95 p.

Chatelain, C., Gautier, L. and Spichiger, R (1996) A recent history of forest fragmentation in southwestern Ivory Coast. Biodiversity and Conservation, vol. 5, n° 1, p. 37-53.

Cohen, J. (1960) A coefficient of agreement for nominal scales. Educational and Psychological Measurement, vol. 20, n°1, p. 37-46.

Collins, J.B. and Woodcock, C.E. (1996) An assessment of several linear change detection techniques for mapping forest mortality using multitemporal Landsat TM data. Remote Sensing of Environment, n° 56, p. 66-77.

Conghe, S., Woodcock, C.E., Seto, K.C., Lenney, M.P. and Macomber, S.A. (2001) Classification and change detection using Landsat TM data : when and how to correct atmospheric effects, Remote Sensing of Environment, vol. 75, p. 230-244.

Coppin, P., Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B. and Lambin, E. (2004) Digital change detection methods in ecosystem monitoring : a review. International Journal of Remote Sensing, vol. 25, n° 9, p. 1565-1596.

Couteron, P., Deshayes, M. and Roches, C. (2001) A flexible approach for woody cover assessment from SPOT HRV XS data in semi-arid west Africa. Application in northern Burkina Faso. International Journal of Remote Sensing, vol. 22, n° 6, p. 1029-1051.

Cristh, E.P. and Kauth, R.J. (1996) The tasselled cap demystified. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 52, n° 1, p. 81-86.

FAO (2000) Ressources forestières mondiales 2000. Document forestier 140, FAO, Rome, 511 p.

Foody, G.M., Palubinska, G., Lucas, R.M., Curran, P.J. and Honzak, M. (1996) Identifying terrestrial carbon sinks : classification of successional stages in regenerating tropical forest from Landsat TM data. Remote Sensing of Environment, vol. 55, p. 205-216.

Foody, G. M., Lucas, R.M., Curran, P.J. and Honzak, M. (1997) Mapping tropical forest fractional cover from coarse spatial resolution remote sensing imagery. Plant Ecology, vol. 131, n° 2, p. 143-154.

Fournier, A. (1983) Contribution à l'étude de la végétation herbacée des savanes de Ouagalofitini (Côte d'Ivoire), les grands traits de la phénologie et de la structure. Candollea, n° 38 p. 37-265.

Gilruth, P.T., Hutchinson, C.F. and Bademba, B. (1990) Assessing Deforestation in the Guinea Highlands of West Africa Using Remote Sensing. Photogrammetric Enginneering and Remote Sensing, vol. 56, n° 10, p. 1375-1382.

Imberson, J. and Branthomme, A. (2001) Characterization of landscape patterns of deforestation in tropical rain forests. International Journal of Remote Sensing, vol. 22, n° 9, p. 1753-1765.

INS (1988) Recensement général de la population et des habitations, données socio-démographiques des localités. Région des savanes. République de Côte d'Ivoire. Tome 1, 83 p.

INS (1998) Recensement général de la population et des habitations, données socio-démographiques des localités. Région des savanes. République de Côte d'Ivoire. Tome 1, 90 p.

Kawata, Y., Ohtani, A., Kusaka, T. and Ueno, S. (1990) Classification accuracy for the MOS-1 MESSR data before and after the atmospheric correction. IEEE Trans. Geosciences Remote Sensing, 28, p. 755-760.

Kottia, A. F. et Konan, K. (1996) Appui au secteur de Badenou dans la réalisation des travaux d'inventaire forestier en forêt classée du Bandama Supérieur. Rapport SODEFOR Côte d'Ivoire, 31 p.

Lanly, J.P. (1969) Régression de la forêt dense en Côte d'Ivoire. Bois et Forêts des Tropiques, Nogent sur Marne, n° 127, p. 45-59.

Lupo, F., Reginster, I. and Lambin, É. (2001) Monitoring land-cover changes in West Africa with SPOT Vegetation : impact of natural disasters in 1996-1999. International Journal of Remote Sensing, vol. 22, n° 13, p. 2633-2639.

MECV (1991) Rapport sur l'État de l'Environnement. Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie (MECV), République de Côte d'Ivoire, Abidjan, 8 p.

MINEF (1998) Étude du Bilan Diagnostique. République de Côte d'Ivoire, 498 p.

N'Guessan, E. (1990) Étude de l'évolution de la végétation du "V Baoulé", contact forêt/savane en Côte d'Ivoire. In P. Lafrance et J.M. Dubois (dir.) Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse, AUPELF et John Libbey Eurotext, Paris, p. 181-186.

N'Guessan, E. (2004) Utilisation des données satellitaires à haute résolution pour l'étude des ressources végétales en Côte d'Ivoire : cas des forêts classées de Badénou et du Haut Sassandra. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, France. 219 p.

N'Guessan, E. et Conde, A. (1989) Utilisation des données des satellites à haute résolution (HRV de SPOT et TM de LANDSAT) pour l'étude des pressions anthropiques sur la forêt classée de Korogho dans le Nord de la Côte d'Ivoire. Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection (SFPT), n° 116 (1989-4), p. 18-26.

Poilecot, P. (1987) Un écosystème de savane soudanienne : le Parc National de la Comoé (Côte d'Ivoire). ICV/87/007, UNESCO PNUD MAB, 246 p.

Phulpin, T., Lavenu, F., Bellan, M. F., Mougenot, B. and Blasco, F. (2002) Using SPOT 4 HRVIR and VEGETATION sensors to assess the impact of tropical fires in Roraima, Brazil. International Journal of Remote Sensing, vol. 23, n° 10, p. 1943-1966.

Sader, S.A. (1995) Spatial characteristics of forest clearing and vegetation regrowth as detected by Landsat TM. Photogrammetric Enginneering and Remote Sensing, vol. 61, n° 9, p. 1145-1151.

Sader, S.A, Hayes, D.J, Hepinstall, J.A., Coan, M., and Souza, C. (2001) Forest change monitoring of remote biosphere reserve. International Journal of Remote Sensing, vol. 22, n° 10, p. 1937-1950.

Sader, S.A. and Winne, J.C. (1992) RGB-NDVI colour composites for visualising forest change dynamics. International Journal of Remote Sensing, vol. 13, n° 16, p. 3055-3067.

Salami, T.T., Ekanade, Q. and Oyinloye, R.O. (1999) Detection of forest reserve incursion in South-western Nigeria from a combination of multi-date aerial photographs and high resolution satellite Imagery. International Journal of Remote Sensing, vol. 20, n° 8, p. 1487-1489.

Singh, A. (1989) Digital change detection techniques using remotely-sensed data. International Journal of Remote Sensing, vol. 10, n° 8, p. 989-1003.

SODEFOR (1976) Inventaire forestier national. Résultats de la Région du Centre, Sud, Nord, Ouest, République de Côte d'Ivoire, Abidjan.

Tole, L. (2002) An estimate of forest extent and change in Jamaica using Landsat MSS data. International Journal of Remote Sensing, vol. 23, n° 1, p. 91-109.

Vickos J.B. (1991) Télédétection des feux de végétation en Afrique Intertropicale et estimation des émissions des constituants ayant un intérêt atmosphérique. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse III, France, 142 p.