Télédétection, 2003, vol. 3, n° 5, p. 443–456
Droit de photocopie soumis à l'autorisation

© 2003 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions scientifiques GB*
Imprimé en France

SUIVI PAR TÉLÉDÉTECTION SPATIALE D'UNE FORÊT TROPICALE HUMIDE PROTÉGÉE SOUMISE À DES PRESSIONS ANTHROPIQUES

ÉDOUARD N'GUESSAN[a], MARIE-FRANCE BELLAN[*b†] et FRANÇOIS BLASCO[b‡].

a Département de Botanique et Biologie Végétale, Faculté des Sciences et Techniques, Université Nationale d'Abidjan, 22 B. P. 585, Abidjan, Côte d'Ivoire. Téléphone : 225 22 44 98 60 ; télécopieur : 225 44 03 07

b Laboratoire « Dynamique de la Biodiversité », CNRS/Université de Toulouse III B. P. 4349, 31055 Toulouse, Cedex 4, France. Téléphone [†,‡] : 33 (0)5 61 55 85 45 ; 33 (0)5 61 55 85 42 Télécopieur [†,‡] : 33 (0)5 61 55 88 62

Courriel [a,†,‡] : k_nguessan@yahoo.fr ; france.bellan@cict.fr ; francois.blasco@cict.fr

(soumis le 29 janvier 2003 ; révisé le 20 mars 2003 ; accepté le 8 juillet 2003)

Une étude basée sur l'analyse des données satellitaires multidates et multisbandeses a été réalisée en vue d'évaluer la dynamique de En Côte d'Ivoire, les chiffres officiels de la déforestation annuelle varient de 200 000 à 300 000 ha par an. Toutefois, on ne dispose pas de chiffres précis sur la surface restante de la forêt dense humide ivoirienne. Celle-ci varie selon les estimations de 2,6 millions d'ha à 4,3 millions d'ha. Même les forêts classées et les réserves ne sont pas totalement préservées. L'objectif de la présente étude est d'évaluer la pression anthropique sur une forêt classée, celle du Haut Sassandra (centre ouest de la Côte d'Ivoire). Les changements du couvert forestier, durant 13 ans, de cette réserve et de ses environs ont été déterminés, cartographiés et évalués à partir des données spatiales : HRV(XS) de SPOT-1 (7/03/1988) sur la partie nord de la forêt, HRV(XS) de SPOT-1 (23/12/1988) sur la partie sud et HRVIR de SPOT-4 (30/01/2001) sur la totalité de la forêt. Ces données ont été analysées visuellement et par traitement numérique, puis complétées par plusieurs missions de validation sur le terrain. Cette recherche complète nos précédentes études notamment méthodologiques. La méthode utilisée est appliquée à l'identique sur les images de 1988 et 2001. Dans une première phase, une interprétation a été effectuée sur les compositions colorées des canaux originaux (XS3-XS2-XS1 de 1988 et XS4-XS3-XS2 de 2001) ainsi que des néocanaux (indices de jaunissement, de brillance et le NDVI) et des classifications non dirigées. À partir de ces résultats, des sites d'entraînement représentatifs des différentes unités d'occupation du sol ont été choisis. Ces sites d'entraînement ont été visités sur le terrain. La structure de la végétation, le niveau de dégradation, la composition floristique ainsi que l'état du sol ont été notés de manière à affiner les résultats de l'interprétation visuelle et effectuer une classification dirigée.

Finalement, deux cartes d'occupation du sol ont été établies pour les années 1988 et 2001 avec 8 classes: forêt dense à canopée fermée, forêt dense à canopée ouverte, forêt dégradée, forêt hydromorphe, cultures, sols nus, eau, zone sans information. Ces cartes de la forêt classée du Haut Sassandra mettent en évidence les changements du couvert forestier et sa dégradation sous les pressions anthropiques spécialement dans la partie nord de la forêt et dans sa périphérie. Au total, plus de 50 000 ha de forêt dense ont été dégradés ou remplacés par des cultures, soit un taux de dégradation de près de 4 000 ha/an.

Mots-clefs : Côte d'Ivoire ; Haut Sassandra ; exploitation forestière ; données satellitaires ; traitements d'images.

MONITORING FROM SPACE A DENSE TROPICAL RESERVE FOREST UNDER HUMAN PRESSURE

In Côte d'Ivoire, the official figures concerning annual deforestation vary from 200 000 to 300 000 ha per year. However, the remaining rainforest area is not exactly known. It varies following the sources from 2,6 million ha to 4,3 million ha. Even protected forests and reserves are not totally preserved. The aim of the present study is to assess human pressure on a protected forest (Haut-Sassandra, center West of Ivory Coast). Changes in plant cover during 13 years, in this reserve and its surroundings, are specified, mapped and evaluated through space data : SPOT 1 XS (7/3/1988) on the northern part of the forest, SPOT 1 XS (23/12/1988) on the southern part and SPOT 4 HRVIR (30/1/2001) on the whole forest. These data were manually and digitally processed. Then several field trips gave additional information. This study complements previous ones, specially concerning the methodology (Nguessan et Conde, 1989 ; Nguessan, 1993 and 1994). The same method is applied on 1988 and 2001 images. First, an interpretation was carried out on colour composites of the original channels (XS3 - XS2 - XS1 in 1988 ; XS4 - XS3 - XS2 in 2001) as well as of new channels (yellowing and brightness indices, NDVI), and unsupervised classifying was run. From the result, training areas of the various land use units were chosen. These training areas were later visited on the field. Plant cover structure, degradation levels, floristic components as well as soil conditions were checked in order to improve the images interpretation and to carry on a supervised classification. Finally, two land use maps have been produced for 1988 and 2001, with 8 classes : dense forest

* Correspondant principal

with close canopy, dense forest with open canopy, degraded forest, swamp forest, crops, bare soils, water, unclassified. These maps of the Haut-Sassandra protected forest clearly show forest cover changes and damages due to human pressure, especially in the northern part of the forest and in its surroundings : a total of more than 50 000 ha of dense forest have been degraded or replaced by crops, that is a degradation rate of about 4 000 ha/year.

Keywords : Ivory Coast, Haut-Sassandra, Forest logging, Satellite data, Image processing.

1. INTRODUCTION

À l'instar de nombreux autres pays africains, la Côte d'Ivoire a une économie fortement tributaire du secteur agricole et forestier. Ces deux secteurs absorbent une forte proportion de la population ivoirienne (MIET,1996). Le rôle joué par la forêt dans l'équilibre économique national est d'une grande importance. En effet, selon l'annuaire des statistiques agricoles et forestières du Ministère de l'agriculture et des ressources animales (MINAGRA, 1990), au cours des années 1970, des produits agricoles industriels, les produits forestiers ligneux et non ligneux représentaient à eux seuls plus de 75 % du produit intérieur brut (PNB). La dynamique agricole, basée essentiellement sur les cultures de rente pérennes (café, cacao, hévéa, palmier à huile) et les cultures vivrières, s'est affirmée au prix d'une forte pression sur le milieu forestier (MIET, 1996).

L'évolution des superficies cultivées traduit bien l'accroissement de la pression foncière : 6 % du territoire national en 1965, 11 % en 1975, 21 % en 1989, soit au total 7 700 000 ha, dont 3 400 000 ha consacrés aux cultures d'exploitation (MECV, 1991). À la base de cette dynamique, on a une croissance démographique forte qui constitue un facteur prépondérant dans la logique du défrichement des espaces forestiers. Le développement agricole et l'exploitation forestière se sont mal conjugués avec la conservation et l'exploitation durable du secteur forestier national. Ainsi, la dégradation de la forêt ivoirienne est due essentiellement à une mauvaise gestion des ressources forestières à travers une agriculture itinérante sur brûlis et à une exploitation forestière abusive (MINEFOR, 1999). D'après le dernier recensement de la FAO (2001), le taux moyen annuel de déforestation dans le pays a été de 3,1 % pour la période 1990–2000. Ces phénomènes de dégradation forestière, même dans des forêts classées, donc protégées, sont étudiés ici à partir de données des capteurs du satellite SPOT.

1.1. État des surfaces forestières en Côte d'Ivoire et objectif de l'étude

À la fin du siècle dernier, la Côte d'Ivoire possédait la plus belle forêt de l'Afrique de l'Ouest, avec une superficie totale de 14,5 millions d'hectares de forêts denses humides auxquels s'ajoutaient 0,5 million d'hectares de forêts denses sèches (Chevalier, 1948). Depuis 50 ans, de nombreux auteurs, dont Aubréville (1956), Lanly (1969), Arnaud et Sournia (1980), Bertrand (1983), la FAO (2001), à travers diverses études sur le couvert forestier dense, ont stigmatisé la régression régulière des ressources végétales, son rythme de dégradation alarmant et les conséquences catastrophiques prévisibles. Du massif originel de forêt dense humide, il subsiste aujourd'hui un ensemble de taille souvent réduite (sauf dans le sud-ouest), dont la surface totale est mal connue : les estimations varient de 2,6 millions d'hectares (MECV, 1991) à 4,3 millions d'hectares (FAO, 2001).

Différentes évaluations des surfaces forestières ont été effectuées en 1956, 1966 et 1974 par la SODEFOR (Société pour le Développement des Plantations Forestières) (SODEFOR, 1976) et le CTFT (Centre Technique Forestier Tropical) (CTFT, 1968) et, en 1982, par Lanly (FAO, 1982). L'évolution de la superficie de la forêt dense ivoirienne a été la suivante : dès 1956, la superficie forestière était estimée à 11,8 millions d'hectares (au lieu de 14,5 millions à la fin du XIX^{e} siècle). Environ 2,5 millions d'hectares de forêts denses humides avaient donc été détruits. En 1966, c'est-à-dire dix ans plus tard, l'évaluation du potentiel de bois d'œuvre a permis de mettre en évidence que la superficie de la forêt s'était encore réduite, passant de 11,8 millions d'hectares en 1956 à 9 millions d'hectares en 1966, soit 2,8 millions d'hectares de forêts denses morcelées en petits massifs de surfaces inférieures à 10 ha éparpillés entre les cultures et les jachères ou les brousses. Le rythme moyen de défrichement pendant cette période 1956-1966 a été de 280 000 ha par an. En 1974, une actualisation des inventaires de 1966, effectuée par la SODEFOR, a abouti à une surface de forêt dense humide estimée à 6,2 millions d'hectares, soit une disparition de 350 000 ha par an. Une analyse de l'évolution du couvert forestier faite en 1980 (Bertrand, 1983) à partir des surfaces cultivées a permis d'évaluer la superficie de la forêt dense à 4,5 millions d'hectares, soit un rythme moyen de déforestation de 315 000 ha par an entre 1974 et 1980. Pour la période 1981-1986, le taux moyen de déforestation serait passé à 446 000 ha par an. Enfin, entre 1990 et 2000, ce taux a été de 265 000 ha (FAO, 2001).

Ce démantèlement des ressources forestières nationales a provoqué son fractionnement en petites unités qui sont à leur tour agressées, progressivement dégradées ou détruites par les défrichements (MINEFOR, 1999).

Actuellement, l'on ne dispose pas de chiffres précis sur la surface totale de ce qui reste de la forêt dense

humide ivoirienne. On sait toutefois que les surfaces de forêts denses non encore exploitées ne sont de l'ordre que de quelques centaines de milliers d'hectares, essentiellement composées de forêts classées, de réserves et de parcs nationaux qui constituent le domaine permanent de l'État.

Face à cette situation, un certain nombre d'actions prioritaires ont été préconisées dans le cadre de la réhabilitation du patrimoine forestier ivoirien. Il s'agit entre autres de l'identification, de la redéfinition et du suivi par télédétection des forêts classées. C'est dans cette optique qu'a été entreprise cette étude de suivi par télédétection spatiale de la forêt du Haut Sassandra.

1.2. Travaux antérieurs

La plupart des travaux de télédétection spatiale consacrés aux forêts tropicales sont des études axées sur des problèmes concrets tels que la cartographie de la végétation et de l'occupation du sol, le suivi de la déforestation, la détection et la cartographie des feux ou la surveillance des pâturages. Au niveau des études consacrées à la déforestation et aux changements du couvert végétal, sont à signaler les travaux de Gilruth *et al.* (1990), Salami *et al.* (1999), Mayaux *et al.* (2000), Boyd et Duane (2001), Couteron *et al.* (2001), Lupo *et al.* (2001), (Imbernon et Branthomme (2001), Sader *et al.* (2001), Achard *et al.* (2002), Phulpin *et al.* (2002) et Tole (2002). Cependant, nous avons noté que les études de télédétection consacrées à la végétation, et plus particulièrement aux forêts de Côte d'Ivoire, sont très peu nombreuses. Il s'agit des travaux de Achard (1989), Achard et Blasco (1990a, b), Laporte (1990) et Achard *et al.* (1993) qui ont étudié le suivi de la végétation forestière dense humide de deux pays d'Afrique de l'Ouest dont la Côte d'Ivoire, à l'aide d'images AVHRR de NOAA.

Nos travaux antérieurs (Nguessan et Conde, 1988 et 1989; Nguessan, 1993 et 1994) ont porté sur la cartographie de la végétation des forêts classées de Korhogo (nord de la Côte d'Ivoire) et du Haut Sassandra (centre-ouest) grâce à des images à haute résolution HRV et HRVIR de SPOT et TM de Landsat.

2. CADRE DE L'ÉTUDE

La forêt classée du Haut Sassandra est située entre les latitudes 7°24" et 6°50" nord et les longitudes 6°51" et 7°05" ouest dans la région du centre-ouest de la Côte d'Ivoire (figure 1). Ce massif forestier délimité et classé en novembre 1974, couvrait à cette époque une surface de 102 400 ha. Cette forêt est limitée à l'ouest par le fleuve Sassandra, à l'est par un tracé artificiel parallèle à la piste Zoukoubgeu-Daniafla, au nord et au sud par des tracés artificiels parallèles au Sassandra. Notre secteur d'étude couvre en plus de la forêt classée une zone périphérique, soit au total une superficie de 162 900 ha (figure 1).

Du point de vue géomorphologique, la forêt s'étend sur un glacis pénéplané. Ce massif se situe dans une région où le climat est une forme de transition entre le climat équatorial à quatre saisons et le climat tropical à deux saisons. La durée de la saison sèche est de 5 à 6 mois, de novembre à mars ou avril. La pluviométrie annuelle varie entre 1 250 et 1 550 mm avec un déficit hydrique cumulé de 400 mm (Eldin, 1971). Du point de vue de la végétation ce massif forestier appartient au secteur mésophile du domaine guinéen caractérisé par la forêt dense semi-décidue à *Celtis spp* et *Triplochiton scleroxylon* (Adjanohoun et Guillaumet, 1971). Selon ces auteurs, les formations végétales sont également pluri-stratifiées avec une strate supérieure composée d'arbres de hauteur supérieure à 30 m, une strate moyenne d'arbres mesurant entre 10 et 30 m et une strate inférieure d'arbres de moins de 10 m. Par endroits, on rencontre une formation dégradée à deux strates, la strate supérieure ayant disparu, ou une formation de recru forestier à une seule strate.

3. MATÉRIEL ET MÉTHODE

3.1. Matériel

Pour ce travail, nous avons utilisé des données images satellitaires haute résolution HRV (XS) K045-/-J335 de SPOT-1 du 07/03/1988 couvrant le tiers supérieur de la forêt et HRV (XS) K045-/-J336 de SPOT-1 du 23/12/1988 couvrant les deux-tiers inférieurs de la forêt et d'autre part l'image HRVIR K045-/J335 de SPOT-4 du 30/01/2001 couvrant la totalité de la forêt.

Nous aussi utilisé des données de terrain issues des missions du 1er au 10 février 1988, du 22 mai au 22 juin 1988, du 3 au 18 décembre 1989, du 5 au 15 mars 2002 et du 10 au 20 juin 2002 ainsi que des données complémentaires. Ces derniers sont des informations sur les principaux types de formations végétales, les essences forestières et le niveau de dégradation de la végétation lors des missions de contrôle de terrain, mais aussi d'une carte d'occupation du sol au 1 : 100 000 de 1989 (DGTX, 1989) ; une carte topographique de 1970 au 1 : 200 000 de l'Institut géographique de Côte d'Ivoire et une carte de végétation de 1971 au 1 : 500 000 de la Côte d'Ivoire (Adjanohoun et Guillaumet, 1971) et des travaux antérieurs (Nguessan et Condé (1988), Nguessan (1993).

Enfin, le traitement des images a été effectué grâce aux logiciels PCI, IDRISI et MAPINFO pour la cartographie.

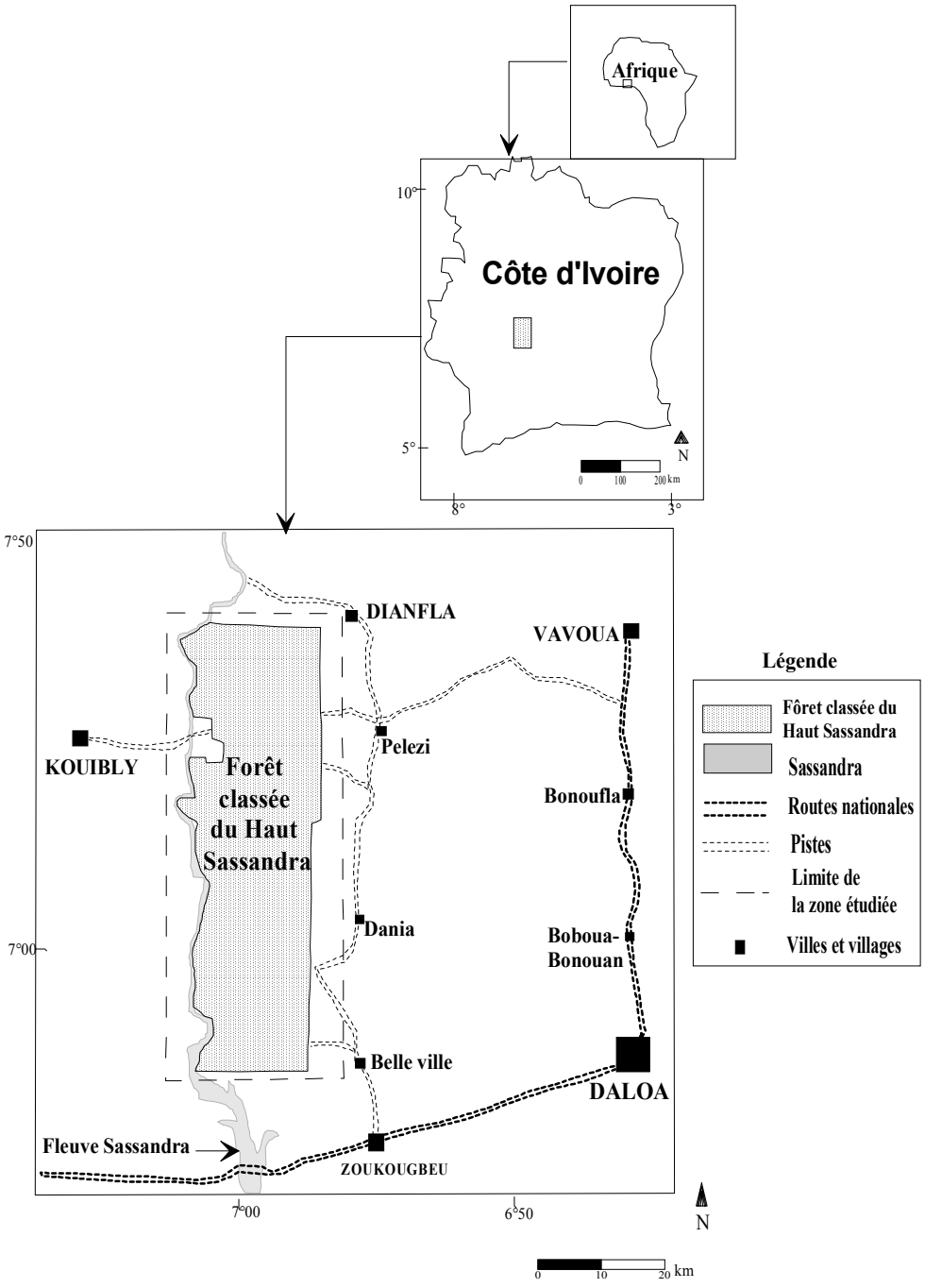


FIGURE 1 Localisation de la forêt classée du Haut Sassandra. *Location of the Haut Sassandra reserved forest.*

3.2. Méthode

La méthode utilisée dans cette étude comprend le traitement et l'analyse des images satellitaires de même que des missions de terrain et l'exploitation des données complémentaires existantes. Les différentes étapes suivies pour les deux dates sont présentées sur la figure 2.

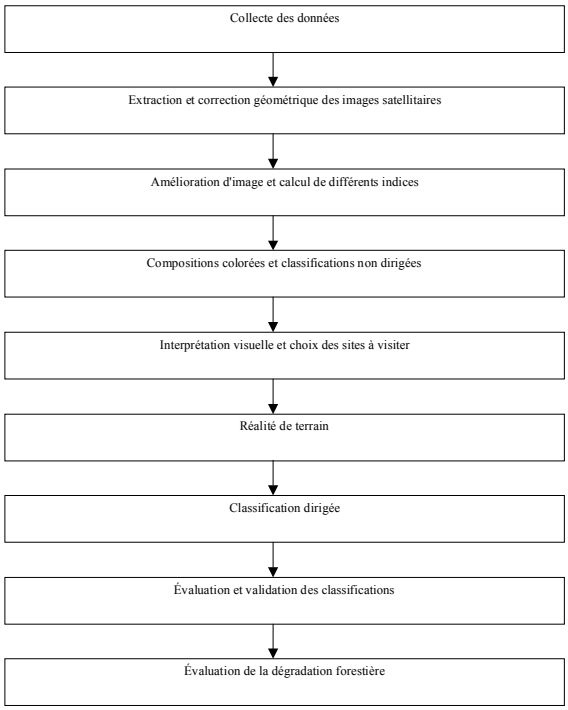


FIGURE 2 Différentes étapes de la méthodologie suivie. *Flow chart of the methodology*.

La phase de collecte des données a consisté a réunir les données satellitaires et complémentaires.

La phase d'extraction et de correction géométrique des données satellitaires a consisté à découper sur les différentes images HRV (XS) 45/335 et HRV (XS) 45/336) des portions d'images centrées sur la forêt du Haut Sassandra avec les logiciels IDRISI et PCI. Ces différentes fenêtres de travail ont fait l'objet d'une correction géométrique et d'un rééchantillonnage cubique. Le repérage de points d'amer (croisements de routes, croisements de routes et de rivières, limites de forêt matérialisées), identifiés aussi bien sur l'image satellitaire que sur la carte topographique de base (1 : 200 000 de l'Institut géographique de Côte d'Ivoire) a permis le redressement des distorsions géométriques de l'image. Nous avons utilisé respectivement 6, 8 et 10 points de calage pour le redressement de la fenêtre supérieure et inférieure puis la totalité de la zone d'étude.

La phase suivante a consisté en une amélioration d'image par rehaussement de contraste et une analyse en composantes principales effectuée sur les images brutes. Ces deux opérations ont servi à apprécier la qualité visuelle de chaque canal brut, à décorréler les néocanaux et à maximiser l'information sur les deux ou trois premiers néocanaux (composantes principales). Par la suite nous avons calculé des indices qui permettent de mettre en évidence soit la végétation, soit le sol nu. Il s'agit des indices de u chapeau haut-de-forme (*Tasseled cap*) (Kauth and Thomas, 1976 ; Crist and Cicone, 1984), qui regroupent les indices de brillance des sols (*Brightness*), de jaunissement de la végétation (*Yellowness*) et de la densité chlorophyllienne (*Greenness*). Selon Mather (1987), les formules de ces trois indices sont les suivantes :

Brillance = ((XS1*0,433)+(XS2*0,632)+
XS3*0,586)+(XS4*0,264))

Jaunissement = ((XS1*-0,829)+(XS2*0,522)+
(XS3*–0,039)+(XS4*0,194))

Densité chlorophyllienne = ((XS1*–0,290)+
(XS2*–0,562)+(XS3*0,600)+(XS4*0,491))

Nous avons également calculé l'indice de végétation normalisé (NDVI) :

$$NDVI = (XS3 - XS2) / (XS3 + XS2).$$

Au niveau de cette étape, les données (canaux bruts et néocanaux notamment les composantes principales et les indices) ont servi de base aux compositions colorées et aux classifications non dirigées. Les compositions colorées classiques XS3/XS2/XS1 et CP1/CP2/NDVI ont été exploitées pour les images de 1988. Pour les images de 2001, les compositions colorées XS4/XS3/XS2, CP1/CP2/NDVI et Jaunissement/Brillance/NDVI ont été effectuées pour une distinction de la végétation.
Les classifications non dirigées, basées sur les signatures spectrales et capables de segmenter l'image en classes d'occupation du sol ont été effectuées. L'algorithme de ces classifications non dirigées s'appuie sur la détermination des pics de fréquence de l'histogramme de l'image à classifier (Collet, 1992). Cet algorithme a été appliqué avec 10 classes de signatures spectrales.

Une exploitation par interprétation visuelle des compositions colorées et des classifications automatiques ont permis de sélectionner 50 parcelles représentant les différents types de végétation sur les images de 1988 et de 2001. Il est à noter que les sites choisis sont de préférence des zones faciles d'accès (proche des pistes et villages). Ces parcelles ont fait par la suite l'objet de visites sur le terrain.

La phase de contrôle de terrain effectuée lors des missions d'observation dans la forêt et sa périphérie a permis de faire une description physionomique de la végétation, de noter le niveau de dégradation, d'identifier la flore et l'état de l'occupation du sol. Ainsi, 45 sites représentant toutes les unités thématiques présentes ont été visités.

Sur la base des descriptions physionomiques et floristiques des sites visités, une classification dirigée par la méthode de maximum de vraisemblance, exploitant les informations des canaux bruts et des néocanaux, a été effectuée sur les images de 1988 et de 2001. De même que pour les classifications non dirigées, cette classification a été appliquée sur les canaux bruts et sur CP1/CP2/NDVI. Ainsi, on a pu distinguer huit classes. L'algorithme de classification selon le maximum de vraisemblance calcule une fonction de probabilité multidimensionnelle qui permet de déterminer la probabilité de chaque pixel d'appartenir à l'une des catégories correspondant aux signatures spectrales (Collet, 1992).

La validation des classifications dirigées a été effectuée grâce aux observations de terrain et aux cartes d'occupation du sol. La vérification de ces classifications avec des parcelles de contrôle issues des observations faites sur le terrain, autres que celles ayant servi pour l'apprentissage, a permis de montrer que les résultats obtenus sont satisfaisants.

Une évaluation des classifications a été effectuée par l'analyse de la matrice de confusion, ce qui a permis de calculer les indices de performance du traitement.

Enfin, une évaluation des superficies des différents types de végétation et d'occupation du sol a servi à analyser l'évolution des différents types de formations végétales de la forêt classée du Haut Sassandra et de sa périphérie entre 1988 et 2001.

4. RÉSULTATS

4.1. Traitements d'images

La correction géométrique des images satellitaires a donné des erreurs résiduelles variant entre 4 et 5 m par rapport aux points d'amers, soit une erreur inférieure au demi-pixel. Cette étape a rendu nos images superposables à la carte topographique de base.

Les différents rehaussements effectués ont amélioré la qualité visuelle des images brutes sur lesquelles on a pu distinguer les zones couvertes de végétation des sols nus et de l'eau (fleuve). Quant à l'analyse en composantes principales, les résultats (tableaux 1 à 3) indiquent que les deux premières composantes pour les images HRV(XS) de 1988 et les trois premières pour HRVIR de 2001 totalisent respectivement 98 %, 97 % et 99 % des informations utiles. Elle a donc permis une décorrélation des canaux XS et une maximisation de l'information sur les deux premières composantes. L'analyse des résultats des différents indices calculés montre que les sols nus et les zones de cultures vivrières après les récoltes (jachères) ont été mis en évidence par l'indice de brillance et l'indice de jaunissement alors que les zones de forêts denses sont mieux caractérisées par l'indice de végétation normalisé (NDVI). L'interprétation visuelle des compositions colorées XS3/XS2/XS1, XS4/XS3/XS2, CP1/CP2/CP3, CP1/CP2/NDVI et NDVI/Brillance/Jaunissement et les classifications réalisées à partir des images 1988 et 2001 ont permis de mettre en évidence les formations forestières denses, les forêts dégradées, les zones de cultures, les sols nus et l'eau (fleuve Sassandra).

TABLEAU 1 Matrice de corrélation et de transformation de l'analyse en composantes principales de l'image K45 / J335 de 1988. *Principal components analysis correlation and transformation matrix of the 1988 image K45 / J335.*

	XS1	XS2	XS3
XS1	1,00	0,99	0,98
XS2	0,99	1,00	0,97
XS3	0,98	0,97	1,00

	XS1	XS2	XS3	% variance
Composante 1	0,58	0,58	0,58	98,77
Composante 2	-0,17	-0,61	0,78	1,14
Composante 3	-0,80	0,55	0,25	0,09

TABLEAU 2 Matrice de corrélation et de transformation de l'analyse en composantes principales de l'image K45 / J336 de 1988. *Principal components analysis correlation and transformation matrix of the 1988 image K45 / J336.*

	XS1	XS2	XS3
XS1	1,00	0,99	0,96
XS2	0,99	1,00	0,94
XS3	0,96	0,942762	1,00

	XS1	XS2	XS3	% variance
Composante 1	1,00	0,99	0,99	97,72
Composante 2	-0,06	-0,14	0,20	2,08
Composante 3	-0,06	0,05	0,01	0,20

TABLEAU 3 Matrice de corrélation et de transformation de l'analyse en composantes principales de l'image K45 / J335 de 2001. *Principal components analysis correlation and transformation matrix of the 2001 image K45 / J335.*

	XS1	XS2	XS3	XS4
XS1	1,00	0,99	0,90	0,85
XS2	0,99	1,00	0,88	0,90
XS3	0,90	0,88	1,00	0,82
XS4	0,85	0,90	0,82	1,00

	XS1	XS2	XS3	% variance
Composante 1	0,98	0,98	0,93	91,75
Composante 2	-0,10	0,02	0,35	4,84
Composante 3	0,17	-0,18	0,13	3,35
Composante 4	-0,03	0,04	-0,01	0,06

Enfin, les résultats des classifications dirigées par maximum de vraisemblance des images de 1988 et 2001 sur les canaux HRV(XS) et HRVIR de SPOT-1 et de SPOT-4 sont visualisés sur les figures 3 et 4. Finalement, les classifications sur les canaux bruts ont donné des résultats satisfaisants. Sur ces images, on distingue les forêts denses à canopée fermée (en vert foncé), les forêts denses ouvertes (en vert), les forêts hydromorphes (en violet), les forêts dégradées (en jaune), les cultures (en gris), les sols nus (en marron), l'eau (en bleu foncé) et les zones sans information (en bleu ciel).

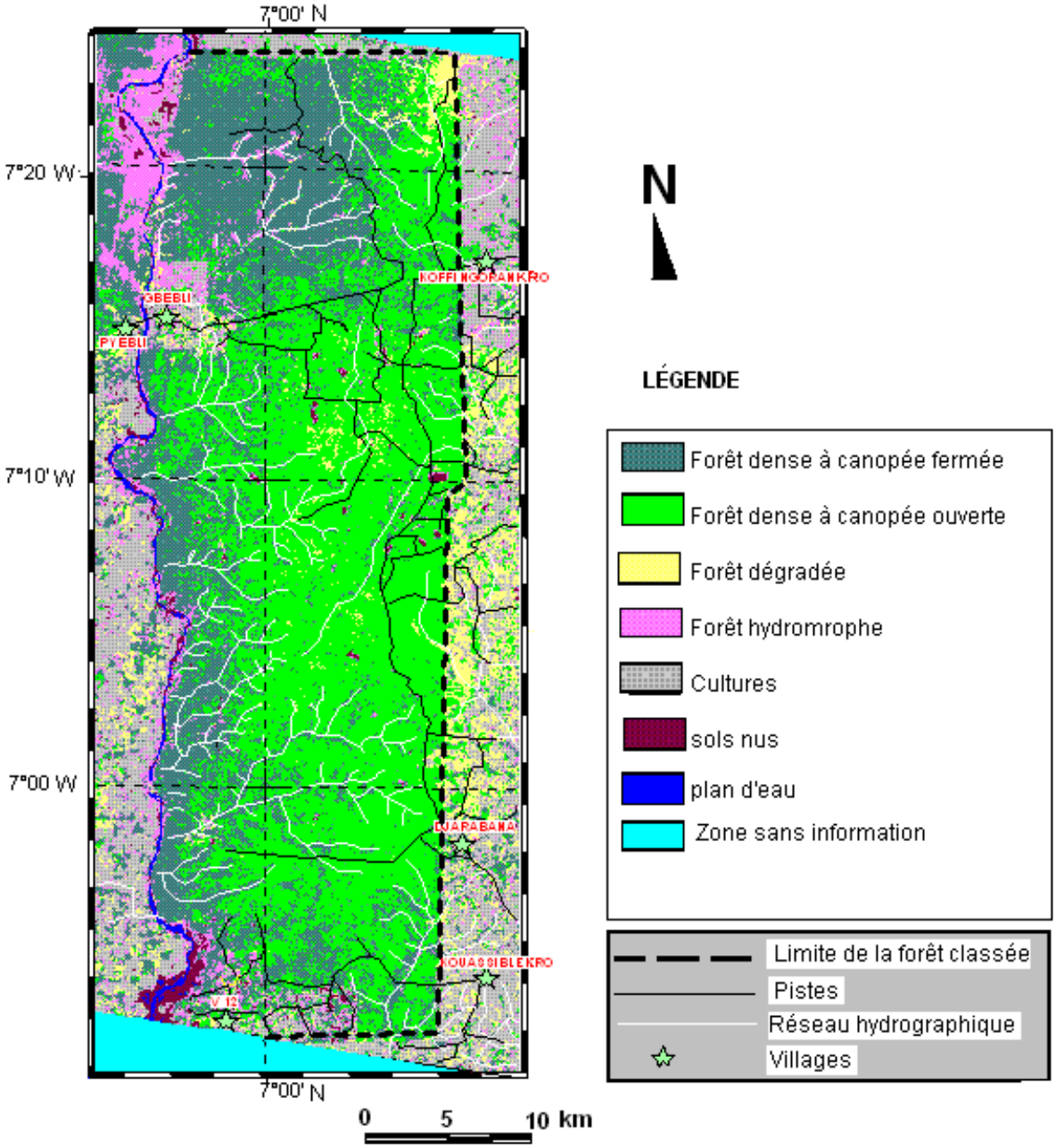
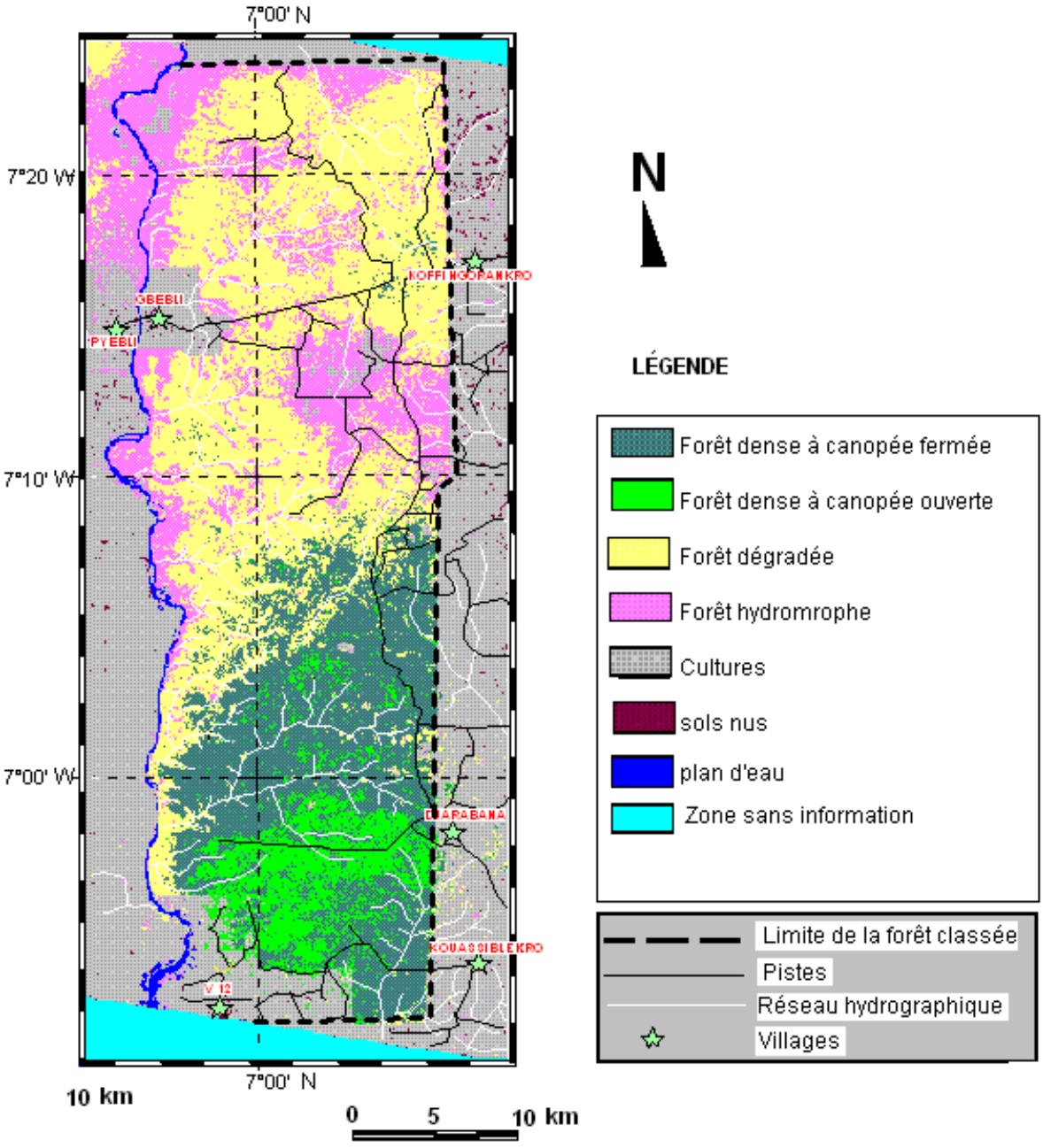


FIGURE 3 Classification dirigée de l'image de 1988. *Supervised classification of the 1988 image.*



Données SPOT/Programme ISIS, C CNES 2001

FIGURE 4 Classification dirigée de l'image de 2001. *Supervised classification of the 2001 image.*

Nous devons signaler et préciser que, dans cette forêt classée, selon nos observations sur le terrain, la forêt dense à canopée fermée est composée de plusieurs strates généralement denses. La strate dominante comprend de grands arbres pouvant atteindre 40 m de hauteur. La strate moyenne est continue formant une voûte forestière fermée empêchant la lumière de descendre jusqu'au sol, d'où

sa désignation de forêt dense à canopée fermée. Le sous-bois est clair, permettant une circulation plus moins facile. Cette forêt dense à canopée fermée est identifiable facilement sur les images satellitaires.

Sur les compositions colorées analysées, elle apparaît en rouge foncé à rouge noir, texture grenue grossière, structure homogène.

La forêt dense à canopée ouverte présente les mêmes caractéristiques que la précédente, mais diffère de celle-ci par la présence d'ouvertures plus ou moins grandes au niveau de la couronne des grands arbres formant la voûte supérieure. Les strates arborées supérieures n'assurent plus la fermeture du couvert. Dans ces ouvertures, la lumière favorise le développement d'une strate de nature herbacée et arbustive dense. Dans ce type de forêt, le sous-étage arbustif et lianescent se développe activement à la faveur de la pénétration de la lumière et rend la circulation dans le peuplement plus difficile. Cette forêt provient de la dégradation de la forêt dense à canopée fermée. Elle apparaît sur les compositions colorées dans une couleur rouge à rose, avec des taches roses ou oranges de texture lisse.

La forêt sur sol hydromorphe regroupe les formations des nombreux talwegs qui drainent la forêt classée, qu'il s'agisse des formations forestières marécageuses périodiquement inondées ou simplement de la forêt sur sols peu perméables. La structure est comparable à celle de la forêt dense (ouverte ou fermée) avec des espèces spécialisées tant au niveau des strates arbustives et herbacées. Le sol présente des traces d'inondations permanentes ou périodiques. Sur les compositions colorées, ces formations apparaissent en rouge sombre, en rouge foncé, texture grenue, forme allongée et linéaire caractéristique, qui suit le réseau hydrographique.

La forêt dégradée est une formation forestière qui découle de la dégradation des formations précédentes. Cette dégradation est provoquée soit par l'exploitation forestière soit par l'implantation de l'agriculture. Ce thème représente aussi ici les grandes trouées d'exploitation ou les parties détruites, où le couvert se reconstitue. La strate inférieure est composée de fourrés d'espèces héliophiles mélangées à une végétation d'herbes et d'arbustes favorisées par la pénétration de la lumière jusqu'au sol. Cette strate inférieure est très dense et rend la circulation très difficile voire impossible. Quelques grands arbres subsistent çà et là, rescapés de la strate supérieure de l'ancienne forêt dense.

Les cultures englobent tous les types de cultures pratiqués par les paysans des régions du Haut Sassandra, c'est-à-dire aussi bien les cultures vivrières sur défrichement itinérant, comme l'igname, le manioc et le maïs ou le riz dans les bas-fonds, que les cultures pérennes telles que le café et le cacao. Les parcelles en cours de défrichement au moment des enregistrements satellitaires font aussi partie de ce thème.

Les sols nus regroupent les sols plus ou moins dénudés, les localités ou les campements et les nombreux inselbergs granitiques qui affleurent dans le centre de la forêt classée (7°10' à 7°15' N), ainsi que par quelques cuirasses latéritiques affleurantes dans le nord de la forêt classée et sa périphérie.

Les matrices de confusion des classifications ont été calculées (tableaux 4 à 6).

Ces matrices permettent de vérifier la qualité de l'apprentissage et donnent une estimation de la validité des classifications. Sur ces tableaux, les lignes représentent l'affectation des pixels à chaque thème après classification, alors que les colonnes indiquent la répartition réelle des thèmes dans chaque thème. La diagonale représente les pourcentages des pixels bien classés.

Les matrices de confusions montrent que, pour les images HRV (XS) de 1988 et HRVIR de 2001, les coefficients de Kappa qui indiquent la performance des classifications sont respectivement de 94 %, 92,75 % et de 93,5 % (tableaux 4 à 6). L'on observe également, qu'en 1988 (tableaux 4 et 5), les deux classes qui présentent les plus grandes confusions entre elles sont la forêt dense fermée et la forêt hydromorphe (5 à 7 % des pixels forêts hydromorphes sont affectés aux forêts denses fermées). Pour l'image HRVIR de 2001 (tableau 6), les forêts dégradées et les forêts denses ouvertes sont les classes qui présentent les plus grandes confusions entre elles (7 à 8 % des pixels de forêt dense ouverte sont affectés aux forêts dégradées).

Toutefois, les classements sont satisfaisants pour la majorité des classes : 95 %, 93 % et 96 % pour la classe 1 (forêt dense à canopée fermée), 91 % et 89 % pour la classe 2 (forêt dense ouverte), 94 %, 91 % et 92 % pour la classe 4 (forêt dense hydromorphe). La classe 7 (eau) est très bien reconnue avec un pourcentage de pixels bien classés de 100 %, de même que la classe 6 (sols nus) avec 96 % et 98 %. Ces deux classes se distinguent très bien sur les composition colorées. Il est d'ailleurs facile d'y repérer des parcelles-échantillons homogènes aussi bien sur les images que sur le terrain. Cependant, on note que pour la classe 5 (cultures) et la classe 3 (forêt dégradée), le pourcentage de pixels bien classés se situe entre 85 % et 88 % à cause de la nature hétérogène de ces deux classes telles que nous les avons décrites précédemment.

TABLEAU 4 Matrice de confusion de la classification à partir de la combinaison des canaux XS1/XS2/XS3 de l'image K045 / J335 de 1988 (résultats en pourcentages). *Confusion matrix of the classified image K045 / J335 (1988, XS1/XS2/XS3) ; results in percentages.*

Classes	1	2	3	4	5	6	7	8
Forêt dense fermée	**93**	2	0	7	1	0	0	0
Forêt dense ouverte	2	**89**	4	1	2	0	0	0
Forêt dégradée	1	5	**88**	1	7	0	0	0
Forêt hydromorphe	4	1	1	**91**	1	0	0	0
Culture	0	3	7	0	**85**	4	0	0
Sols nus	0	0	0	0	4	**96**	0	0
Eau	0	0	0	0	0	0	**100**	0
Sans information	0	0	0	0	0	0	0	**100**
Erreur d'omission	7	11	12	9	15	3	0	0

Coefficient de Kappa = 92,75 %

TABLEAU 5 Matrice de confusion de la classification à partir de la combinaison des canaux XS1/XS2/XS3 de l'image K045 / J336 de 1988 (résultats en pourcentages). *Confusion matrix of the classified image K045 / J336 (1988, XS1/XS2/XS3) ; results in percentages.*

Classes	1	2	3	4	5	6	7	8
Forêt dense fermée	**95**	1	0	5	0	0	0	0
Forêt dense ouverte	1	**91**	4	0	2	0	0	0
Forêt dégradée	0	4	**88**	1	5	0	0	0
Forêt hydromorphe	4	1	2	**94**	2	0	0	0
Culture	0	3	6	0	**88**	4	0	0
Sols nus	0	0	0	0	4	**96**	0	0
Eau	0	0	0	0	0	0	**100**	0
Sans information	0	0	0	0	0	0	0	**100**
Erreur d'omission	5	9	12	6	12	4	0	0

Coefficient de Kappa = 94,0 %

TABLEAU 6 Matrice de confusion de la classification à partir de la combinaison des canaux XS1/XS2/XS3/xs4 de l'image K045 / J335 de 2001 (résultats en pourcentages). *Confusion matrix of the classified image K045 / 335 (2001, XS1/XS2/XS3/XS4) ; results in percentages.*

Classes	1	2	3	4	5	6	7	8
Forêt dense fermée	**96**	2	1	5	0	0	0	0
Forêt dense ouverte	1	**90**	7	1	0	0	0	0
Forêt dégradée	0	8	**87**	2	8	0	0	0
Forêt hydromorphe	3	1	2	**92**	1	0	0	0
Culture	0	2	3	0	**85**	2	0	0
Sols nus	0	0	0	0	6	**98**	0	0
Eau	0	0	0	0	0	0	**100**	0
Sans information	0	0	0	0	0	0	0	**100**
Erreur d'omission	4	11	13	8	15	2	0	0

Coefficient de Kappa = 93,5 %

4.2. Discrimination des types de végétation et évaluation des pressions anthropiques

Les classifications réalisées à partir des traitements numériques appliqués aux différentes images satellitaires de 1988 et 2001 correspondent aux figures 3 et 4. La répartition des superficies des types de végétation et des autres types d'occupation du sol est indiquée sur le tableau 7.

L'observation de ce tableau 7 montre, qu'en 1988, les forêts denses sur sols drainés et hydromorphes (à savoir les forêts denses à canopée fermée, forêts denses à canopée ouverte et forêts hydromorphes) s'étendaient sur une superficie de 113 973,5 ha soit 69,96 % de la zone d'étude (forêt classée et sa périphérie) alors que les forêts dégradées, les cultures et les sols nus occupaient une superficie de 40 414 ha soit 24,81% de la superficie de la zone d'étude.

Il ressort donc de ce tableau, qu'en 1988 (figure 3), la forêt classée du Haut Sassandra renfermait une forte proportion de formations forestières denses. On note tout de même l'existence de cultures dans la partie sud de la forêt classée autour du village V12 et des sols nus représentant des campements ou des défrichements agricoles localisées au centre de la forêt. Cette observation avait déjà été faite par Nguessan (1993). La périphérie de la forêt classée est occupée par une mosaïque de forêt dégradée et de cultures.

En 2001, le tableau 7 montre que les forêts denses à canopée fermée et à canopée ouverte ne couvrent plus que 62 071 ha soit 38,09 % de la zone d'étude. Ces forêts se situent dans la moitié sud de la forêt classée. Tous les autres types de végétation ont augmenté en surface. Ainsi donc, les forêts dégradées, les cultures et les sols nus ont fortement progressé en superficie (91 459 ha). Les zones de cultures signalées à l'intérieur de la forêt classée, autour du village V12, se sont intensifiées. Il en est de même pour la périphérie de la réserve forestière qui est passée d'une mosaïque forêt dégradée/cultures à un espace presque exclusivement occupé par les cultures. Les autres limites ont été respectées.

L' on note que les forêts denses fermées et ouvertes se situent principalement dans la moitié sud de la forêt classée alors que la moitié nord est constituée de forêts dégradées et forêts hydromorphes. Les zones de cultures occupent presque entièrement la périphérie de la forêt classée mais on en trouve également dans le sud de la forêt, autour du village V 12. Les surfaces de ces forêts denses (ouvertes et fermées) ont subi une réduction de 551 902,5 ha de 1988 à 2001 (au profit des forêts dégradées et des cultures), soit un taux annuel de dégradation forestière de 3 992,5 ha.

En conclusion partielle, nous pouvons dire que, dans toute la zone périphérique autour de la forêt classée, l'exploitation agricole exerce une pression de plus en plus grande à cause de la saturation foncière. Dans la moitié nord de la forêt classée, l'exploitation forestière a dégradé les formations forestières denses. Cependant, on note que les limites de la forêt classée du Haut Sassandra ont été relativement bien respectées et surtout, la moitié sud de la forêt classée est encore bien conservée puisque la forêt dense à canopée ouverte s'est transformée par endroits en une forêt dense à canopée fermée.

TABLEAU 7 Évaluation des différents types d'occupation du sol de 1988 à 2001. *Land use types assessment from 1988 to 2001.*

Classes	Surface en ha 1988		Surface en ha 2001		Évolution en (ha) de 1988 à 2001	Évolution annuelle (ha/an)
Forêt dense fermée	40 169,5	24,66 %	28 325	17,38 %	–11 844,5	–911,12
Forêt dense ouverte	60 312	37,02 %	8 734	5,36 %	–5 1578	–3 967,54
Forêt hydromorphe	13 492	8,28 %	25 012	15,35 %	1 1520	886,15
Forêt dégradée	10 502,5	6,45 %	44 686	27,43 %	34 183,5	2 629,5
Cultures	29 183,5	17,91 %	44 856	27,54 %	15 672,5	1 205,58
Sols nus	728	0,45 %	1 917	1,18 %	1 189	91,46
Eau	1 542,5	0,95 %	2 400	1,47 %	857,5	65,96
Sans information	6 970	4,28 %	6 970	4,28 %	0	0
Total	162 900	100 %	162 900			

5. DISCUSSION

L'analyse des matrices de confusion des classifications effectuées montre que les coefficients de Kappa indiquant la performance des classifications sont supérieurs à 92 %. Toutefois, on note quelques confusions entre certaines classes. Ainsi, les confusions notées entre les classes forêts denses fermées et forêts hydromorphes s'expliquent par le fait que la densité de la végétation en 1988 était telle que les sols humides (qui caractérisent les forêts hydromorphes) étaient totalement couverts, ce qui conduit à rapprocher spectralement ces forêts hydromorphes des forêts denses fermées. De même, la classe 3 (forêts dégradées) et la classe 5 (cultures) présentent des confusions avec les autres classes. En effet, les forêts dégradées présentent des confusions avec les forêts denses ouvertes car selon le degré de dégradation de leurs strates arborées supérieures, elles peuvent être semblables au niveau physionomique. Mais, les strates arborées des forêts dégradées dans la partie nord de la forêt classée sont composées d'arbres de très petits diamètres à cause de la forte exploitation forestière que subit la forêt classée. Les arbres de gros diamètres ont été systématiquement prélevés, alors qu'ils sont nombreux dans la forêt dense ouverte. Quant aux cultures, les petites confusions s'expliquent par le fait, qu'ici, elles sont très hétérogènes. Elles sont constituées aussi bien par les plantations de caféiers et de cacaoyers que par les défrichements agricoles et les surfaces ayant servi aux cultures vivrières de l'année précédente après la récolte (jachère). Enfin, les plantations de caféiers et de cacaoyers sont généralement cultivées sous forêt, sur de petites surfaces, et forment des mosaïques « forêt – cultures » qui peuvent être difficilement identifiables isolément sur les images analysées. Néanmoins, l'analyse des résultats obtenus nous permet de dire que, dans ces milieux forestiers, on peut réaliser une assez bonne classification dirigée des images satellitaires.

Au niveau de l'évaluation quantitative des pressions anthropiques, on retiendra que de 1988 à 2001, les surfaces en cultures ont connu une augmentation de plus de 15 000 ha (tableau 7). Cette augmentation s'explique par l'accroissement des surfaces de cultures de rente que sont le cacao et de café. En effet, cette forêt classée est localisée dans un département (Daloa) qui constitue en Côte d'Ivoire la première région productrice de café et cacao (MINAGRA, 1990 ; MINEFOR, 1999).

La surface des forêts denses a subi une forte diminution car, bien qu'ayant un statut de forêt classée, la partie nord de la forêt du Haut Sassandra a été soumise à une exploitation forestière intense qui ne respectait ni les normes d'exploitation des diamètres des essences ni les espèces exploitables telles que définies par les services forestiers (MINEFOR, 1999). On notera que cette région est également la deuxième du pays pour l'exploitation forestière, avec 16,5 % du volume national exploité (MINEFOR, 1999). À l'extérieur de la forêt classée du Haut Sassandra, les résultats des études socio-économiques effectuées tout le long des limites du territoire en 1989 (DCGTX, 1991) et 1998 (MINEFOR, 1999) ont montré que la zone périphérique du massif forestier était fortement cultivée, laissant peu de terres disponibles pour de nouvelles installations.

L'augmentation de la surface des forêts hydromorphes pourrait s'expliquer par le fait, qu'en 1988, une partie des forêts denses fermées était établie sur sols humides ou marécageux, donc des forêts hydromorphes qui n'ont pu être caractérisées compte tenu de la densité du recouvrement végétal. Ceci est confirmé par la confusion entre la forêt hydromorphe et la forêt dense fermée en 1988 (tableaux 4 et 5). En 2001, l'exploitation forestière dans le nord de la forêt classée a réduit le recouvrement des sols humides qui ont été mieux discriminés par les images satellisables. Quant aux surfaces des forêts dégradées, elles ont été multipliées par 5 alors que les surfaces de forêts denses fermées et ouvertes ont régressé. Ainsi, en l'espace de 13 ans, les forêts denses à l'intérieur de la forêt classée sont passées de 113 973,5 ha à 62 071 ha, soit une déforestation de 3 992,5 ha/an (tableau 7).

6. CONCLUSION

L'approche méthodologique adoptée dans cette étude découle des principes déjà utilisés et expérimentés au cours de plusieurs projets d'étude et de cartographie des réserves forestières protégées tropicales à l'aide des données des capteurs des satellites SPOT et Landsat. Cette méthode, dont les différentes phases ont été brièvement décrites, s'est avérée fiable pour discriminer et caractériser les différentes formations forestières denses à canopée fermée et ouverte, forêt hydromorphe, forêt dégradée, les cultures, les sols nus et l'eau (fleuve) présents dans la forêt classée du Haut Sassandra et sa périphérie. Elle a permis de mettre en évidence les différents types de formations végétales et d'estimer quantitativement leur taux de dégradation. En ce qui concerne les images HRV et HRVIR de SPOT de 1988 et 2001, l'interprétation visuelle des compositions colorées standard XS1, XS2, X3S, XS4 nous a permis de séparer les grands types de formation forestières. Cependant elle est apparue insuffisante pour discriminer de façon nette les unités d'occupation du sol dans cette zone

fortement dégradée. Par contre, les compositions colorées réalisées à partir des néocanaux (ACP, NDVI, indice de brillance et de jaunissement) après seuillage et amélioration de la dynamique ont donné de meilleurs résultats.

De même, les classifications dirigées effectuées et complétées par plusieurs missions d'observations sur le terrain ont permis de distinguer les différentes unités de végétation avec une assez bonne précision cartographique (92 à 94 %). L'expérience conduite dans cette région montre que les images SATELLITAIRES que nous avons utilisées sont adaptées pour montrer l'évolution et noter les types de dégradation des formations forestières en zone tropicale. Cependant, une des limites est que de nombreuses observations de terrain sont nécessaires pour interpréter la grande richesse des informations contenues dans les produits spatiaux. L'intérêt majeur de ce travail réside dans le fait que les informations tirées des images SATELLITAIRES permettent de suivre la dégradation des forêts classées et celle des aires protégées soumises aux pressions anthropiques. Les très hautes résolutions des capteurs les plus récents (5 m) seront sans doute un apport précieux dans la détection des types de végétation dégradée.

Remerciements

Les auteurs remercient le CNES qui leur a facilité l'acquisition de l'image HRVIR de SPOT-4 45-336 (BON ISIS 110/226).

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, 243 p.

Achard, F. and Blasco, F. (1990a) 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.

Achard, F. et Blasco, F. (1990b) Rythmes saisonniers de la végétation en Afrique de l'Ouest par télédétection spatiale. *In* P. Lafrance et J.-M. Dubois (dir.) Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse. Collection Universités francophones, Éditions AUPELF-UREF et John Libbey Eurotext, Paris, p. 1-15.

Achard, F., Laporte, N. et Blasco, F. (1993) Suivi de la végétation forestière dense humide en Afrique de l'Ouest par télédétection spatiale. Chapitre 12, *in* F. Bonn (dir.) Télédétection de l'environnement dans l'espace francophone. Presse de l'Université du Québec, p. 221-227.

Achard, F., Eva, H.D., Stibig, H.J., Mayaux, P., Gallego, J., Richards, T., and Malingreau J.P. (2002) Determination of deforestation rates of the world's humid tropical forests. Sciences, vol. 297, n° 5583, p. 999-1002.

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

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

Aubréville, A. (1956) A la recherche de la forêt en Côte d'Ivoire. Bois et Forêts des Tropiques, n° 56-57, p. 17-47.

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

Boyd, D.S. and Duane, W.J. (2001) Exploring spatial and temporal variation in middle infra-red reflectance (at 3,75 µm) measured from the tropical forest of West Africa. International Journal of Remote Sensing, vol. 22, n° 10, p. 1861-1878.

Chevalier, A. (1948) Biogéographie de la forêt dense ombrophile de la Côte d'Ivoire. Revue de botanique appliquée à l'agronomie tropicale, tome 28, nº 305-306, p. 101-115.

Collet, C. (1992) Systèmes d'information géographique en mode image. Lausanne, Presses

polytechniques et universitaires romandes, Collection Gérer l'environnement, n° 7, 186 p.

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.

Crist, E.P. and Cicone, R.C. (1984) A physically-based transformation of TM data – the TM

Tasseled Cap. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 22, n° 3, p. 256-263.

CTFT (Centre technique forestier tropical) (1968) Inventaire des ressources forestières de Côte d'Ivoire. Nogent sur Marne, 18 p.

DCGTX (Direction et contrôle des grands travaux) (1991) Étude socioéconomique des activités agricoles dans la région de la forêt classée du Haut Sassandra. Ministère de l'Agriculture et des ressources animales, République de Côte d'Ivoire, Abidjan, 61 p.

DGTX (Direction et contrôle des grands travaux) (1989) Carte d'occupation du sol de la forêt classée du Haut Sassandra au 1/100 000. 1 feuillet, Abidjan.

Eldin, L. (1971) Le Climat. *In* J. M. Avenard (réd.) Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoire ORSTOM, nº 50, Paris, 391 p.

FAO (2001) FRA 2000 main report. FAO Forestry Paper 140, Rome, 511 p.

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

Imbernon, 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.

Kauth, R.J. and Thomas, GS. (1976) The tasseled cap. A graphic description of the spectral temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. Proceedings of LARS 1976 Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data. Purdue University.

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

Laporte, N. (1990) Étude de l'évolution spatio-temporelle de la végétation tropicale : Utilisation des données satellitaires NOAA AVHRR sur l'Afrique de l'Ouest. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 231 p.

Lupo, F., Reginster, I. and Lambin, F. (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.

Mather, P.M. (1987) Computer Processing of Remotely Sensed Images, John Wiley & Sons, Toronto, 352 p.

Mayaux, P., Gond, V. and Bartholomé, É. (2000) A near-real time forest cover map of Madagascar derived from SPOT-4 VEGETATION data. International Journal of Remote Sensing, vol. 21, n° 16, p. 3139-3144.

MECV (Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie) (1991) Rapport sur l'État de l'Environnement. République de Côte d'Ivoire, Abidjan, 98 p.

MIET (Ministère de l'environnement et du tourisme) (1996) Plan national d'action pour l'environnement. République de Côte d'Ivoire, Abidjan, 179 p.

MINAGRA (Ministère de l'agriculture et des ressources animales) (1990) Annuaire des statistiques agricoles et forestières, tomes 1 et 2. République de Côte d'Ivoire, Abidjan, 180 p.

MINEFOR (Ministère des eaux et forêts) (1999) Étude du bilan diagnostic du secteur forestier de Côte d'Ivoire. République de Côte d'Ivoire, Abidjan, 273 p.

Nguessan, É. (1993) Suivi de l'évolution d'une forêt dense tropicale humide soumise à des pressions agricoles. *In* Dubois, J.-M.M., Cavyas, F. et Lafrance, P. (réd.) Télédétection appliquée à la cartographie thématique et topographique. Éd. AUPELF-UREF et Les presses de l'Université du Québec, Québec, p. 263-271.

Nguessan, É. (1994) Étude par télédétection de l'évolution de l'environnement périlagunaire en Côte d'Ivoire. Chap. 8, *in* F. Bonn (dir.) Télédétection de l'environnement dans l'espace francophone. Les Presse de l'Université du Québec, Québec, p. 147-159.

Nguessan, É. et Condé, A. (1988) Cartographie des massifs forestiers par télédétection. Cas de la forêt du Haut Sassandra en Côte d'Ivoire. Proceedings of the 22nd International Symposium on Remote Sensing of Environment, Abidjan, Côte d'Ivoire, 20-26 octobre 1988, vol. 1, p. 445-465.

Nguessan, É. et Condé, 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 KORHOGO 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.

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

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

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.

SODEFOR (Société de développement de plantation forestières) (1976) Inventaire forestier national. Résultats de la Région du Centre, Sud, Nord, Ouest, République de Côte d'Ivoire. Abidjan, 54 p.

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.