

16

Détection et évolution saisonnière des sols salés et acidifiés du domaine fluvio-marin de basse Casamance au Sénégal, par imagerie satellitaire

BERNARD MOUGENOT*, PATRICK ZANTE** et JEAN-PIERRE MONTOROI**

*ORSTOM, Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération, 70-74, route d'Aulnay, 93143 Bondy, France, téléphone : 48-47-31-95, télex : 235 453 F, télécopieur : 48-47-30-88

**ORSTOM, B. P. 1386, Dakar, Sénégal, téléphone : 32-34-80, télex : 468 SG, télécopieur : 32-43-07

Résumé

La région de basse Casamance au sud du Sénégal subit un déficit pluviométrique depuis 1968. Le domaine fluvio-marin le long du fleuve Casamance est en permanence envahi par les eaux marines. Les conséquences pour les sols et les nappes de bas-fond sont un accroissement de la salinité et une acidification consécutive à la baisse des nappes. La végétation naturelle de mangrove s'amenuise et la riziculture en domaine salé disparaît. L'imagerie satellitaire SPOT multitudes permet de suivre l'évolution saisonnière des états de surface et leur cartographie à partir des luminances. L'étude de séquences-test met en évidence de bonnes relations entre les états de surface et des caractères hydro-pédologiques. Des cartes dérivées de salinité des sols et des nappes sont extraites.

1 Présentation

La diminution des précipitations observée depuis une vingtaine d'années en zone sahélienne a également affecté des régions plus humides comme la basse Casamance au sud du Sénégal

(fig. 1). La station de Ziguinchor a enregistré une baisse des précipitations moyennes annuelles de 430 mm (fig. 2) entre les années 1921-1967 (1577 mm) et 1968-1988 (1148 mm). La principale conséquence est une modification du fonctionnement hydro-pédologique de ce milieu envahi par les eaux marines.

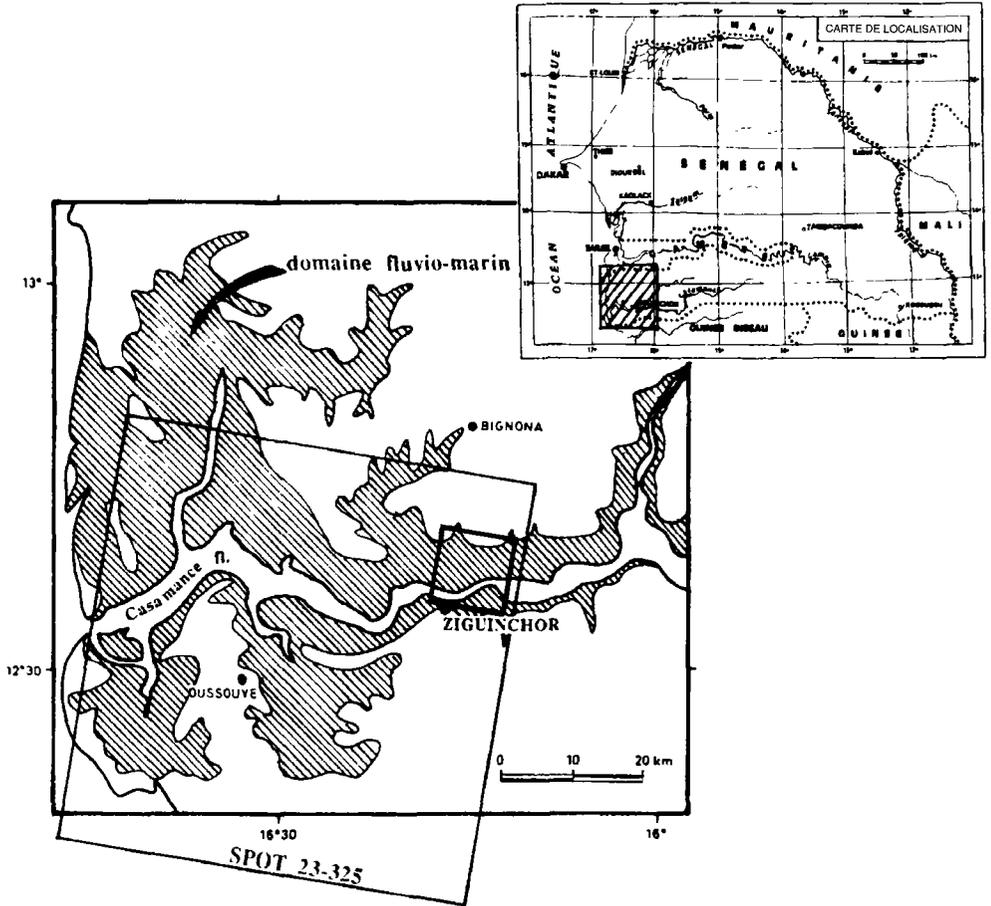


Figure 1. Carte de localisation

1.1 Le milieu

En aval de l'actuelle ville de Ziguinchor, l'ancien golfe nouakchottien s'est progressivement comblé entre 5000 et 1500 ans AA. Le domaine fluvio-marin est organisé en trois grandes unités de paysage le long du réseau hydrographique finement digité vers un plateau peu élevé (20 à 40 m) :

- bas-fond (couvert de palétuviers, salé et régulièrement envahi par les marées);
- tannes (étendues dénudées ou peu couvertes, hypersalées et très acides, régulièrement inondées);
- terrasses (peu ou non salées et acides).

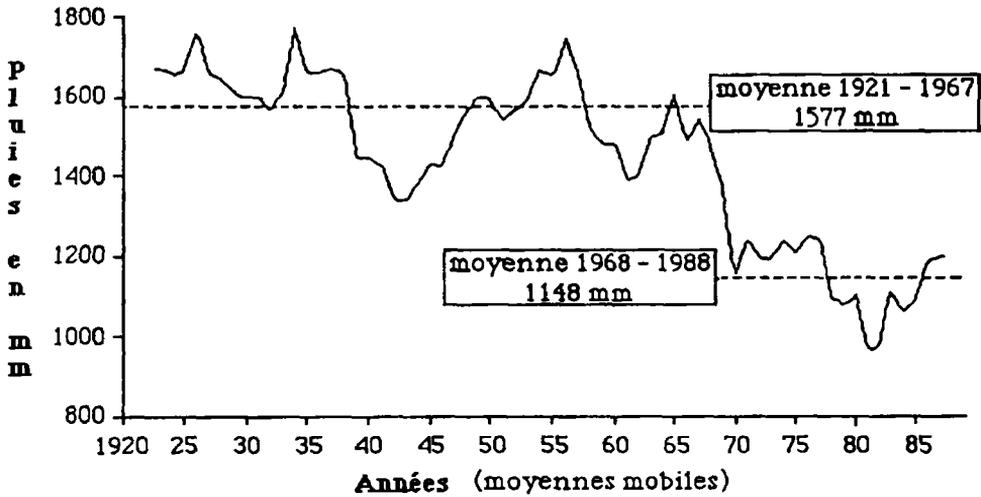


Figure 2. Évolution des précipitations moyennes annuelles de 1921 à 1988

En saison sèche sous l'effet de l'évaporation, les sels se concentrent dans la partie supérieure des nappes (bas-fond, tannes) et s'accumulent à la surface des sols salés à battement de nappe saisonnier (tannes).

La végétation de mangrove à *Rhizophora* est à l'origine d'une concentration de sulfures dans les sols (Marius, 1985). Leur présence entraîne, après une exondation prolongée, une acidification brutale, forte (pH 7 à < 3 en quelques jours) et irréversible.

1.2 Évolution actuelle

Le fleuve Casamance fonctionne actuellement en estuaire inverse. Son régime hydrologique très déficitaire et la faible pente favorisent l'intrusion pratiquement permanente des eaux marines qui se concentrent pendant les huit mois environ de saison sèche (Pagès *et al.*, 1987).

Le déficit et la mauvaise répartition des pluies a entraîné :

- une augmentation de salinité des nappes et des sols atteignant 2 à 3 fois et plus celle de l'eau de mer;
- une diminution du niveau moyen du toit des nappes superficielles de quelques centimètres à plusieurs mètres sous le plateau;
- l'acidification des sols de mangrove et de certaines terrasses.

Les conséquences sur la végétation naturelle sont catastrophiques avec en particulier la disparition progressive puis totale de la mangrove depuis l'embouchure vers l'amont. Elle laisse la place à des sols nus et à de nouveaux tannes. La riziculture traditionnelle en domaine salé a disparu et se limite à une partie des terrasses, aux parties hautes de vallées et en amont des aménagements anti-sel (Barry *et al.*, 1988).

L'absence d'une couverture aérienne récente sur l'ensemble de la région et l'évolution rapide des états de surface rendaient difficile la réalisation d'un bilan précis sur le milieu. Seule la télédétection spatiale apportait une solution. L'imagerie satellitaire SPOT a été utilisée pour réaliser une évaluation des zones atteintes par l'accroissement de la salinité et de l'acidité. Le milieu «mangrove» se prête bien à cette démarche du fait de la présence

d'espèces monospécifiques bien organisées dans le paysage et d'états de surface à évolution saisonnière contrastée (Berenger, 1985; Populus et Herz, 1985).

2 Matériel et méthode

2.1 Programmations SPOT et acquisition des données de terrain

La résolution au sol de 20 m des données multispectrales du satellite SPOT est adaptée à l'observation des états de surface définis comme l'interface sol-atmosphère (Escadafal, 1989). Des programmations ont été réalisées en fin de saison des pluies (12/10/1986) et fin de saison sèche (08/05/1987) pour la caractérisation d'unités dynamiques à partir des deux extrêmes saisonniers favorables à la prise des images. Les sites de contrôle au sol sont implantés sous forme d'une trentaine de séquences-test réparties sur l'image, du plateau vers les marigots. Les travaux de terrain sont réalisés dans la période d'acquisition des images et au cours de l'année le long des séquences : descriptions des états de surface et photographies verticales depuis un mat de 6 m, photographies aériennes à basse altitude, prélèvements des sols et des nappes.

2.2 Traitements des données numériques

Les séquences sont repérées sur une composition colorée réalisée à partir des canaux bruts étalés. On échantillonne à l'écran les différents états de surface observés sur le terrain (5 à 10 environ par séquences). Ces zones sont classées (classification ascendante hiérarchique) d'après leurs réponses spectrales sur les canaux bruts et différents indices (indice de végétation : $XS3 - XS2 / XS3 + XS2$; indice de brillance : $(XS2^2 + XS3^2)^{1/2}$). L'utilisation des valeurs moyennes des canaux bruts XS2, XS3 et accessoirement XS1, a été suffisante (Guillemyn *et al.*, 1988) pour réaliser une classification dirigée des états de surface aux deux saisons (distance euclidienne). La superposition des images des deux dates permet de lever la plupart des confusions radiométriques. Cette classification est testée sur des séquences de contrôles à partir des photographies aériennes réalisées sur place.

Le document de base est une carte thématique d'états de surface multidates représentée ici à l'échelle de 1:80 000 (fig. coul. 16-3). L'intérêt de ce document est d'associer à chaque thème des données exogènes, non directement perçues par les capteurs. Elles sont obtenues sur les séquences-test au moment de la description et de l'analyse des échantillons. Les états de surface dans le paysage jouent le rôle de marqueurs de caractères hydro-pédologiques. Nous nous sommes ici intéressés à la salinité et l'acidité des sols et des nappes, principales contraintes à la mise en valeur de ce milieu.

3 Résultats

3.1 Cartographie des états de surface

On distingue sur la carte des états de surface, après regroupements, les six grandes unités suivantes, classées en fonction de l'inondation par les marées et les pluies, des parties basses du paysage vers les parties hautes :

1) mangroves hautes en bon état ou en voie de dégradation, quotidiennement inondées, sur bas-fond vers l'embouchure et le long de la Casamance;

2) mangroves hautes à basses dégradées et vasières, quotidiennement inondées aux marées moyennes, sur bas-fond;

3) surfaces nues à croûtes salines et micro-agrégats en saison sèche, inondables à rarement inondables, sur tannes vifs;

4) surfaces à strate herbacée halophile ou non, inondables à rarement inondables, sur tannes herbues;

5) surfaces à strate herbacée, arbustive à arborée, et rizières, sur terrasses;

6) surfaces à strate arborée à arbustive (palmeraie dominante), herbacée, et cultures sèches, limites entre le domaine fluvio-marin et le plateau.

Le pH neutre à faiblement acide *in situ* dans les sols de mangroves actives ou dégradées (sols potentiellement sulfatés acides) s'accroît brutalement sous les tannes (sols sulfatés acides). L'augmentation de la salinité se manifeste par la présence d'une végétation adaptée arborée à arbustive (palétuviers), puis herbacée halophyte, et dans les cas extrêmes avec des surfaces nues à croûtes salines ou à structure micro-agrégée. Sur les terrasses, les sols sont plus évolués, acides à localement hyperacides. Le front salin pénètre sous les basses terrasses.

La diminution de hauteur et de densité des palétuviers (Blasco, 1989), en général *Rhizophora* puis *Avicennia* en retrait, se produit sous l'action du stress salin. Du point de vue morphologique, les peuplements à *Rhizophora* constituent plutôt des plages homogènes alors que ceux à *Avicennia*, seul ou en mélange, forment des bosquets isolés ou anastomosés sur un sol nu plus clair. La combinaison de ces facteurs de terrain permet une bonne distinction radiométrique des types de mangroves.

Les deux dates apportent des informations complémentaires. En saison sèche par rapport à la saison des pluies, la strate herbacée n'est plus active et les rizières possèdent souvent des luminances de sols nus (confusions avec les tannes). La végétation pérenne se différencie selon l'importance des effets du stress hydrique et surtout salin. La dessiccation modifie la structure des horizons de surface salés et rarement inondés.

À partir de ce document synthétique, des cartes dérivées sont établies directement d'après les éléments décrivant les états de surface et leur évolution saisonnière : cartes de végétation, des zones cultivées, des zones inondables, et grâce aux données exogènes : cartes de salinité et d'acidité des sols et des nappes. Chaque unité correspond à un ou plusieurs thèmes radiométriques «états de surface». La légende exprime l'intervalle moyen de variation saisonnière ou spatiale du caractère étudié pour chaque unité.

3.2 Cartes des états de surface et du pH - exemple au nord de la ville de Ziguinchor

L'extrait de la carte des états de surface présenté à la figure couleur 16-3 correspond à une zone très dégradée au nord de la ville de Ziguinchor (15 thèmes de sols et d'eaux). La végétation de mangrove ne subsiste qu'en liséré le long des marigots (*Rhizophora racemosa* et *mangle*, associés à *Avicennia africana*). En arrière s'étalent des vasières nues régulièrement couvertes par les marées et d'autant plus salées que l'on s'éloigne des axes de drainage.

La figure couleur 17-4 représente la carte du pH de l'horizon de surface (mesures *in situ*). À chaque unité correspond un intervalle de pH (variation spatiale). L'importance de la gamme de pH observée sur les terrasses (unité 2) est due à la présence de sulfates d'aluminium non décelables radiométriquement. Les unités 4 et 5 pourraient être isolées comme domaines potentiellement acides du fait de la présence de sulfures dans les sols.

4 Commentaires

Des confusions existent encore entre des états de surface de tannes et de basses terrasses salées à faible couverture végétale (<15%), et entre des hautes terrasses et le plateau. Au moment de la superposition des images, les unités qui apparaissent à la limite des thèmes communs sont affectées à l'état de surface le plus proche.

Les pixels mal classés atteignent 5 à 15% selon les unités et parfois plus quand les limites correspondent aux domaines saturés par la marée au moment de l'acquisition. C'est le cas entre les états de surfaces des sols nus de bas-fond et des tannes.

L'extension des classifications réalisées à partir de séquences-test à une partie de l'image n'est satisfaisante que si le milieu possède un degré de dégradation et un stade de marée similaires. Il est donc nécessaire de découper au préalable l'image selon l'état de la mangrove et l'apparition de sols nus plus ou moins exondés de l'aval vers l'amont. Ceci pose rapidement des difficultés de raccordement entre les cartes et une multiplicité des thèmes.

Une approche plus globale consistera à mieux stratifier l'ensemble de l'image et à travailler sur les unités de paysage. Elles peuvent être définies en tenant compte de la structure de l'image en relation avec le réseau hydrographique et l'évolution saisonnière de la végétation. Une délimitation manuelle est aussi envisageable. Cette démarche s'avère d'autant plus indispensable que la couverture totale de la basse Casamance nécessite plusieurs images.

5 Conclusions

L'imagerie satellitaire est ici un outil adapté à la cartographie des états de surface et à la détection de caractères chimiques des sols et des nappes. L'approche diachronique permet une classification liée à l'évolution saisonnière des états de surface. La généralisation de cette méthode nécessite de mettre en évidence au préalable les structures du paysage. Particulièrement dans ce milieu, les cartes d'états de surface et de caractères doivent être actualisées. Cette étude pourra servir de référence pour des suivis ultérieurs, en particulier sur les nombreuses vallées aménagées.

6 Références

- BARRY, B., P. BOIVIN, D. BRUNET, J.-P. MONTOROI, B. MOUGENOT, J. L. SAOS, J. TOUMA et P. ZANTE, 1988. Sécheresse et modification des ressources hydriques en basse Casamance, conséquences pour le milieu naturel et son aménagement. — Deuxièmes Journées de l'eau au Sénégal, Eau et développement, 8-10 décembre 1988, Dakar, 22 p.
- BERENGER, A. C., 1985. Reconnaissance des terrains salés par télédétection. — Institut de la carte internationale du tapis végétal, CNRS/Université Paul-Sabatier, Toulouse, 39 p.
- BLASCO, F., 1989. Recherches en télédétection sur les mangroves africaines. — Bulletin de la Société française de photogrammétrie et télédétection, n° 114, 1989-2, p. 17-19.
- ESCADAFAL, R., 1989. Caractérisation de la surface des sols arides par observation de terrain et télédétection. Applications : exemple de la région de Tataouine (Tunisie). — Collection Études et thèses, Éditions ORSTOM, Paris, 317 p.

Détection et évolution saisonnière des sols salés et acidifiés du domaine fluvio-marin de Casamance

- GUILLEMYN, D., C. MARTEL, G. FLOUZAT et F. BLASCO, 1988. Études des forêts de berge de Gambie et des critères de détection de la mortalité. —SPOT-1 : Utilisation des images, bilan, résultats, Paris, novembre 1987. Cepadues Éditions, Toulouse, p. 113-120.
- MARIUS C., 1985. Les mangroves du Sénégal, écologie, pédologie, géochimie, mise en valeur et aménagement. —Collection Travaux et documents, n° 193, Éditions ORSTOM, Paris, 357 p.
- PAGÈS, J., J. P. DEBENAY et J. Y. LEBRUSQ, 1987. L'environnement estuarien de Casamance. —Revue Hydrobiologie tropicale, 20, 3-4, p. 191-202.
- POPULUS, J. et R. HERZ, 1985. Cartographie des mangroves de la côte sud-est du Brésil avec Landsat TM. —Photo-interprétation, n° 85-2, p. 31-37.

17

Étude de l'évolution de la végétation du «V Baoulé» (contact forêt/savane en Côte d'Ivoire) par télédétection

KOUAKOU ÉDOUARD N'GUESSAN

Département de botanique et biologie végétale, Faculté des sciences et techniques, Université d'Abidjan, 22 B. P. 582, Abidjan 22, Côte d'Ivoire

Résumé

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet pilote PNUD/FAO-IVC/87/006 intitulé «Suivi du couvert végétal». L'exploitation des données satellitaires SPOT et Landsat a permis de discriminer la répartition des différentes formations végétales au contact des secteurs soudanien et guinéen ivoiriens, précisément dans la région du «V Baoulé», zone de mosaïque forêt/savane.

À l'aide de ces images, il a été possible de mettre en évidence l'évolution du couvert végétal de cette région sous l'effet d'actions d'origines diverses : défrichements agricoles, feux de brousse et urbanisation croissante.

Les traitements numériques effectués ont permis d'obtenir une classification supervisée de ces images, validée par des observations de terrain, et de noter les divers stades de dégradation de la forêt jusqu'aux différents types de savane.

Il ressort de cette étude que l'imagerie satellitaire utilisée permet de faire une cartographie qui rend compte de l'évolution d'ensemble de la région et de mesurer effectivement le sens de cette évolution.

1 Introduction

Cette étude entre dans le cadre du projet PNUD/FAO pour le suivi du couvert végétal de la zone forestière de la Côte d'Ivoire. On sait que la forêt ivoirienne subit, depuis plusieurs

années, de fortes pressions diverses entraînant une dégradation dramatique des ressources naturelles renouvelables. L'importance de cette dégradation des formations végétales naturelles a de graves incidences aussi bien sur la production agricole et le potentiel ligneux que sur l'écosystème en général.

Toutes les études effectuées par divers auteurs (Chevalier, 1909; Aubreville, 1957; Lanly, 1969) sur le couvert forestier national ont stigmatisé la régression régulière des ressources végétales. En effet, si au début de l'ère coloniale le pays disposait d'une belle couverture forestière naturelle estimée à 15 millions d'hectares, les différents inventaires établis par l'administration forestière ont révélé que la déforestation s'est faite à un rythme accéléré.

Ainsi, il ressort qu'entre 1956 et 1966, le rythme moyen de déforestation était de 28 000 ha/an et, entre 1966 et 1980, de 31 000 ha/an.

On estime également que le taux de boisement de la région forestière est passé de près de 60% en 1956 à moins de 20% en 1966.

Cette dégradation de la végétation naturelle concerne aussi les savanes guinéennes largement défrichées pour l'acquisition de nouvelles surfaces agricoles. Pour ces savanes, ce phénomène est accentué par le fait que, même abandonnées après les cultures, elles sont parcourues de nouveau par les feux saisonniers.

La destruction régulière des formations naturelles végétales est due à diverses activités si bien que celles-ci évoluent des stades primaires de la forêt dense aux différents faciès de dégradation et de reconstitution et enfin à l'invasion des surfaces par l'agriculture.

Cette dernière, dans bien des cas, est pratiquée sans fertilisant ou rotation culturale et est itinérante. Tout ceci est accéléré également par une démographie et une urbanisation croissante.

Face à la disparition du couvert forestier national, le gouvernement ivoirien a reconnu, comme préalable à toute action de planification et de gestion, la nécessité d'acquérir les données de base indispensables à l'élaboration de façon prioritaire et urgente d'une politique de développement et de gestion agro-sylvo-pastorale équilibrée.

Il est également nécessaire d'étudier et de cartographier les changements du couvert végétal de même que de mettre au point une méthode de surveillance de la déforestation et un système capable de protéger effectivement les zones classées et leurs espèces. Pour cela, le point sur l'état de l'occupation du sol en général et du couvert végétal en particulier est à réaliser le plus rapidement possible.

L'utilisation des données satellitaires à haute résolution SPOT et Landsat TM permet de mettre en évidence, comprendre et analyser les mécanismes des différents changements.

L'exploitation de ces données est donc importante pour déterminer et suivre les différentes évolutions. L'étude du «V Baoulé», zone de contact forêt/savane, entre dans ce cadre.

En effet, la répartition des types de végétation dans cette zone au contact des secteurs guinéen et soudanien a connu de nombreuses investigations scientifiques il y a plusieurs années. Bien que la problématique de cette question ne soit pas encore entièrement élucidée, ce sujet est depuis une dizaine d'années relativement moins bien étudié. Cela est essentiellement lié aux limites des moyens traditionnels d'études. Avec l'apport de l'imagerie satellitaire, la problématique ne réside plus dans la connaissance de l'origine climatique, édaphique ou anthropique des savanes, comme c'était le cas dans les études classiques, mais dans la mise en évidence du sens de l'évolution de la végétation dans la zone de contact elle-même.

Ainsi, la divergence des conclusions, avancé ou recul forestier, provient du fait que jusqu'ici les différentes études ne permettent pas de faire une généralisation car les stations d'observations, toujours peu nombreuses, ne suffisent pas pour montrer une évolution d'ensemble.

Actuellement, tout porte à croire que le sens de l'évolution est favorable à la savanisation; il n'a, en fait, jamais été mesuré ou quantifié effectivement.

2 Objectifs de l'étude

Les objectifs de cette étude, décrits dans le document de ce projet IVC/87/006, sont les suivants :

a) À long terme :

- «Donner aux organisations gouvernementales les moyens de disposer d'une information précise et actuelle sur la gestion et la protection des ressources naturelles de la Côte d'Ivoire»;
- «Permettre une plus grande efficacité dans l'inventaire et la cartographie des surfaces et dans le suivi et l'évolution des ressources naturelles».

b) À court terme :

- «Apporter une assistance dans l'analyse et l'interprétation des images satellitaires pour la gestion des ressources naturelles»;
- «Réaliser des études méthodologiques sur des zones-tests utilisant la télédétection avec des cibles choisies».

Cette étude pilote «Suivi du couvert végétal» entre dans cet objectif immédiat car son but est d'étudier l'évolution de la zone de contact forêt/savane dans la région du «V Baoulé» (Yamoussoukro-Toumodi-Dimbokro).

Elle s'appuie sur deux projets actuellement en cours qui sont :

- la réalisation et la mise à jour de la carte des forêts classées de la Côte d'Ivoire au 1:100 000 par télédétection;
- la réalisation et la mise à jour de la carte d'occupation du sol pour l'ensemble du territoire au 1:100 000 par télédétection.

3 Approche méthodologique pour la classification de la végétation étudiée : principe et caractéristique

L'étude et la cartographie de la couverture végétale naturelle ou cultivée exigent au préalable que l'on définisse les types de végétation à délimiter. Ceci suppose non seulement que l'on ait une bonne connaissance des formations concernées, mais impose surtout l'adoption de principes et concepts de classification adéquats.

Une revue sommaire des concepts et classifications de la végétation naturelle existants montre que, depuis Humboldt en 1805, de nombreux auteurs ont essayé de définir et classer les types de végétation avec des critères variés, fondés :

- soit essentiellement sur les caractères propres de la végétation elle-même tels que la physionomie et la flore des groupements végétaux (Beard, 1944; Aubreville, 1956);
- soit principalement sur les paramètres climatiques tels que la température et la pluviométrie (Aubreville, 1949);
- soit sur des caractères écologiques et dynamiques en montrant la relation entre la végétation et le milieu ainsi que l'action du facteur biotique (Champion et Seth, 1968).

Il apparaît que les critères de classification de la végétation sont peu nombreux et peuvent être regroupés et rattachés en quatre ordres de considérations qui sont physionomiques, écologiques, floristiques et évolutives.

Par contre, on dénombre une multitude de systèmes de classification définis selon une terminologie propre à chaque auteur suivant un objectif particulier, créant ainsi une grande confusion dans la nomenclature des formations végétales.

Afin d'utiliser des systèmes de classification couramment employés et universellement reconnus et acceptés, des classifications internationales ont été définies. Pour le monde tropical, on distingue essentiellement :

- la classification de Yangambi (Trochain, 1957) fondée principalement sur des bases physionomiques mais également écologiques; elle s'applique surtout à l'Afrique;
- la classification de l'UNESCO (1973), qui est un essai de classification universelle, établie en vue d'une cartographie de la couverture végétale mondiale à petite échelle; elle est basée sur la physionomie et la structure en liaison aux habitats ou environnements écologiques importants.

L'analyse des différents types de classification cités montre que les principes et concepts de classification doivent dépendre en premier lieu des objectifs de l'étude et également correspondre à la nature des éléments étudiés. Ils doivent enfin être compatibles avec les classifications déjà existantes dans le monde tropical.

Dans le cas de cette étude, la zone du «V Baoulé», cadre de l'étude, constitue en elle-même une région possédant un contexte écologique et floristique caractéristique; dans cette région, nous nous sommes attachés à définir les types de formations végétales selon les classifications de Yangambi et de l'UNESCO. L'action humaine est également considérée surtout dans l'interprétation des images satellitaires car les types de végétation sont classés en tenant compte aussi de leur degré d'ouverture donc en fonction de leur état de dégradation. Ainsi, les différents faciès de dégradation et de reconstitution pris par les formations végétales à la suite des interventions humaines sont notés.

La carte d'Adjanohoun et Guillaumet (1971) était notre document de référence.

4 Présentation de la zone d'étude

4.1 Localisation

La zone d'étude (fig. 1) couvre les départements de Yamoussoukro, Toumodi et Dimbokro sur une superficie d'environ 632,11 km² et est comprise entre les fleuves Bandama à l'ouest et N'Zi à l'est.

Elle occupe ainsi l'interfluve de ces deux fleuves. La partie sud a la forme d'un profond saillant constituant une grande échancrure de savane ouverte dans la forêt dense formant un «V» couramment appelé le «V Baoulé». C'est la partie méridionale de la zone de contact forêt/savane qui matérialise le passage entre le domaine guinéen au sud et le domaine soudanien au nord. Cette zone est située entre les longitudes 5° E et 6° O et les latitudes 7° N et 6° S.

4.2 Climat, sols et végétation

4.2.1 Climat

La zone étudiée est entièrement soumise au climat équatorial de transition atténué (climat baouléen) caractérisé par une saison sèche qui dure de novembre à avril et précède une saison des pluies marquée par deux maxima pluviométriques : pluviosité de 1 200 à 1 600 mm/an. Le déficit hydrique cumulé varie de 250 mm à 450 mm.

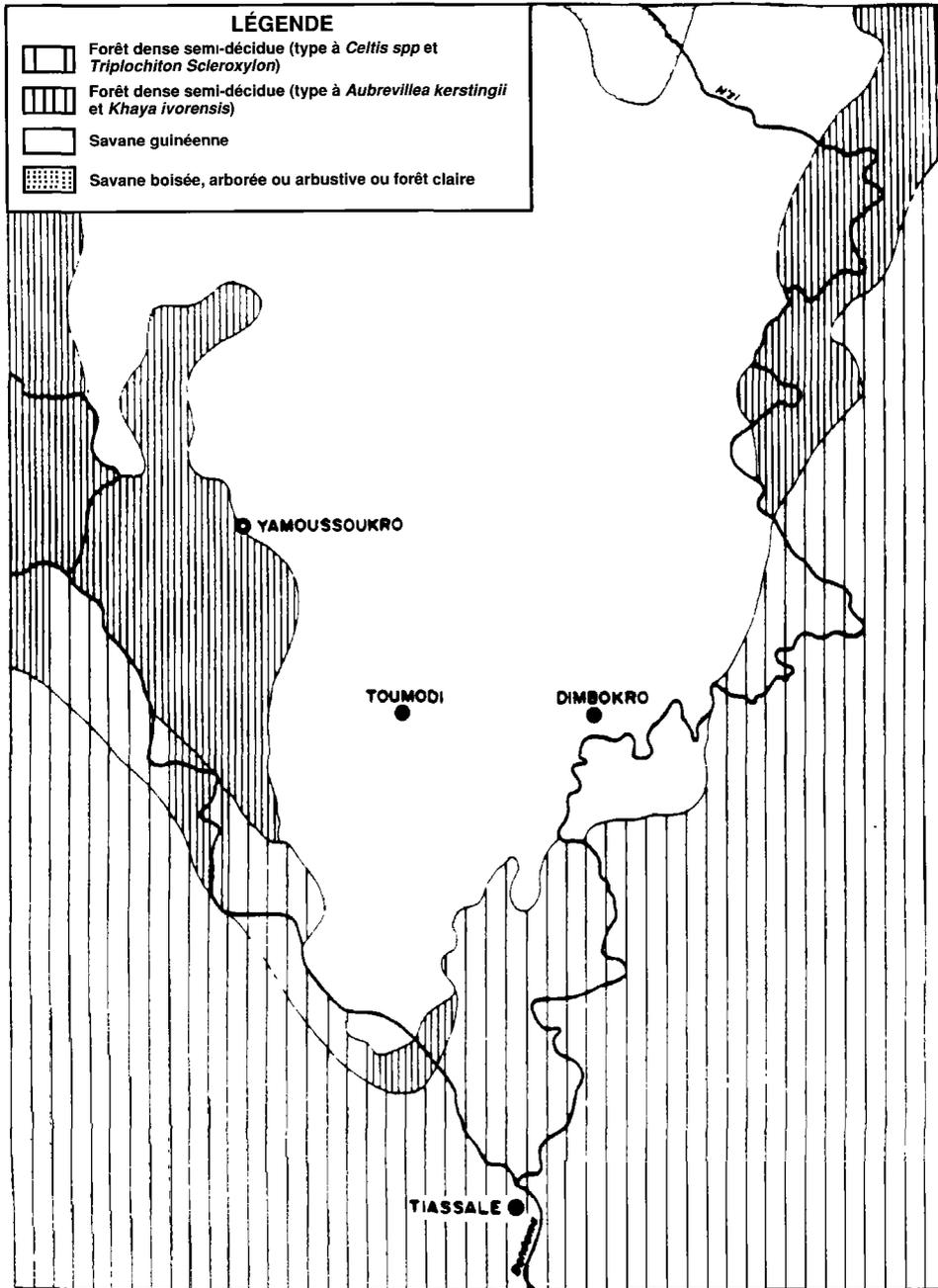


Figure 1. Zone d'étude du «V Baoulé»

4.2.2 Sols et sous-sol

Le sous-sol de la région est constitué par de vastes massifs granitiques et de roches métamorphiques et schisteuses en longues chaînes orientées NNE-SSO. Les points culminants de cette zone (450-500 m) sont l'Orumbo-Boka, le Kokumbo et le mont Dodo.

On rencontre de nombreux types de sols juxtaposés dans cette région. Ce sont des sols ferrallitiques plus ou moins remaniés, des sols ferrugineux dérivés des colluvions granitiques sableuses. Ces derniers sont localisés dans le couloir du N'Zi et dans la région de Toumodi.

4.2.3 Végétation

La végétation est une mosaïque de savane guinéenne et de forêt dense humide semi-décidue type à *Celtis spp* et *Triplochiton Scleroxylon* et type à *Aubrevillea kerstingii*.

La savane guinéenne est, quand à elle, composée généralement de hautes graminées parmi lesquelles on distingue des arbres et arbustes de dimensions variables et des forêts-galeries densément boisées autour des cours d'eau.

5 Données utilisées

Nous disposons pour cette étude des données suivantes :

- cartes topographiques de l'Institut géographique de Côte d'Ivoire (IGCI) au 1:200 000 de 1971;
- carte de végétation de la Côte d'Ivoire au 1:500 000 (Adjanohoun et Guillaumet, 1971);
- deux images multispectrales SPOT et TM sur bandes magnétiques (image SPOT 49-337 du 03/08/86; image TM 196-56 du 05/12/84);
- deux tirages sur papier en compositions colorées au 1:100 000 des images précédentes;
- cartes d'occupation du sol au 1:100 000 des départements de Yamoussoukro, Dimbokro, Toumodi réalisées au Service autonome de télédétection de la Direction et contrôle des grands travaux de Côte d'Ivoire (SAT/DCGTx).

6 Méthode

La méthode utilisée pour réaliser cette étude comprend les différentes phases suivantes.

6.1 Collecte des données

Au cours de cette phase, nous avons collecté toutes les données nécessaires pour une connaissance meilleure et approfondie de la région du «V Baoulé». Ce sont des données bibliographiques sur les caractéristiques climatiques, géomorphologiques, pédologiques et sur la végétation, de même que les nombreuses études réalisées sur la station expérimentale de Lamto située à 5° 02' de longitude ouest et 6° 13' de latitude nord dans cette région.

Nous avons aussi procédé à la réalisation du fond planimétrique de la carte à partir des films au 1:100 000 des cartes topographiques IGCI d'où sont extraits les réseaux hydrographique et routier et certains détails caractéristiques.

Nous avons aussi recalé sur ce calque les images satellitaires SPOT et TM qui sont également au 1:100 000.

6.2 Analyse visuelle

Elle a consisté à faire une interprétation visuelle, c'est-à-dire l'application de la méthode classique de la photo-interprétation à l'image satellitaire. Ainsi, l'examen des compositions colorées des tirages papiers Geopic et SPOT a permis d'identifier des zones homogènes grâce aux critères de couleurs et des textures.

Ces zones correspondent à des unités physiologiques de végétation sur le terrain. L'interprétation est facilitée par la corrélation entre les tonalités de couleur sur les compositions colorées et notre connaissance de la végétation et de l'écologie de cette zone.

Les contours de ces différentes unités physiologiques ont été tracés sur les compositions colorées. Cette interprétation a permis de déterminer les unités thématiques suivantes :

- forêt dense à canopée fermée;
- forêt dense à canopée ouverte;
- forêt dégradée;
- mosaïque de cultures et de végétation (forêt ou savane);
- forêt-galerie;
- bois fourrés, savane boisée;
- savane arborée, savane arbustive;
- savane herbeuse;
- cultures (industrielles ou vivrières);
- sols nus (inselberg, affleurements rocheux, sols indurés et cuirasses), habitations;
- étendues d'eau libre (barrages, retenues d'eau et mares), fleuves.

Les compositions colorées analysées sont les tirages SPOT et TM (Geopic) réalisés respectivement selon les canaux 3, 2 et 1 (pour SPOT) et 3, 4 et 7 (pour TM).

6.3 Étude de terrain

Une mission d'étude sur le terrain a été effectuée du 22 au 27 mai 1989 dans la zone-test. Elle avait pour but de :

- reconnaître et définir les différentes formations végétales et toutes les autres unités thématiques selon leurs réponses spectrales sur les compositions colorées;
- caractériser les types de végétation en fonction de leur physiologie, leur composition floristique et leur évolution;
- vérifier les résultats de l'interprétation visuelle des images satellitaires et apporter des précisions pour les zones difficiles à interpréter, soit à cause des nuages (très présents sur l'image TM), soit à cause des feux de brousse, très nombreux dans cette région;
- contrôler le calage géographique en fonction de certains repères parfaitement identifiables tels que les villages, les carrefours de pistes, les coudes de cours d'eau ou le croisement des fleuves N'Zi et Bandama;
- noter l'impact de l'action humaine dans cette évolution de la végétation;
- indiquer, si possible, tous les changements reconnus à partir de la comparaison de l'interprétation visuelle préliminaire des images satellitaires et de la carte de végétation d'Adjahoun et Guillaumet;
- apporter d'autres informations impossibles à extraire des images satellitaires comme la stratification des différentes formations végétales.

L'observation directe du paysage aide donc dans la compréhension des réponses spectrales des entités au sol et permet de saisir le rôle des ligneux suivant leur densité dans ces réponses.

Cette mission sur le terrain s'est faite en s'appuyant sur toutes les cartes déjà disponibles et les interprétations préliminaires des images satellitaires.

6.4 Validation de l'interprétation par les données de terrain

Cette étape a permis d'améliorer l'interprétation visuelle. Elle a consisté à transférer les données acquises sur le terrain sur le calque d'interprétation des images étudiées, permettant ainsi soit de corriger l'interprétation soit de la compléter. Ainsi, les contours et les formes des unités physiologiques délimitées essentiellement sur les images satellitaires ont été reconnus et vérifiés au cours de la mission sur le terrain. Certaines unités homogènes suffisamment représentatives de la diversité de la zone entière, reconnues au préalable sur les images et sélectionnées sur l'itinéraire de terrain, ont été contrôlées pour la vérification de leur homogénéité réelle. C'est à l'intérieur de ces unités homogènes qu'ont été choisies les parcelles d'entraînement ou d'apprentissage dans la classification supervisée lors des traitements numériques.

6.5 Traitements numériques

L'analyse visuelle est soumise à des risques d'erreurs et à des confusions car la photo-interprétation des compositions colorées d'images satellitaires comporte certaines difficultés liées à celles-ci.

Ainsi, des objets identiques peuvent avoir des couleurs et des teintes différentes d'une image à l'image. La séparation des thèmes peut également être difficile à délimiter visuellement.

Nous avons donc été amené à effectuer des traitements numériques afin d'affiner les résultats de l'analyse visuelle en utilisant les données quantitatives et qualitatives des images traitées par des moyens informatiques. Ces traitements ont été effectués sur le système de traitement d'images du SAT/DCGTx.

La totalité des deux images SPOT (44-337) et TM (196-56) a été visualisée grâce au système I²S. Ensuite, après seuillage et amélioration de la dynamique, une composition colorée pour l'ensemble de l'image SPOT selon les canaux 3-2-1 et une autre pour l'image TM selon les canaux 4-7-3 ont été réalisées.

Notons que l'image TM (196-56) comporte un très fort pourcentage de nuages. Ce qui rend son exploitation impossible dans certaines parties.

6.5.1 Découpage des fenêtres et réalisation des compositions colorées

La suite des traitements s'est effectuée sur un micro-ordinateur avec le logiciel DIDACTIM. Compte tenu de la capacité de mémoire du micro-ordinateur utilisé, nous avons choisi de travailler sur des fenêtres de 512 par 512 pixels correspondant à des carrés de 10,24 km de côté.

Ainsi, six fenêtres de 512 par 512 pixels très représentatives de la diversité du milieu d'étude que constitue la zone du «V Baoulé» ont été choisies.

La composition colorée améliorée de l'une de ces six fenêtres est présentée à la figure couleur 17-2.

6.5.2 Les indices de végétation

Nous avons procédé à la création d'un nouveau canal issu de la combinaison linéaire des canaux rouge (R) et proche infrarouge (PIR). L'équation utilisée est la suivante : $IV = (PIR - R) / (PIR + R)$, où IV est un indice de végétation.

Il présente l'avantage d'être sensible au taux de couverture au sol et à la biomasse.

La visualisation de l'indice de végétation nous a permis de distinguer les formations boisées très denses, les formations peu denses et les zones très dégradées ou les sols nus, figure couleur 17-3.

6.5.3 Les parcelles d'apprentissage

Ces parcelles d'apprentissage sont la base des traitements effectués. À partir des observations de terrain, les parcelles ont été localisées et toutes tracées sur les compositions colorées qui représentent mieux la vérité terrain.

Leurs contours ont été délimités en évitant de prendre en compte les pixels de bordure afin de limiter la variabilité intraparcellaire.

6.5.4 Classification supervisée

Grâce au logiciel DIDACTIM, une classification barycentrique a été effectuée à partir des caractéristiques statistiques des classes relevées dans chacun des canaux lors de la phase d'apprentissage (tableau I). Ensuite, après avoir vérifié la qualité de l'apprentissage grâce au calcul de la matrice de confusion, la classification a été généralisée à l'ensemble de l'image. Ces traitements ont ainsi permis d'améliorer les résultats de l'analyse visuelle et de préciser les contours des unités thématiques.

Tableau I. Valeurs statistiques des parcelles d'apprentissage pour les différents thèmes dans les canaux bruts de SPOT

Classes	XS1		XS2		XS3	
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
Forêt dense à canopée fermée	40,7	0,9	23,5	0,7	93,0	6,4
Forêt dense à canopée ouv., galerie forest.	40,9	1,1	23,7	1,4	76,6	5,0
Forêt dégradée	41,5	0,7	23,4	0,5	109,8	3,9
Savane arborée ou arbustive	44,4	1,2	29,6	1,5	65,8	4,7
Savane herbeuse	45,5	0,9	26,6	0,8	107,9	3,9
Sols nus	60,1	4,5	49,7	3,9	65,8	4,1
Eau	37,1	0,6	21,4	0,6	24,6	2,2

7 Résultats

7.1 La classification supervisée

Le résultat de la classification supervisée obtenue sur la fenêtre-test de Toumodi est visualisé sur la figure couleur 17-4. Sur cette image classée, on distingue les forêts denses à canopée fermée (en rouge pur), les forêts denses à canopée ouverte (en rose), les forêts dégradées (en marron), les savanes arborées et arbustives (en vert), les savanes herbeuses (en jaune vif), les sols nus et zones dégradées (en blanc) et les étendues d'eau, fleuve et lac (en bleu marine).

Le tableau II donne le pourcentage des unités thématiques (classes) discriminées sur cette fenêtre classée.

Tableau II. Fenêtre Toumodi

Classes	Effectifs	%
1 : Forêt dense à canopée fermée	11 884	4,53
2 : Forêt dense à canopée ouv., gal. forest.	52 469	20,02
3 : Forêt dégradée	1 380	0,53
4 : Savane arborée ou arbustive	167 326	63,83
5 : Savane herbeuse	13 101	4,99
6 : Sols nus	15 617	5,96
7 : Eau	367	0,14
Total	262 144	100,00

Pour chaque classe, le programme informatique calcule dans chaque canal la moyenne des valeurs des points de tous les échantillons de la classe et l'écart type (tableau I).

La matrice de confusion de la classification a été calculée (tableau III). Cette matrice permet de vérifier la qualité de l'apprentissage et donne une estimation de la validité de la classification. On constate également les confusions spectrales entre les différentes classes.

Tableau III. Matrice de confusion de la classification effectuée à partir des canaux bruts de SPOT

Classes	Numéro de la classe de réaffectation						
	1	2	3	4	5	6	7
1 : Forêt dense à canopée fermée	90,5	0,4	1,7	0,0	0,2	0,0	0,0
2 : Forêt dense à canopée ouv., gal. forest.	3,6	91,7	0,1	4,2	0,4	0,0	0,0
3 : Forêt dégradée	2,7	0,0	97,3	0,0	0,0	0,0	0,0
4 : Savane arborée ou arbustive	3,3	5,8	2,0	93,3	0,4	0,2	0,0
5 : Savane herbeuse	1,3	0,0	0,0	0,0	97,5	1,9	0,0
6 : Sols nus	0,0	0,0	0,0	0,1	2,0	97,9	0,0
7 : Eau	0,0	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	98,9

Dans ce tableau, les lignes représentent l'affectation des pixels à chaque thème après classification, alors que les colonnes indiquent la répartition réelle des pixels dans chaque thème. La diagonale représente les pourcentages des pixels bien classés.

On constate que toutes les classes sont discriminées avec un pourcentage supérieur à 90%.

Le contrôle de la classification 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.

7.2 Les unités physiologiques

Toutes ces investigations, à savoir l'interprétation visuelle des compositions colorées, standards et améliorées, l'étude sur le terrain et les traitements numériques, nous ont servi à

discriminer les différentes unités de végétation de la zone étudiée et à établir la carte de la végétation à l'échelle du 1:100 000.

Les unités physionomiques représentant les différents aspects de la végétation de la zone du «V Baoulé» déterminées dans cette étude constituent la légende de la carte établie à l'issue de cette étude. Cette légende comprend les formations végétales, les sols nus et les unités carto-topographiques.

7.2.1 Les formations végétales

a) Végétation naturelle

1) Forêt dense à canopée fermée

Cette formation n'est plus représentée dans la zone du «V Baoulé» qu'à l'état de vestiges dans certains endroits accidentés ou difficiles d'accès comme sur les montagnes de Kokoumbo et de l'Orumbo-Boka. On la rencontre aussi localement sur de faibles superficies à l'ouest non loin des berges du Bandama et au sud-est de la zone étudiée.

Cette forêt est composée de plusieurs strates généralement denses ou caducifoliées. 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. Selon la présence des espèces caractéristiques qui la peuplent, on distingue deux types forestiers :

- le type à *Celtis spp* et *Triplochiton scleroxylon* correspondant au type fondamental le plus méridional et le plus humide de la forêt semi-décidue qui sert de transition avec la forêt sempervirente; on l'appelle encore «moist semi-décidue»;

- le type à *Aubrevillea kerstingii* et *Kaya grandifolia* qui constitue le type le plus septentrional et le moins hygrophile.

L'évolution prévisible est la disparition rapide de ces formations en équilibre précaire pour deux raisons : d'une part, le climat se caractérise certaines années par une saison sèche plus marquée et d'autre part, la densité de population est extrêmement élevée et sans cesse croissante.

Cette forêt dense à canopée fermée est identifiable facilement sur les images satellitaires. Sur les compositions colorées standards comme améliorées analysées, elle apparaît en bleu foncé à bleu noir, bleu verdâtre et de texture granuleuse (sur le Geopic TM) et en rouge foncé à rouge noir (sur la composition colorée SPOT).

2) Forêt dense à canopée ouverte

Elle 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.

Dans ces ouvertures, la lumière favorise le développement d'une strate de nature herbacée et arbustive dense. Le taux de couverture des strates supérieures arborescentes est de 85 à 95%.

Cette forêt provient de la dégradation de la forêt dense à canopée fermée. Elle s'identifie très bien sur les images satellitaires par sa très forte densité. Elle apparaît sur les compositions colorées par sa couleur rouge à rose, sa texture identique à celle de la forêt dense à canopée fermée avec des taches roses ou oranges de textures lisses plus ou moins grandes.

3) Forêt dégradée

Ce type forestier découle de la dégradation des deux formations précédentes. Cette dégradation est provoquée soit par l'exploitation forestière soit par l'implantation de l'agriculture. Ce type forestier se retrouve un peu éparpillé et quelquefois en lambeaux dans la zone de la région du «V Baoulé».

Sa physionomie peut s'apparenter à celle d'un taillis. C'est une forêt appauvrie qui se présente sous une forme beaucoup plus mitée que la précédente, la canopée étant très ouverte par des trouées d'origine anthropique plus nombreuses. On y rencontre une strate inférieure herbacée et arbustive favorisée par la pénétration de la lumière jusqu'au sol. Le taux de couverture des arbres peut descendre jusqu'à 60% (fig. coul. 17-5).

Du point de vue de l'évolution, on peut dire que cette formation est vouée à la disparition d'ici quelques années si la dégradation incessante à laquelle elle est soumise n'est pas arrêtée.

Sur l'image satellitaire, l'identification de cette forêt est due à son aspect morcelé lié à son hétérogénéité et aux défrichements qui la minent. Sur les compositions colorées analysées, elle apparaît en rouge pâle à rose et un mélange de taches foncé à rose.

4) Forêt-galerie (galerie forestière)

Cette formation souligne dans le paysage le réseau hydrographique. Elle est généralement moins large, formant une frange étroite d'environ 500 m de largeur car elle est liée à des cours d'eau de moindre importance, permanents ou temporaires. Ces galeries forestières trouvent sur leurs berges des conditions d'humidité suffisantes pour leur plus ou moins grand développement à travers les savanes. Dans cette zone, elle constitue un véritable prolongement de la forêt dense.

Physionomiquement, elle se présente sous forme d'une végétation fermée dans laquelle on peut retrouver les traits marquants de la forêt dense tels que les arbres à contre-forts, les épiphytes, les lianes, etc.

Elle est facilement identifiable sur les images satellitaires car elle suit la forme du réseau hydrographique : cours d'eau et ruisseau. Elle apparaît en rouge pur et rouge sombre sur les compositions colorées (SPOT et TM).

5) Savane arborée/savane arbustive

Ces deux types de savanes constituent la végétation la plus largement représentée dans le «V Baoulé» (fig. coul. 17-6). Elles sont constituées d'arbres et d'arbustes disséminés parmi le tapis graminéen. La savane est dite arborée quand la densité de la strate arborescente varie entre 2 à 20%. Elle est constituée de trois strates.

La savane arbustive est, quand à elle, composée d'un tapis graminéen surmonté d'arbustes. L'étage arbustif a un recouvrement qui ne dépasse pas 20% et sa hauteur atteint rarement 5 m. Cette savane comprend également trois strates. Elle est basse et très espacée avec un couvert herbacé pouvant être dégradé par la présence de sols nus qui apparaissent par endroit. Ces deux types de savanes, savane arbustive et savane arborée, sont dits à Rhonier (*Borassus aethiopum*) eu égard à la présence importante de cette espèce dans ce milieu.

Ces savanes sont soumises chaque année à l'action des feux qui revigorent les graminées et maintiennent les ligneux pyro-résistants très rustiques s'accommodant bien aux incendies.

Ces formations, lorsqu'elles sont protégées des feux, peuvent évoluer vers des broussailles puis vers la savane boisée.

Sur l'image satellitaire, les savanes arborées et arbustives ont un aspect assez uniforme, quelle que soit leur écologie, et elle sont très bien identifiées. Les feux qui les parcourent sont également bien visibles. Elles apparaissent en bleu foncé et en vert-bleu sur les compositions colorées et sur le Geopic du TM analysé en vert-bleu et en vert piqué de points rouges.

6) Les savanes herbeuses

Cette formation est caractérisée par un tapis graminéen continu où arbres et arbustes sont généralement absents. La hauteur du couvert herbacé ne dépasse pas deux mètres. La strate herbacée est dominée par des graminées dont l'importance permet de distinguer plusieurs faciès ou groupements.

La savane herbeuse à *Loudetia simplex* est le groupement le plus représenté dans le «V Baoulé». Elle est présente depuis la pointe du «V Baoulé» de Singrobo aux environs de

Toumodi et s'étend également vers l'est dans la région de Dimbokro. On la rencontre aussi sur la péninsule granitique située entre l'Orumbo-Boka et Toumodi. Elle présente une structure régulière et homogène.

Au nord-est de la région d'étude de part et d'autre du Kan, affluent du fleuve N'Zi (au nord-est de Toumodi), on a le groupement à *Loudetia arundinacea*.

Ces savanes herbeuses occupent généralement les plateaux cuirassés aux sols peu profonds et les bas de versants aux sols alternativement saturés en eau puis très secs. Sur sols drainés, elles sont post-culturelles et de faibles étendues. Atteignant 1,5 m à 2 m en fin de saison des pluies, ces graminées sont brûlées chaque année durant la saison sèche. Cette formation herbeuse est bien discriminée sur les images satellitaires. Elle apparaît en bleu clair sur la composition colorée SPOT et en vert clair sur le TM analysé.

b) Les formations liées à l'action anthropique

Très souvent, les plantations diverses sont mêlées à d'autres formations végétales naturelles plus ou moins dégradées. Ce sont par exemple des cultures de caféiers, de cacaoyers, d'ignames, de bananes et de manioc.

Ces plantations ne sont pas identifiables isolément sur les images satellitaires car elles peuvent être plus denses que les formations naturelles. Ainsi, il est difficile dans ces cas de les distinguer sur les images analysées.

On a donc regroupé ce complexe de cultures et formations naturelles sous le terme de mosaïque.

1) Mosaïques

Cette unité physiologique est utilisée pour caractériser un thème chaque fois que celui-ci, trop faible par sa superficie pour être différencié seul à l'échelle de cette étude, est disséminé à l'intérieur d'un autre plus vaste.

2) Mosaïque forêt/cultures

Dans ce cas, on a une forêt mitée par des cultures de café et de cacao ou des cultures vivrières telles que l'igname et le manioc réduisant ainsi la forêt en lambeaux. Selon l'importance de l'état du mitage et de la dégradation de la forêt, on a la mosaïque forêt/cultures avec dominante forêt. Cette mosaïque, sous la pression de l'agriculture, évolue vers une mosaïque forêt/cultures avec dominante cultures et finalement, la formation forestière naturelle disparaît. Sur l'image satellitaire, cette formation constitue une entité «homogène» caractéristique et identifiable.

3) Mosaïque savanes/cultures

Ici, le milieu originel qui constitue la végétation naturelle est la savane. Selon le degré de mitage des savanes par l'agriculture, on rencontre dans le «V Baoulé» deux types de mosaïque savanes/cultures. Les mosaïques savanes/cultures avec dominantes savanes (50% < savane < 90%) et les mosaïques savanes-cultures avec dominantes cultures (10% < savane < 50%).

4) Les cultures

Ce thème englobe tous les types de cultures pratiqués par les paysans des régions du «V Baoulé», c'est-à-dire aussi bien les cultures vivrières sur défrichement itinérant telles que l'igname et le manioc que les cultures pérennes sur de plus grandes superficies comme le café, le cacao et l'ananas. Les parcelles en cours de défrichement au moment des enregistrements satellitaires font aussi partie de ce thème.

5) Les cultures vivrières

La culture vivrière rencontrée dans cette partie du pays est surtout la culture de l'igname, aliment de base des populations Baoulé, à laquelle peuvent s'ajouter les cultures de manioc et de maïs ou de riz dans les bas-fonds.

6) Les cultures industrielles

Dans cette région du «V Baoulé», on rencontre comme cultures industrielles les plantations de cacaoyer, de caféier et d'ananas.

Les plantations de caféier et de cacaoyer sont généralement cultivées sur de petites surfaces et peuvent être aussi denses que les formations naturelles. Elles ne sont pas identifiées isolément sur les images satellitaires analysées. Il est difficile de les distinguer des formations naturelles.

Par contre, les plantations industrielles d'ananas qui ont une structure et une physionomie propres peuvent être reconnues sur les images satellitaires.

Selon leur état phénologique, elles peuvent avoir une réponse voisine des savanes mais leur structure régulière et leur aspect homogène sont des critères de distinction très nets. Ces plantations d'ananas sont localisées dans la pointe du «V Baoulé» dans la région de Singrobo. Elles apparaissent avec des formes géométriques bien distinctes soit en rouge, soit en bleu clair ou vert selon leur état phénologique.

7.2.2 Les sols nus

Sous ce thème ont été regroupés les sols indurés et les cuirasses latéritiques, les inselbergs et les affleurements rocheux et les zones dégradées. Ces zones sont parfaitement identifiables sur les images satellitaires. Sur les compositions colorées analysées, elles apparaissent en couleur blanche à grise blanchâtre à bleutée.

7.2.3 Les unités carto-topographiques

Ces unités, qui ont été matérialisées sur la carte réalisée, sont :

- pistes et routes bitumées et non bitumées;
- villes, villages importants;
- fleuves, cours d'eau, étendues d'eau libre (barrages, retenues d'eau, mares, lacs, marécages).

8 Conclusion

Cette étude a permis de déterminer et discriminer, par télédétection, les types de végétation d'une zone de contact forêt-savane dans la région du «V baoulé».

Les images satellitaires SPOT et TM utilisées ont permis de réaliser une cartographie de la végétation à l'échelle du 1:100 000 de la zone d'étude couvrant une superficie de 632 110 ha.

Cette étude a été faite par interprétation visuelle à partir des documents de base constitués par les compositions colorées SPOT et Geopic de Landsat TM. Les doutes et les confusions au niveau de la discrimination et l'identification des formations végétales dans les cas les moins évidents ont été résolus grâce aux traitements numériques effectués avec beaucoup de précisions sur ces zones et la vérité terrain.

Suivant les critères de reconnaissance et d'interprétation utilisés dans cette étude, on a pu distinguer :

- les formations forestières denses (leur structure homogène ou hétérogène indique leur état de dégradation);
- les types de savanes (savanes boisées, arborées, arbustives, herbeuses), entrecoupés par les galeries forestières qui bordent le réseau hydrographique et quelques îlots de boisements denses;

- les formations artificielles telles que les mosaïques à structure hétérogène et morcelée, les cultures et les sols nus;

- les types particuliers d'occupation du sol tels les défrichements récents et les avancés en inclusion dans les unités forestières et contrastant fortement avec ces dernières.

N'ayant pu disposer d'images satellitaires à des époques différentes pour une cartographie diachronique de la végétation de la zone-test, nous avons pris comme carte de référence pour suivre l'évolution du couvert forestier, la carte de végétation de Adjanonhoun et Guillaumet qui date de 1971.

On constate qu'il y a eu une régression des surfaces des forêts denses dans cette région. Ainsi, les forêts denses semi-décidues à *Celtis spp* et *Aubrevillea kerstingii* qui couvraient de larges surfaces d'environ 233 430 ha en 1971 le long du Bandama et du N'Zi, de même que dans la pointe sud du «V» formé par ces deux fleuves, ont été largement détruites. Il ne reste plus que 18 114 ha de forêts à canopée fermée d'après la carte réalisée par télédétection à la suite de cette étude.

Il ressort donc de cette étude que l'interprétation visuelle d'images satellitaires ou des traitements numériques simples mais fiables et performants permettent de suivre l'évolution du couvert végétal tropical de façon précise.

En effet, les grands types physionomiques de végétation ligneuse et d'occupation du sol sont facilement identifiés de même que les changements au niveau des formations végétales, les occupations agricoles à l'intérieur des unités forestières et l'intensité d'utilisation des sols.

On peut considérer que la méthode utilisée dans ce projet pilote, qui associe à la fois l'analyse visuelle, les traitements numériques, les contrôles de vérité-terrain et une bonne connaissance de l'écologie, de la flore et de la physionomie des types de végétation du milieu d'étude, est satisfaisante.

Elle est opérationnelle et peut donc être étendue à d'autres régions du territoire ivoirien et surtout constituer un moyen pratique pour la surveillance continue du couvert végétal.

9 Références

- ADJANOHOUN, E. et J. L. GUILLAUMET, 1971. La végétation de la Côte d'Ivoire. —in J. M. Avenard *et al.* Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoires ORSTOM, n° 50, Paris.
- AUBREVILLE, A., 1949. Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale. —Société d'édition géographique, maritime et coloniale, Paris.
- AUBREVILLE, A., 1956. Essai de classification et de nomenclature des formations forestières africaines avec extension du système proposé à toutes les formations forestières du monde tropical —Dactylographié.
- AUBREVILLE, A., 1957. À la recherche de la forêt en Côte d'Ivoire. —Bois et forêts des tropiques, n°s 56 et 58, Nogent-sur-Marnes.
- BEARD, J. S., 1944. Climax végétation in tropical America. —Ecology, 25 (2).
- CHAMPION, H. G. et S. K. SETH, 1968. A revised survey of the forest types of India. —Delhi.
- CHEVALIER, 1909. L'extension et la régression de la forêt vierge de l'Afrique tropicale. —CR AC SC t-149, p. 458-461.
- LANLY, J. P., 1969. Régression de la forêt dense en Côte d'Ivoire. —Bois et forêts des tropiques, 127, Nogents-sur-Marne, p. 45-59.

TROCHAIN, J. L., 1957. Accord inter-africain sur la définition des types de végétation de l'Afrique tropicale. —Bulletin de l'Institut d'État de Centrafrique, nouvelle série, n^{os} 13 et 14, Brazzaville, p. 55-93.

UNESCO, 1973. Classification internationale et cartographie de la végétation. —UNESCO, Paris.

18

Étude par télédétection de l'évolution de l'environnement péri-lagunaire de Bingerville, Bassam et Ono

KOUAKOU ÉDOUARD N'GUESSAN*, YOUPO OREGA** et MAMADOU FOFANA**

**Faculté des sciences et techniques, Université d'Abidjan, 22 B. P. 582, Abidjan 22, Côte d'Ivoire*

***Service autonome de télédétection, Direction et contrôle des grands travaux, 04 B. P. 945, Abidjan 04, Côte d'Ivoire*

Résumé

Des photographies aériennes de 1956 et des données satellitaires de décembre 1987 fournies par Landsat TM ont été utilisées pour étudier l'évolution d'un milieu particulier faisant partie de la zone péri-lagunaire.

Ces données ont été exploitées selon la méthode de photo-interprétation classique pour les photographies aériennes et pour le tirage papier de l'image satellitaire. Des améliorations apportées par traitement numérique ont contribué à affiner l'interprétation de l'image satellitaire. Ce travail présente l'état d'occupation du milieu en 1956 et décembre 1987. En conclusion, il apparaît que les zones marécageuses difficiles à mettre en valeur avec les moyens traditionnels des paysans sont les mieux conservées alors que les zones de forêts sur sols fermes ont toutes été colonisées par l'agriculture ou remplacées par des jachères plus ou moins anciennes.

1 Introduction

L'exploitation des ressources naturelles sans ménagement particulier conduit parfois à des dégradations irréversibles de certains milieux. Il paraît donc indispensable de procéder à une

évaluation environnementale systématique de l'état actuel des ressources naturelles dites renouvelables afin d'assurer leur contrôle et de prévoir leur tendance.

La télédétection, qui permet une vision globale des phénomènes, est le moyen d'étude privilégié pour contribuer à assurer une meilleure gestion de l'environnement. C'est dans ce cadre qu'a été initiée cette étude sur l'environnement péri-lagunaire compte tenu des spécificités qu'il présente dans ses composantes biotiques, en particulier ses formations végétales climaciques composées de mangroves, de forêts marécageuses, de forêts denses sur sol à forte humidité édaphique et de forêts denses de sol ferme bien drainé.

Le milieu d'étude a été choisi en fonction des documents photographiques disponibles, soit entre les lagunes Adjin, Potou et Ono situées dans les zones d'influence de Bingerville et Grand-Bassam.

Des photographies aériennes des missions AOF 1955-56 et CIV 046-400 de 1973 et l'image Landsat TM de 1987 de Grand-Bassam ont fourni les données de comparaison pour étudier l'évolution des différentes composantes du milieu.

2 Documents de référence

Les documents suivants ont été utilisés :

- carte de l'Institut géographique de Côte d'Ivoire (IGCI) au 1:200 000, feuille de Grand-Bassam, 2^e édition, juin 1965;
- photographies aériennes : mission OAF 1955-56 NB-30-IX-X, noir et blanc, 1:50 000; mission CIV 046-400, noir et blanc, 1:10 000;
- image Landsat TM : tirage Geopic du quart de l'image Grand-Bassam (embouchure Comoé) TM 3, 4 et 7, cadre 195 56, quadrant 3, 31/12/87; données numériques des canaux 4, 5 et 7 sur bande magnétique.

3 Présentation du milieu d'étude

Le milieu d'étude, choisi dans le sud-est de la Côte-d'Ivoire, est circonscrit plus précisément entre la lagune Potou et le fleuve Comoé jusqu'à leur confluent au sud, la lagune Ono à l'est, la rivière Mé à l'ouest et l'axe routier Alépé-Ahoutoué au nord (fig. 1).

Il fait partie d'un ensemble de bas-plateaux s'étageant de 40 à 50 m d'altitude et correspondant à des sédiments tertiaires argilo-sableux à sable fin ou argileux issus d'alluvions récentes recouvrant le socle. Dans l'ensemble, ce relief plat s'accompagne d'un mauvais drainage qui détermine les sols hydromorphes (Avenard, 1971).

Ce milieu appartient au secteur ombrophile du domaine guinéen soumis à un régime pluviométrique équatorial de transition caractérisé par des précipitations annuelles comprises entre 1 400 et 2 500 mm. Quatre principales formations végétales climaciques se partagent ce milieu :

- les forêts marécageuses à *Symphonia globulifera* (Guittifères) et *Mitragyna ciliata* (Rubiaceés);
- la forêt dense sempervirente à *Diospyros spp.* (Ebenacées) et *Mapania spp.* (Cypéracées) sur sol à forte capacité de rétention en eau; cette forêt renferme les espèces les plus hygrophiles du secteur ombrophile;
- la mangrove sur sol hydromorphe à gley le long de la lagune Potou;
- la forêt dense sempervirente de sol ferme.

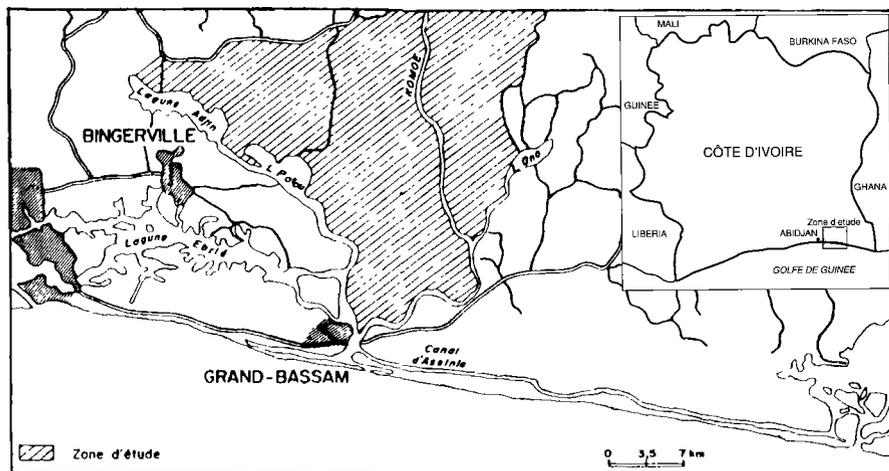


Figure 1. Localisation de la zone d'étude et de l'image Landsat TM 195-56 Q3

4 Méthode

La réalisation de cette étude s'est opérée selon la démarche suivante.

4.1 Création d'un fond de carte

À partir de la carte IGCI au 1:200 000, il a été rédigé un fond planimétrique au 1:50 000 contenant le réseau hydrographique, les routes et l'habitat. Cette échelle a été choisie pour permettre le report direct des thèmes identifiés sur les photographies aériennes qui sont au 1:50 000.

4.2 Analyse des photographies aériennes

Les photographies aériennes ont été analysées sous stéréoscope à miroir pour délimiter, sur un calque d'interprétation, des plages ayant une même apparence physiologique suivant les différentes nuances de gris.

Après le montage d'une mosaïque sommaire, les unités délimitées ont été reportées sur le fond planimétrique au 1:50 000 par ajustement local.

4.3 Analyse visuelle de la composition colorée de l'image Landsat TM

L'analyse de la composition colorée des canaux 3, 4 et 7 du tirage Geopic et de la visualisation à l'écran de la composition colorée des canaux 4, 5 et 7 (fig. coul. 18-2) a d'abord consisté à extraire les thèmes carto-topographiques (réseau hydrographique, routes, habitat, etc.) et à délimiter ensuite les thèmes ayant le même rendu coloré.

4.4 Vérité terrain

Cette étape a été rendue nécessaire pour valider la nomenclature de certains thèmes proposée après l'exploitation des photographies aériennes et de la composition colorée de l'image Landsat. Elle a en outre permis de réaliser une classification supervisée dans l'étape du traitement numérique.

4.5 Traitement numérique

La composition colorée en trichromie classique (rouge, vert et bleu) des canaux TM3, TM4 et TM7 ayant déjà permis d'interpréter tous les éléments du milieu, le traitement, dont le but est l'amélioration de la perception visuelle des informations, a été limité à une classification supervisée (fig. coul. 18-3) et à la visualisation de l'indice de végétation (fig. coul. 18-4).

Un apprentissage avec six classes dans deux fenêtres de 512 par 512 pixels renfermant toutes les informations a été généralisé à l'ensemble de la zone d'étude par classification barycentrique. Des couleurs ont été affectées aux classes principales et le résultat a été imprimé au 1:69 000 grâce à une imprimante Tektronix.

4.6 Évaluation de l'évolution

Les plages de texture et de structure homogènes délimitées sur les photographies aériennes de 1956 ont été comparées au rendu visuel des surfaces équivalentes sur l'image satellitaire de 1987.

5 Remarques sur les données photographiques et satellitaires

Les photographies aériennes de la mission AOF 1955-56 qui ont été utilisées comme point de départ (temps initial) de l'étude sont de qualité médiocre et à une échelle qui ne permet pas une bonne discrimination des tons de gris. Les limites des différents thèmes ne sont donc pas nettes et ne peuvent se prêter à un planimétrage précis.

Les photographies de la mission CIV 046-400 de 1973, qui sont de bonne qualité, ont simplement contribué à confirmer certaines structures mises en évidence sur les documents de référence (1956).

Les données satellitaires, qui peuvent subir différents traitements numériques fiables et faciles à réaliser, permettent de tracer les contours précis des thèmes.

C'est pourquoi les données chiffrées des superficies ne sont qu'approximatives pour l'état de 1956 alors qu'elles sont assez précises pour 1987.

6 Règle d'interprétation

Le tableau I présente la règle d'interprétation des photographies aériennes et de l'image satellitaire.

Tableau I. Règle d'interprétation des photographies aériennes et de l'image satellitaire

Unité d'occupation	Photographies aériennes noir et blanc 1:50 000	Composition colorée (TM 3-4-7) 1:100 000
Forêt marécageuse (mangrove)	gris moyen homogène, cimes basses et compactes	rouge grenat
Forêt dense sur sol à forte humidité édaphique (forêt hydrophile)	gris sombre différencié	brun verdâtre
Forêt dense de sol ferme	gris sombre différencié, cimes hétérogènes	rouge dense
Forêt dégradée	mosaïque de gris sombre et de gris clair	moucheté de jaune, orange et bleu
Jachères ou cultures pérennes ombragées	gris clair à gris moyen	mosaïque de taches bleu - orange, jaune
Culture herbacée ou recû herbeux	gris clair	jaune
Habitat	gris très clair, structure quadrillée	blanc bleuté
Eau	gris sombre	noir

7 Résultats

7.1 Phase d'interprétation

7.1.1 Apport des photographies aériennes

L'analyse des photographies aériennes a permis de proposer la nomenclature suivante (fig. 5) :

a) Végétation

- forêt marécageuse : elle apparaît sous forme de plages gris-moyen homogène; sous stéréoscope, les cimes sont assez compactes et basses par rapport aux formations de sol ferme;

- forêt dense de sol ferme : elle apparaît sous forme de plages gris-sombre différenciées; les cimes apparentes sont très hétérogènes;

- forêt dégradée : elle se présente sous forme d'une mosaïque de gris-sombre avec des cimes différenciées et de gris-clair sans cimes apparentes;

- mosaïque jachère-culture : elle apparaît sous forme d'une mosaïque de gris-moyen sans structure apparente et de gris-clair le long des voies de communication et autour des villages (la notion de jachère a été étendue à toute végétation spontanée non forestière).

b) Autres thèmes

- habitat : il est représenté par de petites plages gris-clair à blanc avec une structure quadrillée;

- eau : la réponse de l'eau varie du gris-sombre au blanc suivant son éclairage par le soleil;

- voies de communication : elles correspondent à des traits gris-clair à blanc reliant les structures quadrillées (habitat).

c) Analyse globale

Le report des différents thèmes sur le fond de carte met en évidence cinq secteurs homogènes (fig. coul. 18-2, 18-3 et 18-4) :

- le secteur de N'guechié à l'ouest du milieu d'étude;
- le secteur de Bono sur la rive droite du fleuve Comoé, au nord de N'gokro;
- le secteur du lac Kessiemie au centre-nord du milieu d'étude;
- le secteur de Atouanou entre la lagune Potou et le village de Atouanou;
- le secteur péri-lagunaire de Potou.

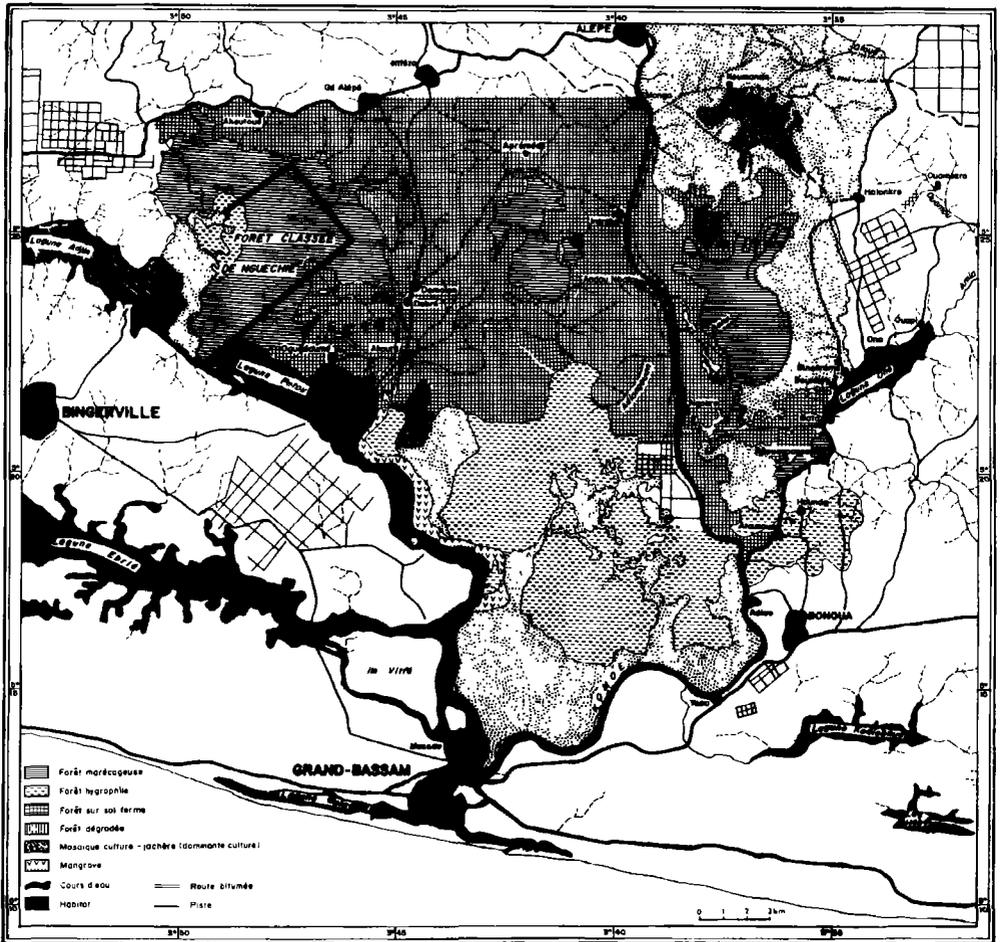


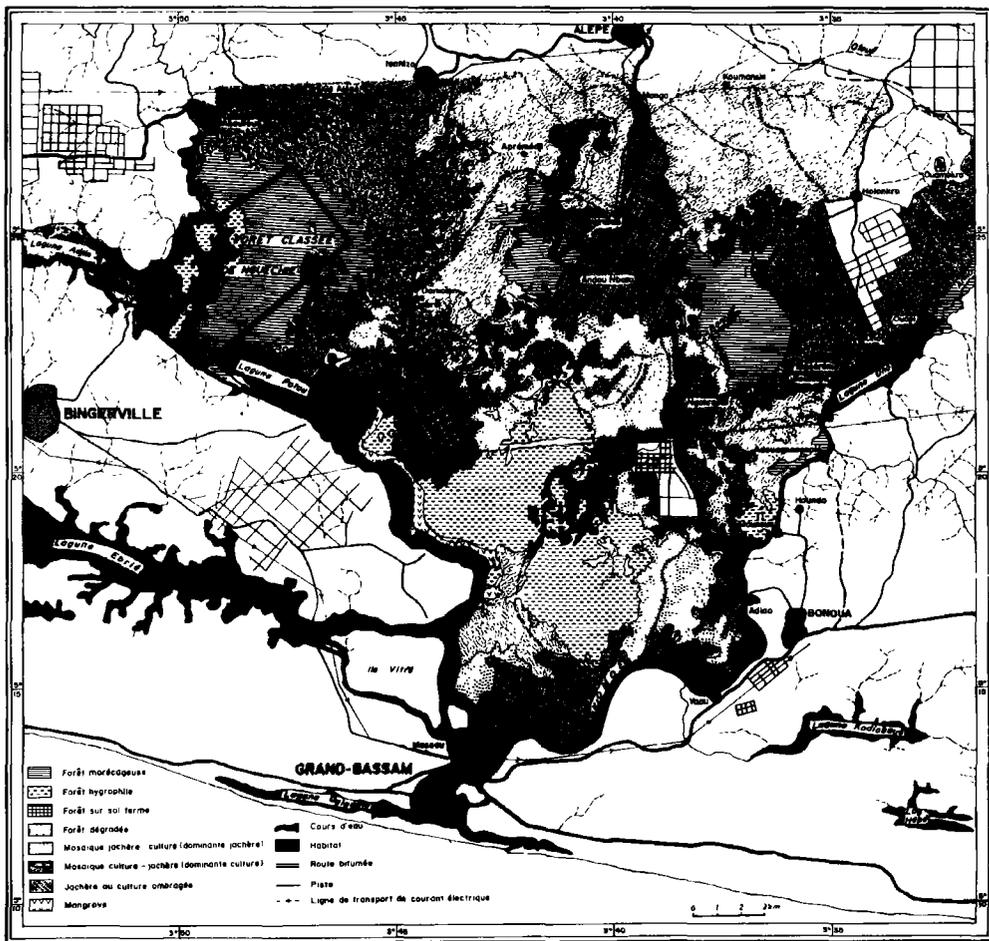
Figure 5. Cartographie du milieu péri-lagunaire de Bingerville-Bassam-Ono en 1956 par interprétation de photographies aériennes

7.1.2 Apport des données satellitaires : composition colorée TM 3-4-7, TM 4-5-7 et traitement numérique

L'interprétation de la composition colorée classique du tirage Geopic a permis de proposer la nomenclature suivante (fig. 6):

a) Végétation

- forêt marécageuse;
- forêt dense sur sol à forte humidité édaphique (forêt dense hygrophile);
- forêt dégradée et cacaoyères très ombragées sur sol à forte humidité édaphique;
- cultures et recrûs herbeux;
- mosaïques jachères-cultures et forêts dégradées sur sol ferme.



b) Autres thèmes

- habitat;
- eau;
- voies de communication;
- lignes de transport de courant électrique.

La nomenclature définitive a été proposée après la classification supervisée.

Selon les couleurs attribuées aux classes principales, les thèmes suivants ont été retenus :

- forêt marécageuse;
- forêt dense sur sol à forte humidité édaphique (forêt dense hygrophile);
- cultures, recrûs herbeux;
- habitat, sol nu;
- eau;
- forêt dégradée, jachère, cacaoyère ombragée;
- mosaïque jachères-cultures;
- mosaïque cultures-jachères.

c) Analyse globale

Le report du calque d'interprétation des différentes unités confirme le découpage en cinq secteurs du milieu d'étude (fig. coul. 18-4).

7.2 Analyse du milieu naturel

7.2.1 Secteur de N'guechié

Il est essentiellement occupé par une forêt marécageuse à *Symphonia globulifera* Linn. (Guittifères) et *Mitragyna ciliata* Aubrév. et Pellegr. (Rubiaceés) (Guillaumet et Adjanohoun, 1971) dont une partie de 2 800 ha est protégée par arrêté 319/SEF 28-1-45 portant classement de la forêt de N'guechié.

L'analyse détaillée des différents documents photographiques et satellitaires permet de distinguer trois nuances dans ce massif :

- forêt marécageuse sur sol organique à hydromorphie de surface permanente;
- forêt marécageuse sur sol à hydromorphie de surface temporaire;
- forêt de sol ferme à hydromorphie de profondeur.

La forêt marécageuse sur sol à hydromorphie permanente occupe toute la partie centrale du massif. Elle est bordée, sur le flanc ouest le long de la rivière Mé, de forêt dense de sol ferme et à l'est d'une forêt sur sol dont l'hydromorphie décroît du nord au sud si bien que vers Ogouedoume et Akoure, elle est pratiquement remplacée par une forêt de sol ferme.

En 1956, tout le massif était homogène à l'exception de quelques clairières intra-forestières vers le sud-est. L'ensemble du massif couvrait environ 5 360 ha.

En 1987, l'occupation humaine qui s'est opérée dans les parties les moins hydromorphes a entraîné une régression de 1 380 ha soit 27,5%.

La partie protégée couvrait, en 1956, 2 800 ha dont 2 510 ha de forêt marécageuse. En 1987, la forêt marécageuse a régressé de 320 ha soit 12,7% en 31 ans. Dans ce massif, il existe deux principales contraintes à l'occupation :

- existence d'une zone classée;
- hydromorphie de surface incompatible avec les systèmes d'exploitation traditionnelle.

7.2.2 Secteur du lac Kessiemié

C'est un petit secteur réduit à une forêt marécageuse qui couvrait 1 120 ha en 1956.

En 1987, la configuration globale du massif a été conservée mais un front d'attaque périphérique à partir de quelques clairières a entraîné une régression de 280 ha, soit 25% en 31 ans. L'occupation humaine s'est faite en priorité dans la partie nord moins hydromorphe.

7.2.3 Secteur de Bono

Ce secteur délimité sur la rive est du fleuve Comoé est occupé par un massif se composant d'une forêt marécageuse et d'une forêt de sol ferme.

En 1956, la forêt marécageuse était intacte alors que quelques clairières existaient déjà à l'intérieur de la forêt de sol ferme.

En 1987, la forêt marécageuse apparaît légèrement mitée à partir de l'ouest alors que toute la forêt dense de sol ferme est remplacée par une jachère ou des reliques de forêt dégradée.

Sur l'ensemble du massif qui couvrait 6 250 ha en 1956 dont 1 870 ha de forêt marécageuse et 4 330 ha de forêt de sol ferme, il ne restait plus en 1987 que 1 650 ha de forêt marécageuse, soit une régression de 11,7% alors que la forêt de sol ferme a totalement disparu.

7.2.4 Secteur de Atouanou

Ce secteur se compose de deux grands massifs forestiers séparés par une jachère dans le sens SO-NE.

Ces deux massifs établis sur sol argilo-sableux à forte capacité de rétention en eau correspondent à la forêt dense sempervirente à *Diospyros spp.* (Ebenacées) et *Mapania spp.* (Cyperacées) (Guillaumet et Adjanooun, 1971).

En 1956, ces deux blocs de forêt couvraient environ 7 220 ha. La superficie a régressé de 2 540 ha en 1987, soit une régression de 35% en 31 ans.

7.2.5 Secteur ripicole péri-lagunaire de Potou

Il est occupé par une mangrove ripicole, le long de la lagune Potou, et par une végétation d'arrière mangrove qui s'étend sur une largeur de 350 m. Il couvre environ 510 ha et sa superficie n'a pratiquement pas varié depuis 1956.

7.3 Évolution des unités carto-topographiques

7.3.1 Voies de communication

Depuis 1956, il y a eu une amélioration du réseau routier avec la création de nouvelles voies mises en évidence sur l'image satellitaire de 1987 :

- Bassam-Alepé : 42 km de route secondaire;
- N'gokro-Adouagossopié : 8 km de piste;
- N'gokro-Botoukro : 8 km de piste;
- Atounoua-Akouré : 19 km de piste;
- Atounoua-Dabré : 19 km de piste;
- piste forestière : 19 km entre Atounoua et la lagune Potou.

7.3.2 Lignes de transport de courant électrique

En 1956, il n'existait qu'une seule ligne traversant le nord de la zone d'étude suivant l'axe Alepé-Ahoutoué.

En 1987, une ligne de transport «haute tension» traversant la moitié sud de la zone d'étude est mise en évidence sur le tirage Geopic. D'autres lignes de moindre importance relient les principaux villages.

7.3.3 Habitat

Aux sites des habitats repérés sur les photographies de 1956 s'ajoute celui de Nougoussi.

8 Discussion

La méthode que nous avons adoptée pour cette étude découle de principes déjà expérimentés au cours de plusieurs projets concernant l'étude des forêts naturelles protégées à partir des données satellitaires Landsat et SPOT dans les régions forestières du centre-ouest et savaniques du nord. Cette méthode très simple dont les différentes étapes ont été succinctement décrites au cours de l'étude s'est avérée très fiable pour caractériser et déterminer les types forestiers et les cultures présents dans la zone d'étude.

En effet, on constate que les moyens nécessaires pour tirer les informations de l'imagerie satellitaire sont simples.

Ainsi, les traitements numériques appliqués pour obtenir ces résultats sont peu complexes et sont effectués sur des systèmes composés de micro-ordinateurs.

L'utilisation des photographies aériennes dans cette étude nous a permis de déterminer l'importance des formations forestières existantes dans cette zone en 1956 et 1973. Les surfaces de ces formations calculées à partir de l'interprétation des photographies aériennes constituent l'état de référence de l'évolution de la végétation dans cette zone péri-lagunaire.

Les limites de cette interprétation sont principalement dues à la qualité médiocre des photographies aériennes de 1956. En ce qui concerne l'image satellitaire Landsat TM de 1987, l'interprétation visuelle de la composition colorée standard TM 4, TM 7, TM 3 de l'image Geopic est apparue insuffisante pour discriminer de façon nette les unités d'occupation dans cette zone fortement transformée.

Par contre, la composition colorée réalisée à partir des canaux TM 4, TM 5 et TM 7 après seuillage et amélioration de la dynamique permet de mieux distinguer ces unités.

Ainsi, les parcelles d'apprentissage qui ont été tracées sur l'image améliorée et validées par plusieurs observations sur le terrain sont à la base des traitements numériques qui ont conduit à la réalisation d'une classification supervisée avec une assez bonne précision cartographique ou pourcentage de pixels bien classés (90%).

L'expérience conduite dans cette région montre que si l'imagerie satellitaire Landsat TM peut être utilisée à une résolution spatiale adaptée pour révéler l'évolution d'ensemble et noter les types de dégradation des formations végétales, les limites sont que de nombreuses observations de terrain sont nécessaires pour interpréter correctement la grande richesse des informations contenues dans celle-ci.

En outre, une meilleure définition spatiale de l'image satellitaire facilitera encore plus la tâche de l'interprète forestier.

Enfin, on retiendra que l'intérêt de cette étude réside dans le fait que les informations tirées des images satellitaires permettent de suivre l'évolution et la dynamique de la végétation soumise à des pressions diverses au cours de plusieurs années.

9 Conclusion

Cette étude a permis de mettre en évidence des secteurs homogènes et de visualiser les modifications qu'ils ont subies depuis 1956.

Le mode d'occupation de ces secteurs a permis de distinguer dans l'ensemble du milieu :

- des zones très sensibles établies sur sols fermes exondés;

- des zones moins agressées correspondant aux formations marécageuses dans lesquelles l'occupation humaine est encore très faible.

La principale contrainte à l'occupation totale de ce milieu semble être la forte hydromorphie des sols mais aussi la densité de l'habitat qui reste assez faible.

Cette étude fournit surtout l'état actuel des principales composantes du milieu et devrait permettre d'éclairer les prises de décision relatives à la gestion de cet environnement.

10 Références

AVENARD, J. M., 1971. Aspect de la géomorphologie. —in J. M. Avenard. Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoires ORSTOM, n° 50, Paris, p. 11-67.

GUILLEMET, J. L. et E. ADJANOHOUN, 1971. La végétation. —in J. M. Avenard. Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoires ORSTOM, n° 50, Paris, p. 161-263.

19

Un exemple de suivi diachronique de milieux soudano-sahéliens au Burkina Faso par télédétection

JEAN-MARIE OUADBA

Institut de recherche en biologie et écologie tropicale, Centre national de la recherche scientifique et technologique, B. P. 7047, Ouagadougou, Burkina Faso

Résumé

Il est présenté ici, dans le contexte général du Burkina Faso, un exemple d'approche méthodologique pour le suivi diachronique de milieux soudano-sahéliens. La méthode consiste à travailler à différentes échelles sur des images Landsat MSS et des photographies aériennes panchromatiques judicieusement choisies.

L'interprétation visuelle des images ayant subi un traitement en équidensités colorées donne de meilleures informations sur l'état de l'occupation des sols à l'échelle régionale.

L'interprétation des photographies aériennes, notamment par la méthode de «délimitation par élimination convergente», permet de mieux caractériser cet état au niveau local ou terroir.

Les études au sol permettent, enfin, d'affiner l'analyse du suivi diachronique.

1 Introduction : contexte burkinabè vis-à-vis du thème des journées scientifiques

Le patrimoine foncier et sylvicole du Burkina Faso, à l'instar des autres pays sahéliens, subit depuis plusieurs décennies une dégradation sévère et continue.

Si l'importance des facteurs naturels (aléas climatiques en particulier) dans la dégradation des milieux est indéniable, ce sont les facteurs humains qui restent déterminants dans le processus de la désertification au Burkina Faso (CILSS/Club du Sahel, 1985).

Aussi a-t-on mis en place une stratégie globale de lutte contre les effets de la sécheresse et contre la désertification basée sur la concertation inter-sectorielle et la conduite de programmes nationaux appropriés.

Dans la conduite d'une telle démarche, l'utilisation des données de la télédétection peut, à certains égards, être d'un grand secours en raison de leur finesse, de leur répétitivité et de leur caractère synoptique.

C'est ainsi qu'au Burkina Faso les outils de télédétection prennent de plus en plus une place importante dans les activités de certains services de recherche et de développement.

Actuellement, il est techniquement possible d'assurer une surveillance continue de l'état de l'environnement burkinabè par la mise en oeuvre de procédé de télédétection devant permettre :

- une meilleure connaissance de la dynamique de l'occupation des terres par l'agriculture et la forêt;
- une appréciation de la vitesse, du sens et de l'intensité des impacts humains sur les milieux.

Ceci afin d'identifier et de suivre les zones en proie à la désertification, ou en voie de l'être.

Les résultats attendus seraient une meilleure connaissance du milieu et surtout la mise en oeuvre de nouveaux programmes d'actions concertées en vue de préserver et même de réhabiliter les écosystèmes sensibles, menacés ou dégradés.

Le travail présenté ici peut être considéré comme l'illustration d'une des possibilités qu'offre la télédétection (au sens large) à un service étatique comme le nôtre, disposant de moyens modestes. Il est basé sur une approche méthodologique relativement efficace et peu coûteuse de cartographie diachronique de l'occupation des sols en zone soudano-sahélienne du Burkina Faso (Ouadba, 1983).

2 Matériel et méthode

L'objectif premier était de donner une vue synoptique des grandes classes d'occupation du sol à l'échelle régionale. Ensuite, il fallait analyser localement les vicissitudes de cette occupation.

Pour ce faire, la méthode à mettre en oeuvre ainsi que le choix du matériel doivent autoriser une analyse diachronique fiable du phénomène de l'occupation humaine et de dégradation du couvert végétal. Elle a été appliquée à la région de Ouagadougou, zone qui connaît de graves indices de désertification.

2.1 Matériel utilisé

Deux types de documents de base ont été utilisés.

Les premiers sont des images Landsat MSS au 1:1 000 000 (cadre 209-52), canaux 5 et 7 du 25/10/72 et du 8/11/78.

La période choisie est jugée favorable par Tricart (1976) et Hagen (1982) pour l'utilisation des enregistrements multispectraux en Afrique de l'Ouest, car il y a à ce moment une fréquence élevée des situations engendrant une bonne transmission atmosphérique et éliminant l'effet des feux.

Les images Landsat MSS sont présentées sous forme de positifs transparents qui vont subir un traitement en équidensités colorées.

L'analyse des documents finaux reposera sur l'élaboration de clés d'interprétation à partir d'une bonne connaissance des conditions écologiques régnant lors des prises de vue. Elle s'aidera, en outre, d'une étude à plus grande échelle de quelques zones-tests.

Les deuxièmes documents utilisés sont des photographies aériennes panchromatiques au 1:50 000 de 1950/56 et 1979, couvrant des sites choisis pour leur intérêt dans l'illustration des situations particulières de l'occupation du sol (occupation séculaire des terres, colonisation agricole récente et active, désertification). Ces photos sont examinées sous stéréoscope à miroir.

2.2 Méthode de travail

La méthode consiste à travailler à différentes échelles à partir des documents précédents et de la démarche suivante :

- interprétation visuelle des images Landsat MSS ayant subi un traitement photochimique en équidensités colorées, ceci afin d'extraire des informations sur l'organisation et l'état de l'occupation des terres à l'échelle régionale;

- interprétation de photographies aériennes, notamment par la méthode de «délimitation par élimination convergente», permettant de mieux caractériser les modalités d'occupation des terroirs villageois et d'estimer l'évolution de la strate arborée;

- étude au sol, à l'échelle stationnelle, afin d'analyser l'état et les tendances de la désertification dans la région étudiée et d'extrapoler les résultats dégagés sur d'autres régions similaires.

La richesse des informations recueillies à chaque étape et leur intégration dans un cadre analytique cohérent permet l'orientation des actions nationales de lutte contre la désertification et les effets de la sécheresse.

2.2.1 La technique des équidensités colorées comme méthode d'analyse

Le principe du procédé et le mode opératoire ont été décrits par Nony et Cazabat (1971) et Rey *et al.* (1973).

L'équidensitométrie colorée supplée la limitation physiologique de l'oeil humain, densitomètre médiocre dans l'analyse des gammes de gris des documents ou images demi-teintes. La transformation de ceux-ci en équidensités, en sériant les tonalités de gris par regroupement ou fusion des nuances les plus proches, permet d'accroître la «lisibilité» de phénomènes peu perceptibles comme les phénomènes évolutifs.

Il convient cependant d'être prudent dans l'analyse car une même valeur de gris ne correspond pas forcément à un même objet, et inversement des objets identiques peuvent être traduits par des nuances différentes.

C'est pourquoi l'on estime que le procédé n'est valable sur des zones restreintes et topographiquement sans relief. Par conséquent, son utilisation pour le traitement d'images satellitaires ne sera efficace que par un contrôle rigoureux des documents obtenus au moyen de documents thématiques et de vérité-terrain, contrôle permettant l'établissement des codes de correspondances analogiques révélés par chacun des niveaux de gris.

2.2.2 Méthode d'interprétation des documents en équidensités colorées

Les bases de l'interprétation sont liées à la nature et au type d'enregistrement, ainsi qu'à l'exploitation de la notion de signature spectrale des objets à laquelle se greffent celles de réflectance, de tonalité ou de combinaison de couleurs.

Chaque objet au sol a une signature différente d'une bande à l'autre. La «lecture» des images va donc consister en la recherche et l'interprétation de ces signatures élémentaires, en se référant à la documentation disponible. Elle s'appuiera essentiellement sur l'examen de la réalité végétale : par sa présence, ses variations, et souvent même son absence, la végétation est toujours significative directement ou indirectement dans des recherches relatives à diverses disciplines (Rey, 1974).

La démarche adoptée comprend trois étapes.

Premièrement, réalisation d'une esquisse d'interprétation primaire au moyen de l'image du canal 5 (détection des sols nus ou peu couverts), puis de l'image du canal 7 (affinage des contours des plages boisées). Il est important de travailler avec les documents originaux car ils contiennent toujours le plus d'information. Les canaux 5 et 7 (région du rouge et du proche infrarouge) sont choisis car la plupart des travaux ont montré leur efficacité pour une meilleure discrimination du couvert végétal par rapport aux deux autres composantes essentielles du paysage (sol, eau) (Kouda, 1981).

Deuxièmement, le document issu de la précédente étape est confronté à d'autres pour mieux préciser l'interprétation : compositions colorées diazochromiques, tirages spéciaux noir et blanc, documents thématiques divers, photographies aériennes, vérité-terrain. On obtient ainsi une esquisse d'interprétation définitive.

Troisièmement, ce dernier document est confronté à celui en équidensités colorées pour un essai d'analyse demeurant tout de même délicate. On obtient enfin une esquisse d'interprétation finale mieux élaborée que la précédente.

Ainsi, l'interprétation des documents initiaux doit guider celle des documents en équidensités colorées, ceux-ci n'apportant que des informations complémentaires, précieuses quant au comportement de certains phénomènes particuliers qui autrement échapperaient à l'analyse visuelle classique.

2.2.3 La photo-interprétation comme méthode complémentaire d'analyse

La photo-interprétation a été appliquée à des zones-tests de contrôle grâce à deux méthodes complémentaires :

- Une méthode dite de «délimitation par élimination convergente» telle qu'appliquée par Stigliano (1978) sur une zone soudano-sahélienne du Niger : elle autorise une approche synthétique de l'interprétation de phénomènes globaux tels que l'organisation anthropique de l'espace et son évolution dans le temps.

- Une méthode classique d'interprétation des photographies aériennes telle que préconisée par divers auteurs dont Rey (1967) et Guy (1966) : celle-ci, en intégrant à la fois les critères photogrammétriques et environnementaux avec les connaissances acquises par le photo-interprète, permet une analyse bien plus fine.

En outre, l'examen des photos sous fort grossissement (X 8) permet une estimation assez correcte de la réalité de l'évolution du couvert arboré.

3 Résultats et discussion

Les résultats obtenus à partir de la démarche adoptée et des méthodes utilisées ont été publiés dans le détail (Ouadba, 1983). Quelques-uns sont brièvement rappelés ici pour illustrer quelques étapes caractéristiques de la méthode.

3.1 Les images en équidensités colorées

Pour l'imagerie Landsat, les figures 1 et 2 représentent l'essai d'interprétation des images du 25/10/72 et du 8/11/78 traitées en équidensités colorées. Le tableau I en donne les éléments d'interprétation.

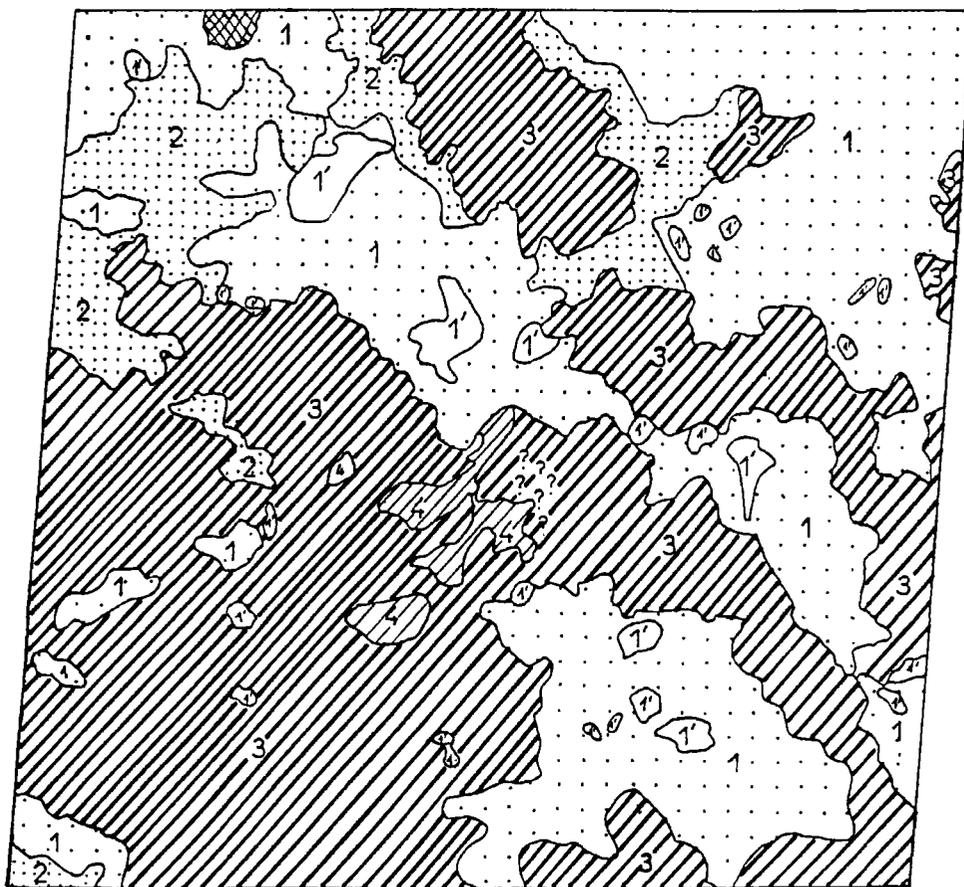


Figure 1. Essai d'interprétation synchronique des équidensités colorées (C5 + C7), image 209-52 du 25 octobre 1972 (légende au tableau I)

La synthèse diachronique permet de tirer les remarques suivantes quant à l'évolution qualitative des éléments du paysage entre 1972 et 1978.

Il y a une réduction notable du couvert arboré, en particulier dans le nord (régions de Ouagadougou, Zorgho et Koupèla) et le nord-ouest (région de Dassouri-Kokologo). Cette tendance, qui semble se cantonner dans les régions habitées, est consécutive à la régression de la classe 1 (cultures dominantes) au profit de la classe 1' (cultures + sols nus dominants). Elle résulterait de l'action conjuguée des facteurs climatiques et de la charge biotique.

On note également une régression générale des formations forestières, particulièrement dans le centre (régions de Saponé, Kombissiri, Manga et Nobéré) et à l'ouest (région de Nakantenga et du fleuve Nankabé ou Volta Blanche) du cadre. Cette tendance est à attribuer

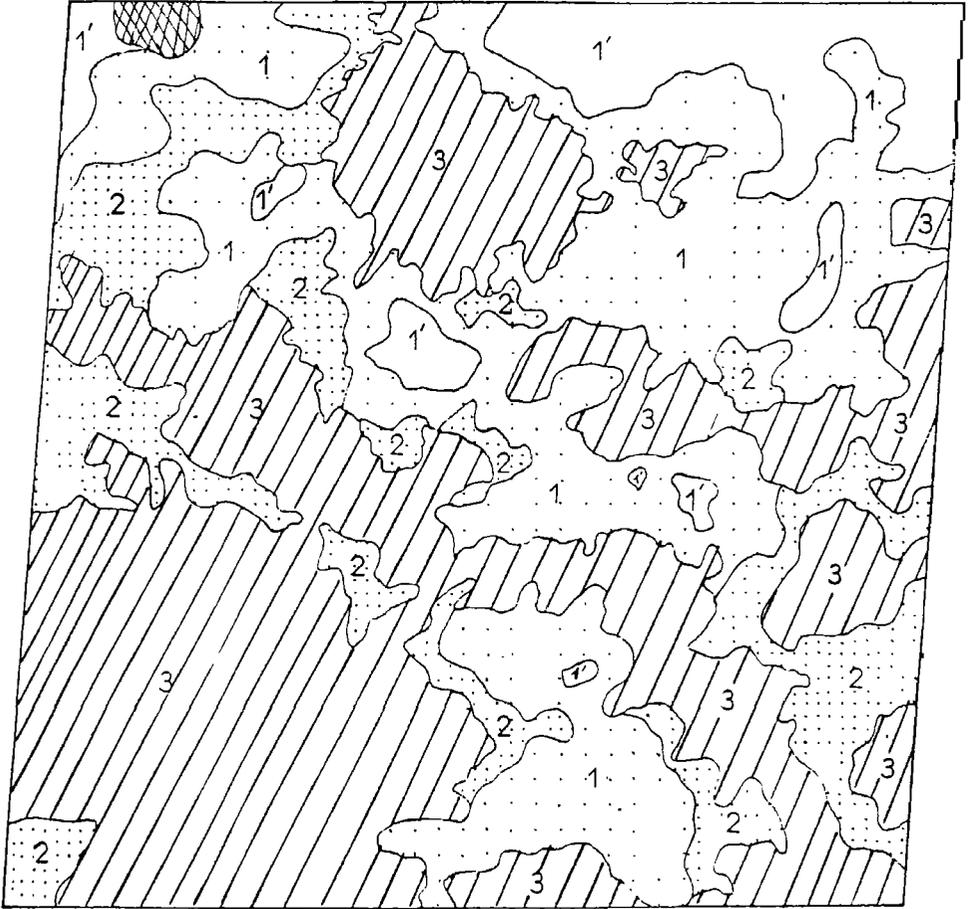


Figure 2. Essai d'interprétation synchronique des équidensités colorées (C5 + C7), image 209-52 du 8 novembre 1978 (légende au tableau I)

surtout à l'importante colonisation agricole qui a suivi la première sécheresse des années 1970-1972.

La méthode des équidensités colorées présente ainsi des avantages certains sur l'analyse visuelle classique des images brutes. En effet, le traitement photochimique (ou mieux, numérique) de ces images brutes permet de se bâtir un système de classification relativement contrôlé pour améliorer cette analyse visuelle. Cette amélioration est traduite ici par la finesse de la légende d'interprétation et en particulier dans l'estimation des recouvrements du sol par la végétation et de la mise en évidence d'une dynamique des feux de brousse.

Il y a lieu de souligner que, dans la méthode de télédétection utilisée, le nombre et l'étendue des plages de tonalité ou équiplages retenues sont fonction à la fois des niveaux d'énergie recueillie sur les images et du niveau de précision des manipulations photochimiques. La première caractéristique est liée aux conditions écologiques régnant lors des prises de vues : phénologie, état atmosphérique (brume sèche en particulier), feux de brousse. Le second facteur dépend des appréciations de l'opérateur et de son habilité à organiser les gammes de gris et leur traduction colorée, car son raisonnement et ses déductions sont très importants dans l'analyse des produits finaux.

Tableau I. Interprétation synchronique des équidensités colorées

Image du 28/10/72		Éléments du paysage	Image du 8/11/78	
Interprétation et observation	Teintes (C5 + C7)		Teintes (C5 + C7)	Interprétation et observation
- Le même motif se répète ailleurs - Repérage à l'aide de documents thématiques	Cyan tacheté de magenta, de jaune et de vert	Urbanisation (Ouagadougou)	Cyan tacheté de magenta, de jaune et de vert	- Le même motif se répète ailleurs - Les plans d'eau bordant la ville au nord sont bien soulignés
Recouvrement moyen à élevé	Magenta hétérogène	Zone à cultures dominantes (1)	Cyan	Recouvrement arboré faible à moyen
Recouvrement moyen	Cyan			
Recouvrement assez faible	Vert (jaune + cyan)	Zone à cultures et à sols nus (1')	Jaune	Recouvrement arboré très faible à nul
Recouvrement faible à nul	Jaune			
Savanes arborées ou arbustives à recouvrement divers	Pourpre ou magenta dégradé	Zone à jachères dominantes (2)	Magenta hétérogène	Recouvrement global élevé
Végétation naturelle (forêt sèche) peu ou pas dégradée	Magenta homogène	Zone à formations forestières diverses Magenta (3) Cyan (4)	Magenta	Zone peu dégradée; végétation naturelle de savanes boisées ou de forêts sèches denses
En zone peu ou pas occupée (savanes herbeuses ou arbustives claires) Interprétation délicate	Cyan			
—	—	Feux anciens sur 3	Vert	Les zones brûlées sont peu étendues à cette date
—	—	Feux récents sur 3	Rouge	La périodicité des feux peut être étudiée par équidensités

3.2 La photo-interprétation des zones-tests

L'analyse diachronique par photo-interprétation a été réalisée sur des sites choisis selon les caractéristiques de l'environnement (occupation du sol, colonisation agricole, désertification).

La zone-test de Naryarlé, située en bordure immédiate de la forêt classée du Nankabé (1958), a été soumise à une colonisation agricole très active depuis la persistance de la sécheresse. L'interprétation diachronique 1958-1979 fait apparaître une destruction quasi complète de la végétation naturelle (-73%) au profit des espaces agricoles. La figure 3 indique les proportions de cette évolution.

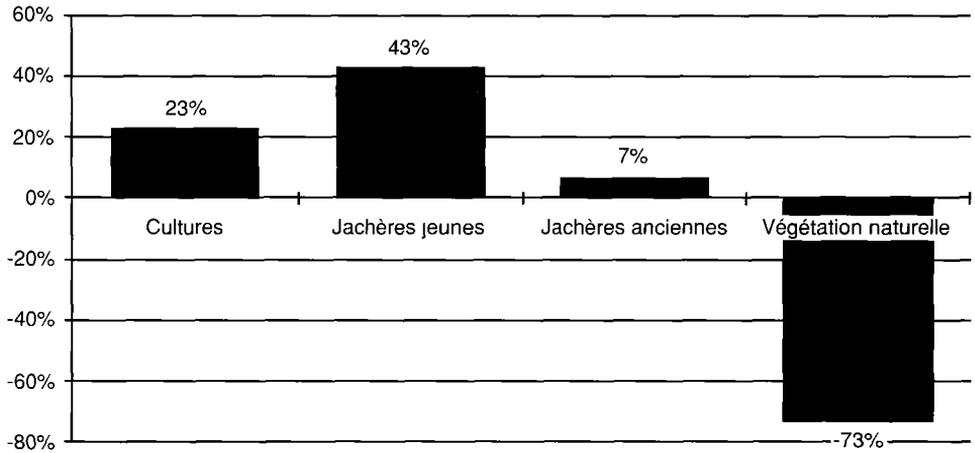


Figure 3. Utilisation du sol à Naryarlé 1958-1979

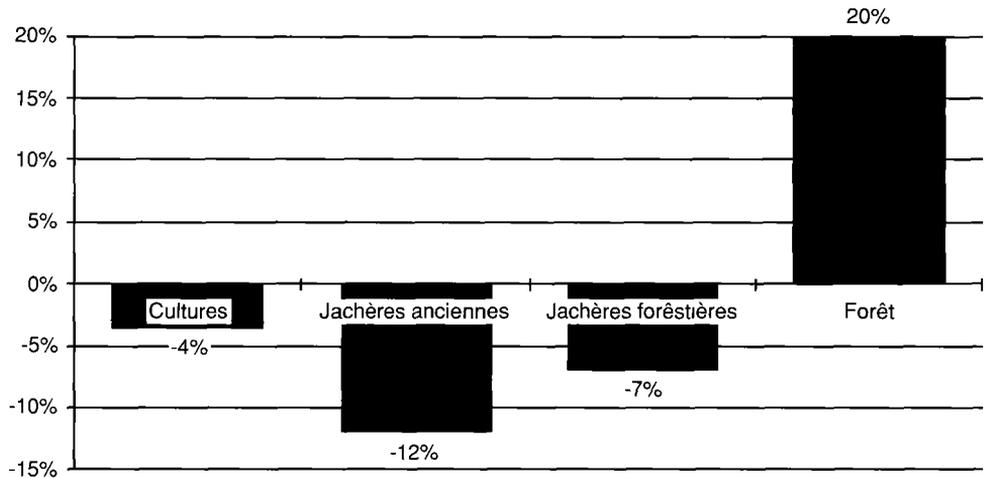


Figure 4. Utilisation du sol à Bazèga 1950-1979

Sur la zone-test de Saponé, située à 30 kilomètres au sud de Ouagadougou, l'analyse des surfaces occupées en 1950 et 1970 fait apparaître une relative stabilité dans l'affectation des terres. Ceci en raison sans doute de l'occupation séculaire de l'espace par une communauté rurale qui n'a ni beaucoup varié en population, ni changé ses modes de gestion traditionnelle de son terroir.

Le site de Bazèga, situé en lisière du parc national de Pô, est caractérisé par une diminution générale de l'emprise agricole (analyse 1950-1979). Cette déprise agricole, déjà perceptible en 1950, semble trouver ses origines dans la proximité des foyers onchocercariens qui ont longtemps contenu l'extension de l'espace agricole, et aussi dans la mise en valeur hydro-agricole de la vallée du Bazèga qui a eu pour effet de drainer les bras valides vers les secteurs du salariat agricole et la reconversion professionnelle.

La figure 4 traduit l'évolution de l'occupation des terres entre 1950 et 1979 et souligne la forte progression des formations naturelles boisées sur l'espace agricole.

La photo-interprétation se révèle donc un moyen complémentaire pour affiner l'analyse des images Landsat à de plus grandes échelles. Ici, elle a permis de mieux comprendre les vicissitudes locales de l'occupation du sol dans la région.

4 Conclusion

Les enregistrements de télédétection sont de remarquables outils de synthèse et de quantification offrant de nombreuses possibilités d'analyse à tous les spécialistes s'intéressant à l'espace géographique.

Les applications ici évoquées montrent que l'intégration des ressources de la photographie aérienne et de la télédétection spatiale constitue une voie efficace dans l'acquisition de données fiables sur la biosphère.

Des moyens annexes d'analyse comme la technique des équidensités colorées et la mise en oeuvre de méthodes d'interprétation appropriées permettent de progresser dans cette acquisition rendue aujourd'hui plus absolue par le développement des méthodes de traitements numériques.

Ceci est particulièrement important pour les pays en développement des zones semi-arides, comme le nôtre, dont l'effort au développement mériterait d'être soutenu par des voies originales d'acquisition de données aptes à éclairer tant soit peu les politiques nationales.

Pour le Burkina, pays particulièrement touché par la désertification, l'une des tâches les plus urgentes à envisager serait le suivi écologique de l'environnement naturel et humain, afin de promouvoir un développement en meilleure harmonie avec les équilibres naturels.

5 Références

- CILSS/CLUB DU SAHEL, 1985. Proposition de plan national de lutte contre la désertification. — Ministère de la planification et Ministère de l'agriculture et de l'élevage, Ouagadougou.
- GUY, M., 1966. Quelques principes et quelques expériences sur la méthodologie de la photo-interprétation. — Symposium international de photo-interprétation, Paris.
- HAGEN, R. T., 1982. Remote sensing applications to forestry in West Africa. — Sahel resource inventory and mapping coordination workshop, 20-24 mai, Bamako.

- KOUDA, M., 1981. Analyse synchronique et diachronique de l'évolution de la végétation en zone semi-aride (Haute-Volta) par télédétection multispectrale. —Thèse de troisième cycle, Université Paul-Sabatier, Toulouse, 143 p.
- NONY, T. P. et C. CAZABAT, 1971. Les équidensités colorées. Applications à la photo-interprétation. —Bulletin de la Société française de photogrammétrie, n° 43.
- OUADBA, J.-M., 1983. Essai d'analyse diachronique de l'occupation du sol en Haute-Volta par photo-interprétation et télédétection. —Thèse de troisième cycle, Université Paul-Sabatier, Toulouse, 262 p.
- REY, P., 1967. La place de la photographie aérienne dans les méthodes d'étude du milieu vivant. — Actes du deuxième Symposium international de photo-interprétation, Paris.
- REY, P., 1974. Expérience ARNICA/ERST-1. Résultats et perspectives. —European Space Research Organisation, Proceeding of a Symposium, Italie.
- REY, P., C. ARLES, et R. DELORME, 1973. Équidensités colorées et télédétection des ressources naturelles. —DGRST, Comité Équilibre et lutte biologique, Groupe de travail méthodologique, Paris.
- STIGLIANO, M., 1978. Méthodologie d'une approche synthétique de l'organisation de l'espace : l'occupation du sol en zone sahélo-soudanienne. —Photo-interprétation, n° 78-4, fasc. 4.
- TRICART, J., 1976. Quelques aspects de l'utilisation des images multispectrales du satellite Landsat-1 dans l'étude écologique de pays tropicaux (Mali, Colombie, Vénézuéla). —Travaux et documents de géographie tropicale, n° 25, Télédétection et environnement, CNRST/CEGET, Bordeaux.

20

Téledétection et identification des cultures dans le périmètre irrigué «Sistema Rio Bocono» (les *llanos* occidentaux, Venezuela)

JÉSUS PÉREZ*, VINCENT VALLÉS** et M^{me} DUCROT-GAMBART***

**Institut de géographie, Université Toulouse Le Mirail, 5, allées Antonio-Machado, 31058 Toulouse cedex, France*

***Laboratoire de pédologie et aménagement, École nationale supérieure agronomique de Toulouse, 145, avenue de Muret, 31076 Toulouse cedex, France*

****Centre d'études spatiales des rayonnements, 9, avenue du Colonel-Roche, 31400 Toulouse, France*

Résumé

Le périmètre irrigué «Sistema Bocono» concerne environ 3 000 ha dans les *llanos* occidentaux du Venezuela au sud-ouest de la capitale (Caracas).

Il s'agit d'une région agricole par excellence qui est soumise à un climat tropical contrasté avec alternance d'une période sèche et d'une période de pluies.

À partir des données satellitaires du mois de mars 1987, en pleine saison sèche, on réalise une classification des principales cultures du cycle «Verano 1986-1987». Les approches visuelle et numérique à partir des données SPOT ont été complémentaires dans l'étude des milieux naturels sur environ 900 km². Ainsi, une interprétation thématique à l'échelle du 1:30 000 a été réalisée, et une classification numérique basée sur les réponses spectrales a permis une bonne identification des stades phénologiques du coton et du riz dans le périmètre irrigué à la mi-mars 1987.

Les données SPOT, utilisées sans traitement numérique compliqué et avec un matériel peu coûteux, s'avèrent être un outil d'appui à la lutte contre la sécheresse dans les *llanos* du Venezuela.

1 Introduction

La région des *llanos* au Venezuela est soumise à un climat tropical contrasté. Les précipitations y sont abondantes mais mal réparties. En effet, une période sèche se prolonge de novembre à avril, ce qui crée de sérieux problèmes pour l'agriculture et seule l'irrigation permet de s'affranchir en partie de ces problèmes durant la sécheresse.

Or, la gestion de l'eau dans les périmètres irrigués nécessite une appréciation précise de l'extension de chaque culture et du suivi de leur stage phénologique, notamment pour le coton dont la consommation en eau varie selon le stade de développement. En effet, dans cette contrée, les cultures pratiquées ont des besoins en eau très divers : le riz est un grand consommateur d'eau alors que les terres récemment labourées ne requièrent aucune irrigation.

Nous nous intéresserons plus particulièrement à un périmètre irrigué, «el sistema de riego rio Bocono», d'une superficie d'environ 3 000 ha. Lors d'un travail précédent (Pérez, 1985), l'utilisation de données Landsat MSS obtenues sur cette zone a permis de cerner les frontières des zones agricoles, leur évolution, l'importance des feux saisonniers et des déboisements. En revanche, il a été impossible d'arriver à séparer les thèmes précis tels que les cultures, que ce soit par l'analyse numérique ou analogique. L'identification des cultures et donc la détermination du besoin en eau des différentes zones du périmètre n'a pu être envisagée.

Les données fournies par le satellite SPOT ont des caractéristiques différentes de celles de Landsat MSS. La résolution est plus fine; elle est de 20 m dans les canaux multispectraux et atteint 10 m en mode panchromatique, ce qui offre de nouvelles possibilités.

Dans ce travail, nous nous proposons de déterminer la répartition des cultures et leur stade phénologique à partir des données SPOT dans ce périmètre soumis à des sécheresses périodiques.

2 Matériel et méthode

2.1 Les données

Nous utilisons à la fois des données satellitaires et des données recueillies sur le terrain.

2.1.1 Les données de terrain

Les services du ministère vénézuélien de l'agriculture ont effectué un travail important de recensement des cultures tout au long de la campagne agricole 1986-1987. Ils ont établi un plan d'occupation au 1:30 000 où l'on peut situer avec précision toutes les parcelles cultivées, soit 2 817 ha. Ce document a été complété par la collecte d'informations concernant la nature et le développement des cultures durant la saison sèche, soit de novembre 1986 à avril 1987.

2.1.2 Les données satellitaires

Pour des considérations diverses (entre autres densité de nuages), nous avons retenu les données SPOT du 17 mars 1987 c'est-à-dire durant la période sèche. Le périmètre se trouve à cheval sur les images 653-332 et 653-333 (70° 00' O - 8° 47' N).

Nous avons utilisé les données suivantes :

- composition colorée sur papier (canal 3 en rouge, canal 2 en vert et canal 1 en bleu) du quart sud-ouest de l'image SPOT 653-332, niveau 1B, XS au 1:50 000;

- une sous-image numérique de 512 par 512 pixels pour les 3 canaux, couvrant une aire de 10 km par 10 km; elle est extraite de la même image et centrée sur le périmètre; ce support de travail contient environ 74 parcelles soit la moitié des données de terrain.

La prise de vue correspond donc, à quelques jours près, à la date de la collecte d'information sur le terrain, ce qui assure une bonne cohérence temporelle entre les deux jeux de données.

En plus des données satellitaires et des données de terrain, nous avons à notre disposition des photos aériennes au 1:25 000 de mai 1978, des diapositives couleur des paysages et une carte de la végétation au 1:100 000 de 1982.

2.2 Méthode

Le traitement des données SPOT a été réalisé suivant un schéma classique : approche visuelle, approche numérique.

2.2.1 Interprétation visuelle

Cette analyse visuelle s'est faite sur une partie de la composition colorée du quart de l'image SPOT au 1:50 000 (environ 50 km²) dans le but de produire une carte thématique des milieux naturels en utilisant des techniques de la photo-interprétation.

Le choix des classes a été facilité par la connaissance du terrain et par les divers documents d'appui tels que les photos aériennes et la cartographie thématique. Ainsi, nous avons élaboré une clef d'interprétation correspondant à la zone d'étude (tableau I).

2.2.2 Classification numérique

Les données ont été traitées par le logiciel de traitement d'images «DIDACTIM» sur micro-ordinateur compatible PC/AT équipé d'une carte «Number Nine».

Le but du traitement est d'obtenir une classification des milieux naturels de cette zone à partir de 17 classes représentatives du paysage sur environ 100 km² (tableau II).

Des parcelles d'entraînement ont été choisies d'après la réalité terrain (minimum de 5 échantillons par classe). Outre les canaux spectraux SPOT XS1, XS2 et XS3, certains canaux dérivés ont été ajoutés afin de mieux séparer les classes : canal IV (indice de végétation) = $(XS3 - XS2)/(XS3 + XS2)$; canal IB (indice de brillance) = $((XS3)^2 + (XS2)^2)^{1/2}$ et trois canaux texturaux obtenus à partir d'un laplacien calculé sur les canaux XS1, XS2 et XS3 mesurant un type d'homogénéité des classes. Ces canaux permettent l'apport des éléments supplémentaires afin de discriminer des classes confondues spectralement.

Les améliorations apportées par l'indice de végétation et l'indice de brillance ont été constatées par une augmentation de la décorrélation entre les canaux lorsque l'on observe les moyennes et les étendues des écarts types à l'aide des histogrammes bidimensionnels pour les classes définies au départ. Enfin, les trois canaux texturaux ont permis une meilleure observation des limites du parcellaire étudié.

Une première analyse des nuages de points bidimensionnels et des caractéristiques statistiques dans les canaux XS2 et XS3 a permis la vérification des échantillons : opération indispensable pour la correction d'éventuelles erreurs commises dans la recherche des échantillons qui doivent être représentatifs de chaque classe. Certains échantillons ont été

Tableau I. Clef d'interprétation de la composition colorée de la zone d'étude, thème : utilisation de l'espace

Unité	Sous-unité	Critères d'identification	Observation
Cultures irriguées	Pérennes ou à la fin du cycle végétatif	Dans le périmètre, taches rouges ou roses, de forme rectangulaire parfois carrée, sèche, structure quadrillée	Bananiers, fruitiers, ou variétés tardives des cultures de saison
	Récoltée	Dans le périmètre, taches grises allant du clair au foncé, forme rectangulaire, carrée, structure quadrillée	Cultures de la saison sèche ayant été récoltées
	Début ou milieu du cycle végétatif	Dans le périmètre, taches allant du gris très foncé au noir avec de petites taches rouges au milieu du noir dominant, forme rectangulaire et carrée, structure quadrillée	Il s'agit des différents stades du riz irrigué; les pixels humides donnent le noir et le riz émergent donne le rouge
Cultures non irriguées	Cultures de "secano"	Zone de couleurs hétérogènes, taches de forme polygonale juxtaposées, limites floues	Zone occupée par les cultures de pluies; les nombreuses taches jaunes témoignent d'une forte activité de labour pendant le mois de mars avant les premières pluies d'avril
	Vegas	Zone hétérogène, couleurs variées du rouge au gris foncé, située toujours au bord d'une rivière	Agriculture de subsistance (conuco) sur des surfaces petites parfois sous un bois; la proximité de la rivière permet des cultures en saison sèche
Pâturages	Traditionnel	Zone hétérogène, gris étendu avec de nombreuses taches noires, limites floues	Savanes herbeuses brûlées en saison sèche et qui sont utilisées comme pâturage traditionnel
	Modernisé	Zone hétérogène formée de polygones de grande taille, couleurs claires, limites nettes	Savanes herbeuses, défrichements utilisés comme pâturage dans l'élevage extensif de bovins
Défrichements		Zones claires, hétérogènes, situées à côté des zones boisées et des cultures	Défrichement visant à augmenter les surfaces des pâturages
Reboisements		Zone homogène, marron foncé, forme polygonale, limites nettes	Plantation de pins caraïbes
Forêts		Zone homogène, rouge et brun, limites nettes, structure moutonnée	Forêts tropophiles avec des espèces caducifoliées et sempervirentes
Milieu à intérêt agricole limité (Chaparral)		Zone hétérogène, brun et gris foncé présentant des taches roses et rouges allongées, limites floues	Associations végétales (fourré de ligneux) sur des collines et sols peu fertiles brûlées en saison sèche; les taches rouge-rose correspondent aux espèces sempervirentes installées dans les petites vallées

Tableau II. Liste des classes retenues

N° de classe	Nom de classe	Signification sur le terrain
1	Bois	Végétation sempervirente et décidue
2	Pat 1	Savane - pâturage non labouré
3	Pat 2	Savane - pâturage labouré
4	Ve-se	Fourré de ligneux - espèces pyrotolérante décidues
5	Feux	Végétation brûlée en saison sèche
6	Eau	Rivière en étiage
7	Plage - Sable	Banc de sable de la rivière
8	Autoroute	Chantier en construction
9	Village-bâti	Habitats et constructions dispersés
10	Ombre-Nuage	Ombres portées des nuages
11	Coton-soca	Coton après récolte
12	Coton-vert	Coton tardif
13	Coton-mota	Coton près à récolter
14	Riz-SE	Parcelles labourées humides et semées
15	Riz-E	Riz émergent par taches
16	Riz-Ta	Riz d'environ 50 cm
17	Labour	Parcelles labourées pour le cycle «secano»

éliminés et d'autres rajoutés à partir des classes d'échantillons supposés corrects. Cette vérification a été faite à l'aide des fonctions du logiciel permettant une visualisation à l'écran des nuages de points et des écarts types de chaque échantillon par classe. Un échantillon correspond à une classe donnée lorsque celui-ci a un écart type raisonnable par rapport aux caractéristiques générales de sa classe.

2.2.3 Les nuages de points et les histogrammes

Les nuages de points et des histogrammes bidimensionnels des classes dans les canaux XS1, XS2, XS3, IV et IB ont permis de déterminer le degré de confusion entre les classes et la corrélation entre les canaux. Les couples de canaux qui se sont avérés les plus intéressants pour la séparation des classes sont : XS1 et XS2, XS3 et IV, IV et IB (fig. 1).

De plus, l'observation des nuages bidimensionnels des canaux texturaux sur les classes a permis une approche du degré d'homogénéité de chaque classe. À l'issue de ce prétraitement, de l'analyse visuelle et de l'étude des statistiques, les 17 classes sont bien représentatives du paysage étudié. Cette représentativité vient principalement du fait que ces 17 classes furent choisies pertinemment en fonction d'une réalité terrain fiable; ce qui a permis de situer et de connaître la nature de chaque parcelle d'entraînement par classe sans commettre trop d'erreur dans le choix.

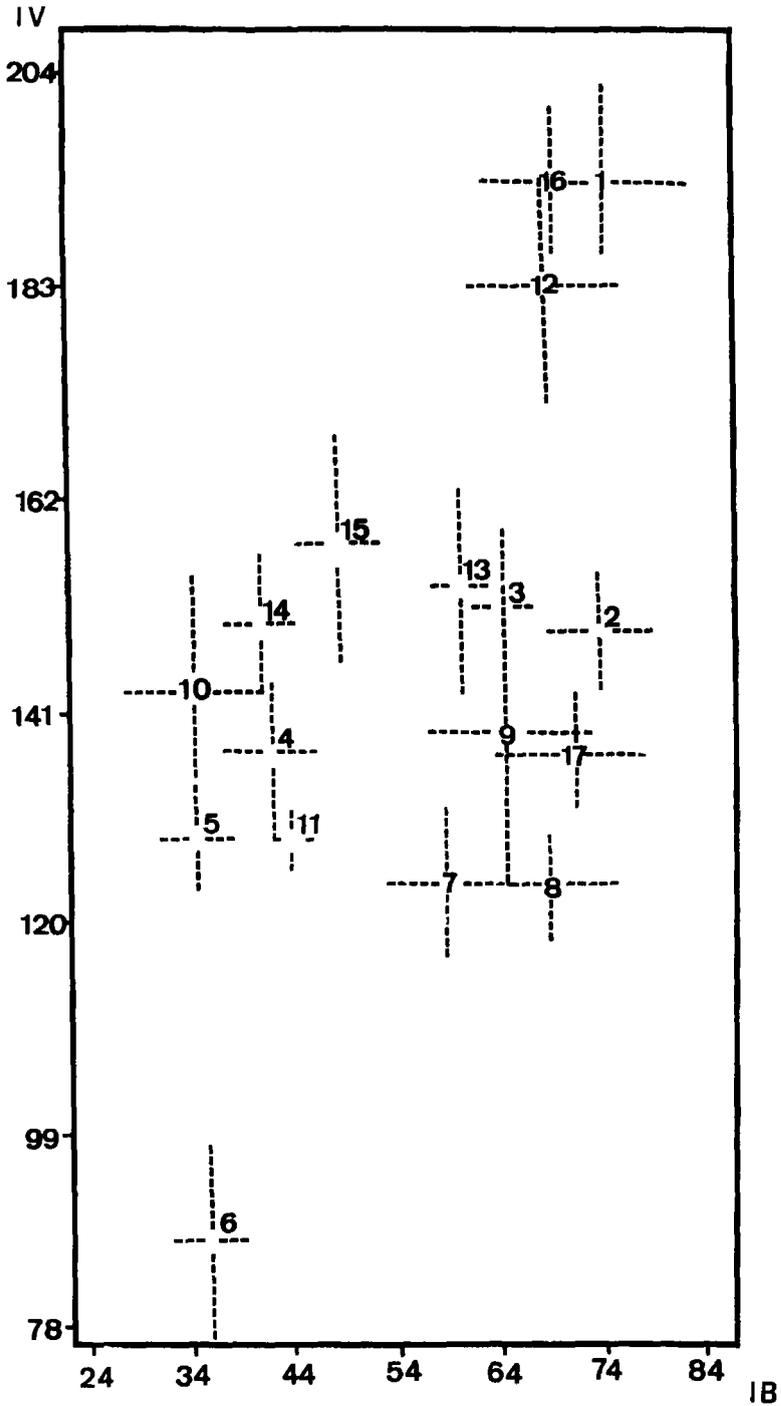


Figure 1. Moyennes et écarts types des classes sur l'histogramme bidimensionnel IV-IB

3 Résultats et discussion

Les matrices de confusion entre les classes, qui permettent de visualiser les méprises entre les classes, mettent en évidence les confusions majeures présentées au tableau III.

Tableau III. Confusions majeures rencontrées

Classes	Confusion
Végétation sèche (4)	Feux (5), coton-soca (11), riz-semaille (14), riz émergent (15)
Village-bâti (9)	Pâturage non-labouré (3), plage-sable (7), autoroute (8), labour (17)
Coton-vert (12)	Bois (1), coton-mota (13), riz-tallage (16)
Riz-tallage (16)	Bois (1), coton-vert (12)

On constate ainsi que les combinaisons XS1, XS2, XS3, IV et IB, et XS1, XS2 et XS3 offrent les meilleurs pourcentages de pixels bien classés. On estime qu'un pixel est bien classé lorsqu'il est affecté à sa classe d'appartenance. Dans les matrices de confusion entre les classes, cette information correspond à la diagonale formée par le croisement des pourcentages de pixels affectés à chaque classe. Un pixel est affecté à une classe quelconque en fonction de sa valeur radiométrique dans les combinaisons de canaux choisies pour calculer les matrices de confusion. Pour les classes pâturage labouré (2), pâturage non labouré (3), eau (6), plage-sable (7), coton-soca (11) et coton-mota (13), plus de 80% des pixels sont bien classés. De même, les classes bois (1), feux (5), autoroute (8), ombre-nuage (10), coton-vert (12), riz-semaille (14), riz-émergent (15) présentent un pourcentage de pixels bien classés compris entre 60% et 80%. Enfin, pour les classes végétation-sèche (4), villages-bâti (9), riz-tallage (16) et labour (17), le pourcentage est inférieur à 60%.

En ce qui concerne les classes d'intérêt pour le périmètre irrigué et les confusions majeures rencontrées pour ces classes (tableau IV), on peut dire :

- Le coton après récolte a le même comportement radiométrique que les éléments constitutifs de la classe «végétation-sèche» (4) à savoir : la végétation décidue. Les feuilles des cotonniers sans activité chlorophyllienne ont évidemment la même réponse spectrale que les feuilles sèches de la végétation décidue dominante de la classe 4.

- Les «pixels humides» des classes «riz-semaille» (14) et «riz-émergent» (15) se confondent avec les «pixels feux» de la classe 5 et les espèces végétales pyrotolérantes de la classe 4. La confusion entre les parcelles du périmètre réellement irriguées et la végétation brûlée par les feux saisonniers, qui sont fréquents à cette époque de l'année dans la région, montre la difficulté d'arriver à séparer les «pixels feux» et les «pixels humides» en utilisant seulement la réponse spectrale des objets. Cette confusion montre aussi que le degré d'hétérogénéité des classes «végétation sèche» et «feux» est très élevé. Les classes «riz-semaille» et «riz-émergent» ont servi à caractériser les parcelles irriguées du périmètre à la mi-mars.

- Le coton-tardif (12) et le riz de 50 cm de taille (16) présentent des réponses spectrales semblables à celles de la végétation de la classe «bois» (1). Certains «pixels chlorophylliens» du coton prêt à récolter (13) sont aussi mélangés dans la classe coton-vert (12) car à ce stade végétatif (coton-mota), s'il s'agit d'une première récolte, les cotonniers maintiennent des feuilles vertes. Cette confusion est tout à fait normale car il s'agit dans tous les cas des réponses spectrales caractéristiques des feuilles en activité chlorophyllienne.

- Les pourcentages de pixels bien classés pour le coton dans le périmètre irrigué montrent l'homogénéité des classes «coton-soca» et «coton-mota» qui correspondent bien à deux stades phénologiques différents des cotonniers. Ces pourcentages sont satisfaisants pour une classification spectrale. Les stades phénologiques du coton sont bien identifiés à l'exception du coton-tardif qui présente un pourcentage important de confusion avec les éléments végétaux des autres classes.

- Par contre, pour le riz, les résultats sont décevants car les pourcentages de pixels bien classés sont trop faibles, principalement pour la classe «riz-tallage» qui est confondue avec les classes «bois» et «coton-vert».

- On remarque que la classe villages-bâtis (9), qui représente l'habitat dispersé de la zone, se trouve mélangée dans la plupart des classes.

Des améliorations sont possibles en introduisant des indices de texture obtenus à partir des canaux texturaux car les classes présentent des degrés différents d'homogénéité.

Une classification de type barycentrique a été effectuée (fig. coul. 20-2) en utilisant les canaux XS1, XS2, XS3, IV et IB.

Tableau IV. Pourcentages de pixels bien classés pour le coton et le riz

Classes	Combinaisons	
	XS1, XS2 et XS3	XS1, XS2, XS3, IV et IB
Coton-soca	97%	98%
Coton-mota	89%	84%
Coton-vert	61%	60%
Riz-semaille	69%	67%
Riz-émergent	74%	70%
Riz-tallage	47%	34%

4 Conclusion

L'approche visuelle a permis une vision globale et synoptique des milieux naturels en question. Ainsi, on a pu mettre en relation les divers éléments techniques et naturels d'un paysage d'environ 900 km² (rivières, forêt, un barrage à l'amont, un périmètre irrigué à l'aval, les cultures et les zones d'élevage). Cependant, cette approche ne permet pas une identification des cultures. Cette analyse est complémentaire à une classification thématique numérique. Une interprétation thématique à l'échelle du 1:30 000 a été réalisée.

L'approche numérique à partir des réponses spectrales a permis une identification des stades phénologiques du coton. L'analyse des indices de texture en cours doit apporter des améliorations sensibles à la classification. La bonne connaissance des milieux étudiés a conduit à une information sur le terrain fiable et de qualité. Ceci a été le départ pour une bonne confrontation entre les données satellitaires et les méthodes d'interprétation. Il est important de noter que les résultats ont été obtenus à partir d'une station de traitement d'images composée d'un micro-ordinateur compatible PC-AT équipé d'une carte graphique «Number Nine», de données satellitaires (image de 512 par 512 pixels sur disquette) et d'une composition colorée sur papier photographique.

Les données SPOT utilisées sans traitement compliqué et coûteux peuvent permettre une identification convenable des stades phénologiques du coton dans la région à la mi-mars. La résolution des données SPOT permet une observation fine et détaillée des milieux naturels dans les *llanos*. Dans ce cas les données SPOT peuvent être considérées comme un outil d'appui à la lutte contre la sécheresse dans cette région.

5 Remerciements

Nous exprimons notre reconnaissance à la Fondation «Gran Mariscal de Ayacucho», au «Departamento de coordinacion y aprovechamiento del sistema de riego Rio-Bocono» (Area Guanare-Masparro, Sabaneta-Barinas), au Ministère de l'agriculture vénézuélien et spécialement à Ec Alirio Baloa, directeur général, à Ing. Pedro R. Gonzales, chef de département, à M. Lacombe, du Laboratoire d'informatique de l'École nationale supérieure agronomique de Toulouse et enfin à la Société AES-IMAGE pour son soutien matériel.

6 Bibliographie sommaire

- AES-IMAGE, 1989. Manuel d'utilisation de DIDACTIM, 200 p.
- BARIOU, R., D. LE CAMUS et F. LEHENAFF, 1985. Les indices de végétation. —Les dossiers de télédétection. n° 2, Presse universitaire de Rennes, 160 p.
- LAINE, G., J. KILLIAN, C. BELEM, M. BERGER et P. MORANT, 1988. L'analyse multitempore des données du satellite SPOT pour identifier les cultures dans deux terroirs de la zone cotonnière de l'ouest du Burkina Faso. —ATP Télédétection. CIRAD-INERA, 1988-1989, 13 p.
- CERCLE DES ÉLÈVES DE L'INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE. 1987. Les techniques aérospatiales au service de l'agronomie. —Agro Paris-Grignon. Paris, 68 p.
- PÉREZ, J. A., 1982. Un exemple de programme de développement rural intégré. Le programme Guanare-Masparro dans les *llanos* vénézuéliens. —Mémoire de maîtrise. Université de Toulouse Le Mirail, 144 p.
- PÉREZ, J. A., 1985. Étude des milieux naturels des *llanos* occidentaux du Venezuela à l'aide des données Landsat 2. —Mémoire de DESS, Paris VI. CETEL 1984-1985, GDTA, Toulouse, 34 p.
- SAINT, G., 1987. Bilan des développements méthodologiques sur les inventaires agricoles utilisant SPOT et des enquêtes de terrain. —SPOT-1, utilisation des images, bilan, résultats. Paris, Cepadues, p. 245-250.

