

## **PARTIE IV**

# **Cartographie de la végétation**



# 15

## **Le graphique «binormalisé» : un outil d'étalonnage des indices de végétation - application aux cultures sahéliennes**

ÉTIENNE BARTHOLOMÉ

*Institut pour les applications de la télédétection, Centre commun de recherche de la Commission des communautés européennes (IATD-CCR), T.P. 440, 21020 Ispra, Italie; téléphone : (39) 332-789908; télécopieur : (39) 332-789073; télex : 380042 EUR I; courrier électronique : etienne.bartholome@jrc.it*

### **Résumé**

Pour résoudre le problème de la représentation graphique et la compréhension visuelle de données dans un espace supérieur à deux dimensions, on propose ici d'utiliser des indices calqués sur l'indice de végétation de la différence normalisée (NDVI). Le graphique «binormalisé» représente donc un indice normalisé par axe. Les isolignes sont parallèles entre elles. L'application de ce principe simple de figuration à des données satellitaires HRV de SPOT couvrant des espaces agricoles en région sahélienne (Ségou, Mali, et Bobo-Dioulasso, Burkina Faso) complétées par des observations de terrain et des prises de vue à grande échelle a permis les observations suivantes : 1) la différence normalisée entre canaux vert et rouge permet de différencier aisément et donc de cartographier les sols suivant l'importance de leur rubéfaction; 2) le graphique «binormalisé» représentant les canaux vert, rouge et infrarouge permet de mettre en évidence les trajectoires spectrales de la végétation en fonction de leur densité et de leur taux de recouvrement d'une part, et du comportement spectral du sol sous-jacent d'autre part. Ces trajectoires partent de noyaux propres à chaque type de sol et convergent vers une zone commune correspondant à un taux de recouvrement de 100%. L'exploitation du graphique binormalisé doit permettre, lorsque les conditions pédologiques et de végétation l'autorisent, d'étalonner l'indice de végétation dérivé de données à haute résolution (HRV, TM) en termes de pourcentage de recouvrement de la végétation, et par extension en termes de capacité photosynthétique, avec un appui au sol limité, et ensuite d'extrapoler à des données à faible résolution (AVHRR).

## 1. Introduction

### 1.1. Utilité des indices de végétation

Parmi tous les indices de végétation proposés depuis les origines de la télédétection spatiale, l'indice de végétation normalisé (ROUSE *et al.*, 1974) est devenu l'outil standard de description du comportement spectral de la couverture végétale. Cet indice, le plus souvent appelé NDVI selon son abréviation anglaise, est calculé à partir de deux bandes spectrales, le rouge R et l'infrarouge IR selon la formule suivante :  $NDVI = (IR - R)/(IR + R)$ . Son utilité pour décrire le couvert végétal se base sur le fait que d'une part ce dernier absorbe préférentiellement (mais pas uniquement) l'énergie lumineuse dans les longueurs d'onde du rouge pour la photosynthèse, et réfléchit par contre fortement cette énergie dans le proche infrarouge, en fonction de la structure inter-cellulaire du matériel végétal photosynthétisant (GAUSMAN, 1985). En outre cet indice minimise la variation d'illumination en fonction du relief (HOLBEN and JUSTICE, 1981), mais reste sensible à la turbidité de l'atmosphère (SLATER and JACKSON, 1982; JACKSON *et al.*, 1983; CRIPPEN, 1988). Diverses alternatives ont été proposées (KAUTH and THOMAS, 1976; RICHARDSON and WIEGAND, 1977; PERRY and LAUTENSCHLAGER, 1984; HUETE, 1988; BARET *et al.*, 1989) pour remplacer le NDVI, mais ce dernier reste sans doute le plus largement utilisé.

L'indice de la différence normalisée a été relié à divers caractères descriptifs de la physiologie du couvert végétal, les trois plus importants étant l'indice foliaire, le pourcentage d'énergie solaire interceptée par le couvert pour la photosynthèse, et le pourcentage de couvert végétal. L'utilité de la première relation est relativement limitée, car on observe un effet de saturation pour des indices foliaires de l'ordre de 2 à 3 (HATFIELD *et al.*, 1984) ce qui somme toute est un cas très fréquent. Par contre, aussi bien les développements théoriques (SELLERS, 1985 et 1987) que les observations empiriques (ASRAR *et al.*, 1984) indiquent que la relation entre le NDVI et les autres paramètres tend à être linéaire. Cette linéarité permet d'envisager l'utilisation du NDVI pour estimer la productivité primaire à partir du modèle proposé par MONTEITH (1972) :

$$Rdt = \int_{t_1}^{t_2} PAR \cdot APAR \cdot \epsilon \, dt \quad (1)$$

où Rdt est la quantité de matière végétale produite au-dessus du sol;

$t_1$  et  $t_2$  définissent l'intervalle de temps sur lequel se fait l'intégration;

PAR est la partie du rayonnement global incident (en mégajoules, MJ) disponible au niveau du sol pour la photosynthèse; PAR vaut environ 45 à 50% du rayonnement global;

APAR est la fraction (en %) du PAR qui est effectivement absorbée par la végétation pour la photosynthèse; ce terme peut être estimé par le biais des indices de végétation dérivés des données télédéteectées;

$\epsilon$  est le coefficient de transformation de l'énergie lumineuse en matière sèche; il s'exprime généralement en g/MJ.

Dans le cas où on désire mesurer la production utile comme par exemple le grain chez les céréales, la productivité primaire doit être pondérée par le terme G qui est le rapport pondéral entre le grain, définissant le rendement utile que l'on désire connaître, et le reste de la biomasse, c'est-à-dire les organes photosynthétisants perceptibles par les capteurs satellitaires.

La validité de ce modèle a été empiriquement démontrée à diverses échelles, depuis la parcelle expérimentale jusqu'aux ensembles sous-continentaux.

## **1.2. Difficultés d'étalonnage des indices de végétation**

En ce qui concerne les données télédéteectées le problème majeur réside dans l'étalonnage des indices de végétation. Si les problèmes relatifs à la correction des capteurs et des effets atmosphériques commencent à être maintenant bien maîtrisés, il n'en reste pas moins que la plupart du temps les mesures adéquates manquent pour appliquer de manière effective ces corrections, et ce, spécialement dans les régions intertropicales. À supposer que cette étape est franchie, il reste encore à étalonner l'indice ainsi corrigé en termes de variables phyto-physiologiques, cette relation étant influencée par les propriétés optiques et structurales du couvert végétal.

La possibilité d'établir un étalonnage empirique des données satellitaires en termes de recouvrement et de taux d'interception de la lumière à l'aide de mesures de pourcentages de recouvrement a déjà été reconnue précédemment (BARTHOLOMÉ, 1989). Cependant il n'est pas toujours aisé de disposer des informations de terrain nécessaires à ce type d'approche. L'objectif est donc ici d'évaluer la possibilité d'étalonner les données satellitaires à haute résolution (HRV de SPOT) en compensant la faiblesse des observations de terrain par une exploitation raisonnée du comportement spectral des surfaces décrites par les données satellitaires. Si elle se révèle positive une telle approche devrait permettre par la suite d'étalonner empiriquement des données satellitaires à basse résolution (AVHRR/HRPT) avec un appui sur le terrain réduit au minimum.

## **1.3. Couvert végétal et radiométrie**

Nous ne considérons ici que la question de l'estimation du pourcentage de recouvrement, qui est une variable aisément contrôlable par mesure directe sur des photographies à grande échelle. Des études précédentes ont montré que les isolignes de recouvrement ne sont ni parfaitement parallèles ni parfaitement convergentes vers l'origine (HUETE, 1988), et que d'autre part ces isolignes se «ramassent» sur elles-mêmes pour les plus hauts taux de recouvrement, au point de définir un «point de convergence» des trajectoires radiométriques dans les canaux rouge et infrarouge (BARTHOLOMÉ, 1989). Ces trajectoires radiométriques décrivent l'accroissement de pourcentage de recouvrement du couvert végétal pour un type donné de sol en arrière-plan. Ces trajectoires affectent une forme incurvée (fig. 1) que les modèles radiométriques (KUMAR, 1988; BARET, 1988) relient à la réflectance infinie dans le rouge et l'infrarouge. Celle-ci se définit comme la réflectance du couvert végétal dans une longueur d'onde donnée d'une superposition de feuilles en nombre tel que l'ajout d'une feuille supplémentaire n'influence plus cette réflectance (ALLEN and RICHARDSON, 1968). Dans cette étude on s'efforce en plus de tenir compte de la trajectoire dans le vert, longueur d'onde où le comportement spectral se rapproche sensiblement de celui dans le rouge, on doit donc s'attendre à une linéarisation du comportement spectral dans ces deux canaux en fonction du taux de recouvrement de la végétation. L'information du canal XS1 (vert) est généralement considérée comme redondante avec celle du canal XS2 (rouge), ce qui se traduit en effet par des coefficients de corrélation très élevés. Cependant il est intéressant de noter que la couleur des sols et d'autres surfaces minérales se traduit souvent par des différences de réponse dans ces deux canaux (STONER *et al.*, 1980; STONER and BAUMGARDNER, 1981). C'est le cas par exemple des sols rubéfiés qui absorbent sensiblement plus le vert que d'autres sols (ELVIDGE and LYON, 1985). La combinaison de ces deux canaux du visible doit donc *a priori* renforcer ces contrastes.

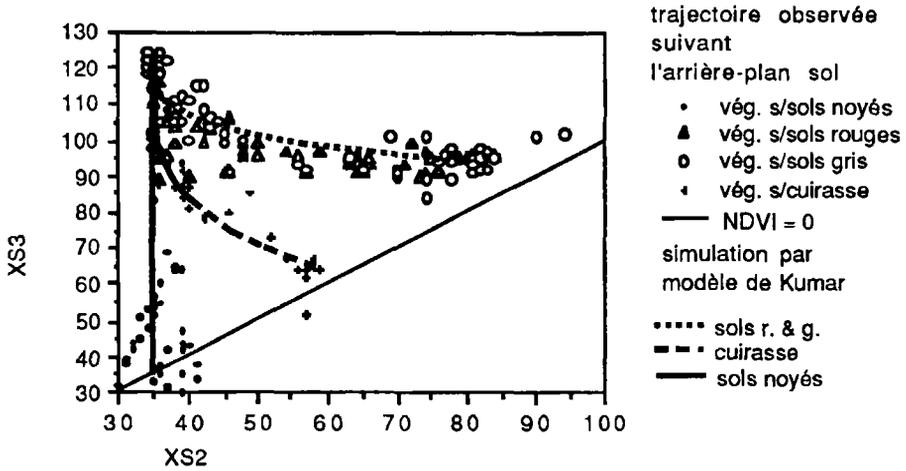


Figure 1. Site de Ségou : trajectoires de la radiométrie HRV en fonction du taux de recouvrement et du comportement spectral de l'arrière-plan sol, superposition des trajectoires théoriques obtenues avec le modèle de réflectance de KUMAR (1988)

#### 1.4. Le graphique binormalisé

Pour mener ce type d'analyse, HUBAUX *et al.* (1985) ont proposé de représenter simultanément les trois canaux de HRV dans le canevas d'une projection stéréographique (fig. 2). Une telle présentation permet de lire simultanément sur un seul et même graphique à la fois l'indice de végétation et un indice de jaunissement. La projection choisie présente cependant à l'usage deux inconvénients. D'une part, le calcul des transformations de coordonnées est relativement lourd et, d'autre part, la lecture en est malaisée car parallèles et méridiens y sont représentés sous forme de courbes.

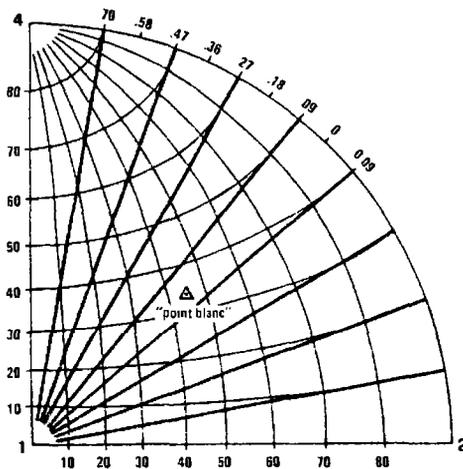


Figure 2. Le canevas stéréographique de Wulff présentant ici le canal rouge en X, le canal infra-rouge en Y et le canal vert en Z; le NDVI est figuré par les droites convergentes à l'origine (d'après HUBAUX *et al.*, 1985)

S'inspirant de ce principe de représentation, on exploite ici un système graphique simplifié avec un canevas orthogonal : l'ordonnée figure le jaunissement par la différence normalisée entre canaux XS1 et XS2, tandis que l'abscisse représente la différence normalisée classique entre XS2 et XS3. Cette représentation est baptisée pour la circonstance «graphique binormalisé». Il ne s'agit plus ici à proprement parler d'une représentation de type cartographique, puisque les différences normalisées ne sont apparentées aux angles que de manière indirecte via la tangente ( $NDVI = \text{tg} [a + (P/4)]$ ),  $a$  étant l'angle formé par le vecteur à l'origine dans le plan défini par les axes XS2 et XS3. Le calcul est simple et rapide aussi bien pour des données radiométriques de terrain que pour des images satellitaires, et les isolignes sont des droites parallèles et équidistantes.

## 2. Matériel

Pour vérifier le bien-fondé des hypothèses émises et de l'utilité de la méthode proposée, on a utilisé, d'une part, un ensemble de données collectées (tab. I) en 1986 sur une zone d'environ 6 km<sup>2</sup> située en bordure du fleuve Niger (13°22'N - 6°22'O) à 15 km au sud-ouest de Ségou, au Mali et, d'autre part, des données satellitaires complétées d'observations préliminaires de terrain dans une zone d'une cinquantaine de kilomètres de côté située au nord-ouest de Bobo-Dioulasso et centrée approximativement sur la bourgade de Samandéni (12°27'N - 4°27'O) (fig. 3 et 4).

### 2.1. Le site de Ségou

La zone comprise entre Banankoroni et Dougoukouna, au sud-ouest de Ségou constitue le site de référence de cette étude. Elle s'étend sur un éventail varié de conditions écologiques caractéristiques de la bordure du fleuve Niger (fig. 5).

Les parties basses non aménagées et les îles du fleuve sont marquées par des chenaux anastomosés où se développe une végétation aquatique abondante. Certains indices sur les images (notamment la forme géométrique des surfaces végétalisées) indiquent qu'on s'y adonne localement à la riziculture. En général, les crêtes sableuses entre les chenaux restent

**Tableau I.** Synthèse des données satellitaires, aérophotographiques et de terrain utilisées dans cette étude

	Site de Ségou	Site de Bobo-Dioulasso
Images satellitaires	HRV XS, 09-10-1986, R 2°1, 11:03:25, KJ 43-323	HRV XS, 08-09-1990, L 17°, 11:03:57, KJ 48-327 HRV XS, 26-10-1990, R 21°, 10:44:46, KJ 48-327 HRV XS, 09-08-1991, R 20°, 10:44:37, KJ 48327
Photographies aériennes	CCR : IRFC et couleurs, 1:2 500 - 1:12 000, 70 mm, 02-10-1986	IGB : NB, 1:50 000, 240 mm, 15-11-1981
Observations de terrain	Levé parcellaire, types de cultures	Reconnaissance

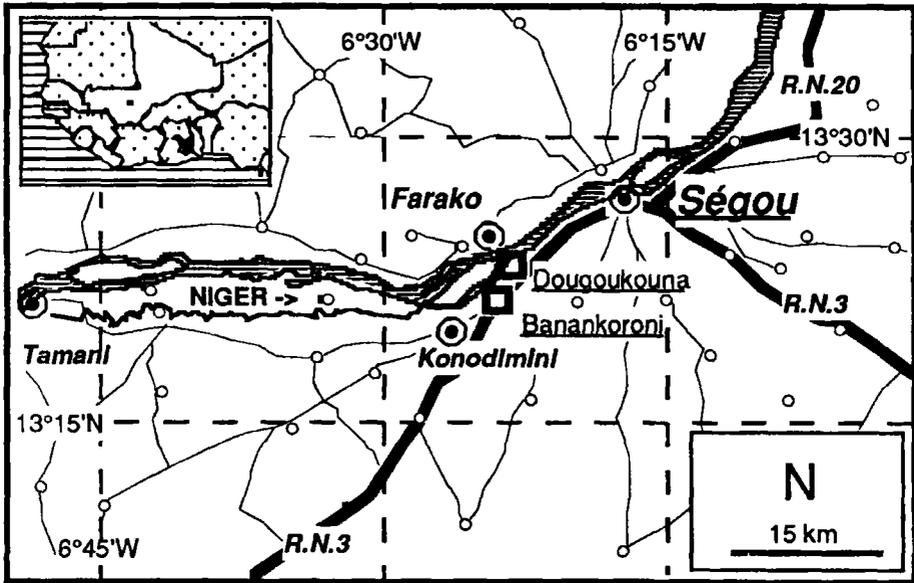


Figure 3. Zone de Ségou avec localisation du site-test de Banankoroni-Dougoukouna

libres de végétation. Les berges du fleuve peuvent recevoir quant à elles de petites parcelles de maïs.

En bordure du fleuve se trouvent les casiers rizicoles de Konodimini dépendant de l'Opération Riz Ségou. Ils sont séparés du fleuve par une simple digue en terre destinée à les protéger des crues trop abondantes, ce qui est devenu très rare ces dernières années. Ils sont alimentés par simple gravité grâce à une prise d'eau située à 40 km à l'amont (Tamarli), qui dérive les eaux durant la crue via un canal. Là où la lame d'eau est faible on cultive le riz dressé (*Oryza sativa*, d'origine asiatique), on réserve le riz flottant (*Oryza glaberrima*, d'origine locale) pour les parties profondes.

Au-dessus du lit majeur, le fleuve est bordé d'une large frange de sols sablo-limoneux de teinte grisâtre. Les champs y sont de taille modeste et peuvent recevoir des cultures spécifiques à ce milieu bien approvisionné en eau grâce à la présence à faible profondeur de la nappe phréatique alimentée par le fleuve. On trouve une première bande occupée de parcelles de manioc (*Manihot esculenta*) encloses de haies, et de mangeraies (*Mangifera indica*), et ensuite une deuxième bande où se rencontrent des cultures variées ainsi que des vergers d'agrumes (*Citrus spp.*). Toute cette frange se caractérise par la relative absence d'arbres hors des vergers, par l'absence de jachères et la faible taille du parcellaire.

Au-delà de cette frange fluviale se développent de grandes zones de culture pluviale (mil, sorgho, niébé, arachide, etc.) dans un paysage arboré dominé par le balézan (*Acacia albida*) et le karité (*Vitellaria paradoxa*).

Les cuirasses et les terres hors du domaine agricole sont occupées par un couvert arbustif à arboré de densité variable. Ces espaces sont soumis au pâturage des bovidés principalement. Cette activité se note par des auréoles de piétinement et par des couloirs de traversée du domaine cultivé pour abreuver le bétail au fleuve.

Sur l'image HRV utilisée, quatre types de surfaces nues peuvent se reconnaître : l'eau, les cuirasses, les bancs sableux du fleuve et les sols agricoles. Trois grands types de couvert

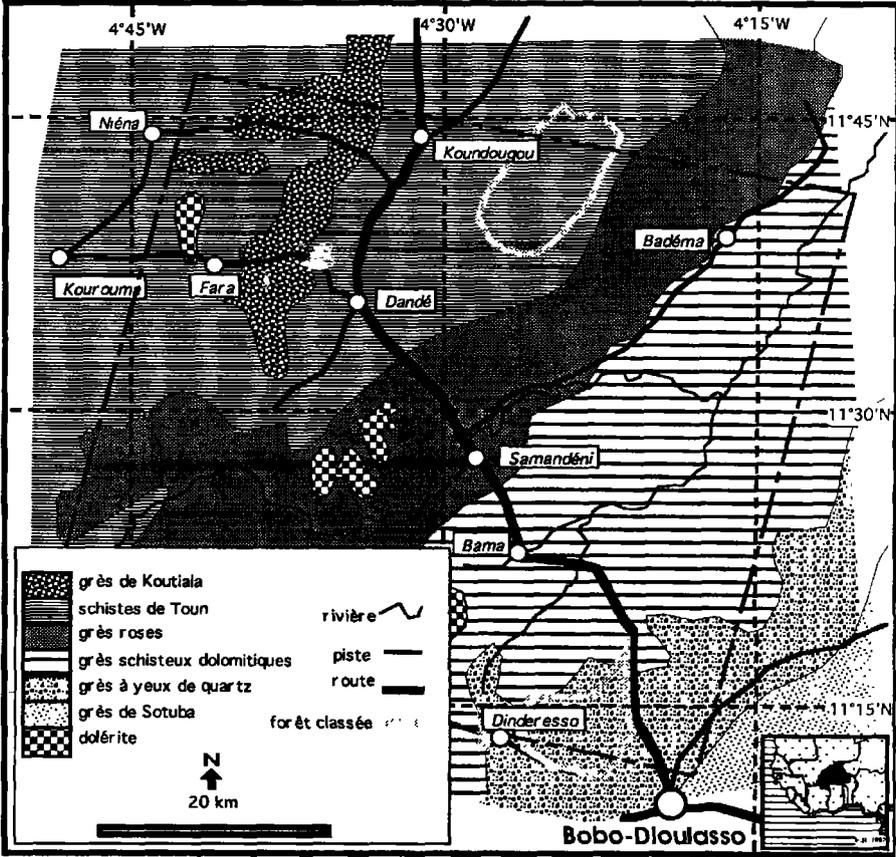


Figure 4. Zone de Bobo-Dioulasso (Burkina Faso); le losange en tireté indique la zone couverte par les images HRV

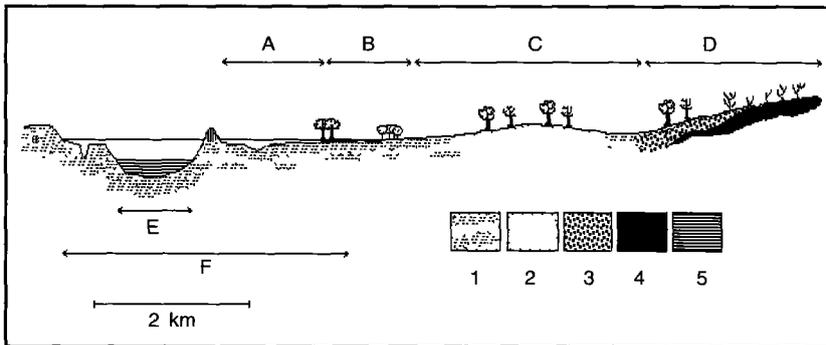


Figure 5. Profil descriptif du paysage dans la région de Ségou; A : casier rizicole, B : frange à cultures permanentes et vergers, C : cultures pluviales avec jachères, bicage de Karité et Balanzan, D : végétation semi-naturelle pâturée. E : lit mineur du Niger, F : lit majeur, 1 : sols argilo-limoneux (TI2 et PL9), 2 : sols sableux (TS3), 3 : dépôts gravillonnaires, 4 : cuirasse, 5 : rivière

végétal se discriminent : végétation herbacée dominante y compris les cultures, végétation ligneuse dominante non compris les vergers, végétation aquatique.

Les sols agricoles de la zone d'étude comprennent trois groupes selon la classification de l'Atlas des ressources terrestres du Mali (PIRT, 1983) :

- groupe TI2 (Typic Tropaqualfs) : sols hydromorphes à gley. Ces sols profonds se développent exclusivement sur alluvions fluviales à texture fine. Ils sont très mal drainés et se caractérisent par une forte gleyification. Ils sont spécifiquement associés à la riziculture par submersion contrôlée. Sur l'image HRV, ces sols sont déjà submergés;

- groupe PL9 (Plinthic Haplustalfs) : sols ferrugineux lessivés à pseudogleys ou taches et concrétions. Ce sont des sols profonds imparfaitement drainés développés sur alluvions. Quand elle est sèche, la surface est gris clair, ou brun grisâtre. Ces sols seront simplement appelés «sols gris» par la suite;

- groupe PS3 (Ultic Haplustalfs) : sols ferrugineux lessivés. Ce sont des sols profonds sur alluvions sableuses. En contre-haut des précédents, ils sont bien drainés. Ils apparaissent bruns ou rouges en surface. Ces sols seront simplement appelés «sols rouges» par la suite.

Les deux derniers groupes sont essentiellement occupés par des cultures pluviales variées, avec jachère courte.

Les levés de terrain et les prises de vues aériennes se sont concentrés sur un site long d'environ quatre kilomètres et large de un kilomètre et demi, parallèle au fleuve et chevauchant la route nationale 3.

Les prises de vues ont été effectuées à l'aide d'un avion «ultra-léger motorisé» (GRÉGOIRE and ZEYEN, 1986; BARTHOLOMÉ *et al.*, 1988), elles ont été acquises à l'aide d'une caméra Hasselblad modèle 500ELX, équipée d'un objectif de 80 mm Planar. Pour les prises de vues en infrarouge fausses couleurs, la chambre était équipée d'une optique de 50 mm Distagon avec porte-filtre. Le déclenchement de l'appareil était assuré par un intervallo-mètre. Trois types différents de pellicule ont été utilisés : Kodak Vericolor II (négatif couleurs), Kodak Aerochrome MS 2448 (positif couleurs naturelles) et Kodak Aerochrome infrared 2443 (positif IRFC).

Les levés de terrain, photographies aériennes et données satellitaires ont été combinés de la manière suivante.

On a d'abord visualisé la bande vidéo des passages à l'altitude la plus élevée, enregistrée simultanément aux prises de vues par ULM, et on a établi à main levée le tracé des pistes et des limites du parcellaire à partir de cette visualisation. Les observations de terrain récoltées sur un cheminement d'environ 6 km ont été localisées sur cette ébauche de plan parcellaire.

Les limites des parcelles ont ensuite été tracées de manière systématique sur la mosaïque non contrôlée des photos aériennes 70 mm à l'échelle du 1:2 500. La carte d'occupation du sol a été établie sur cette base par photo-interprétation, en se référant aux observations collectées sur le terrain.

En superposant le calque du parcellaire à l'image HRV on a finalement sélectionné une trentaine de parcelles pour lesquelles les signatures spectrales ont été extraites des données satellitaires. Les taux de recouvrement correspondants ont été mesurés par comptage à l'aide d'une grille de points superposée à des agrandissements des photos aériennes à une échelle de l'ordre du 1:580.

## 2.2. Le site de Bobo-Dioulasso

La zone étudiée, située au nord-ouest de Bobo-Dioulasso, recouvre des terrains sédimentaires s'étendant sur le Précambrien et le Paléozoïque, sans que la concordance des stratotypes soit

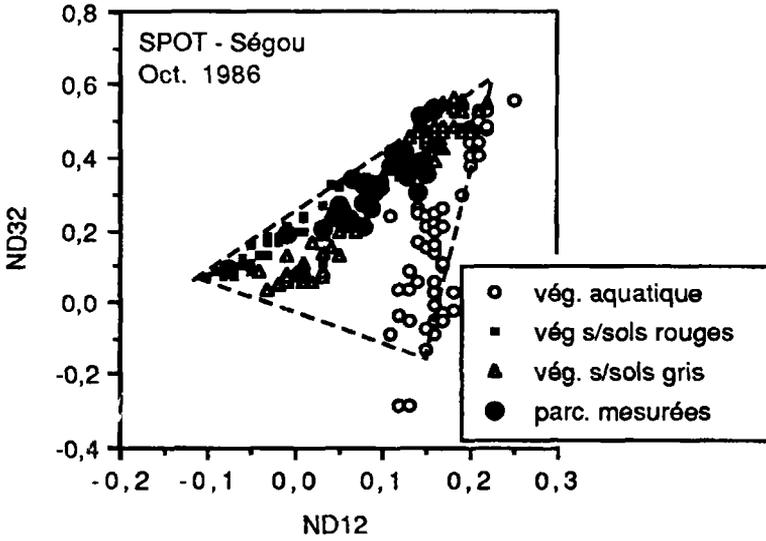


Figure 6. Site de Ségou : triangle de convergence des trajectoires pour diverses cibles définies par interprétation de l'image HRV, et superposition des valeurs correspondant aux parcelles dont le recouvrement a été mesuré sur photos aériennes (voir aussi fig. 9)

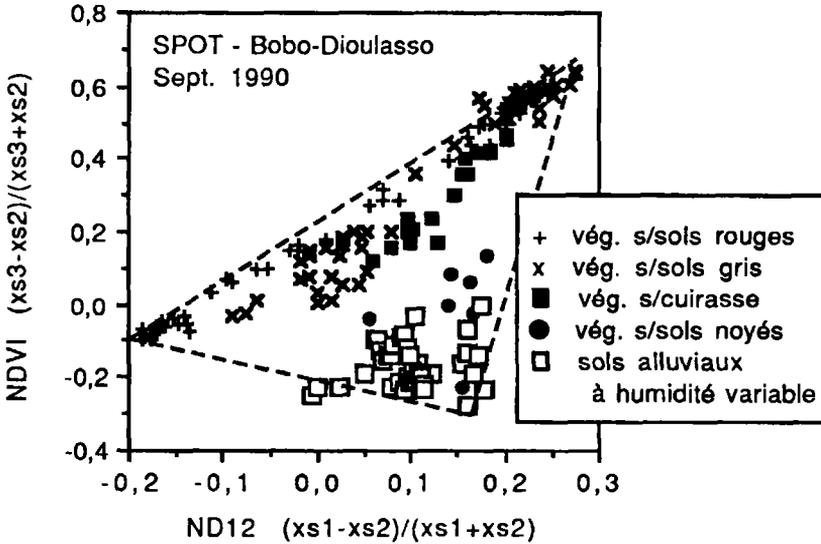


Figure 7. Site de Bobo-Dioulasso : triangle de convergence des trajectoires pour diverses cibles définies par photo-interprétation de l'image HRV

vraiment établie avec précision. Les couches ont un pendage général vers le nord-ouest et sont localement recoupées par des intrusions de dolérite d'âges variés (fig. 7). L'assise des grès à yeux de quartz se singularise sur l'imagerie satellitaire par une tonalité indicatrice de sols fortement rubéfiés, classés comme «sols ferrugineux tropicaux» et «sols ferrallitiques» sur la carte de reconnaissance des sols au 1:500 000 (MOREAU *et al.*, 1969). Par contraste, l'assise des grès schisteux et dolomitiques détermine la redistribution de calcaire et de magnésium dans les sols sus-jacents et spécialement le long du réseau hydrographique (RIEFFEL *et al.*, 1969). Ces sols présentent des couleurs de surface tendant vers le grisâtre.

Toute la région est soumise depuis une vingtaine d'années à un accroissement important des superficies cultivées lié à l'arrivée de nombreux migrants originaires des plateaux Mossi (OUATTARA, 1988). Les cultures pratiquées sont principalement le sorgho, le mil, le maïs, l'arachide et le coton. La riziculture y est également intensément pratiquée, soit dans les zones aménagées (Bama, Banzon), soit dans les zones inondables du Mou Houn et de ses affluents. Les espaces non agricoles se présentent comme une savane arborée. Localement dans les réserves forestières, la canopée du couvert ligneux peut atteindre et dépasser 75% de recouvrement.

Sur cette zone, une série de sites-cibles ont été sélectionnés par photo-interprétation visuelle de la composition colorée HRV complétée de l'image «indice de végétation» correspondante, de documents cartographiques (géologie, pédologie, types d'occupation du sol), de photographies aériennes au 1:50 000 et d'observations de terrain. Les critères de choix des sites étaient la diversité des types de sol et la variabilité de densité apparente du couvert végétal. Les comptes numériques correspondants ont été organisés selon les grands types de couleur de sol (fig. 7).

### 3. Résultats

L'analyse statistique d'une image HRV de Bobo-Dioulasso indique que la différence normalisée des canaux vert et rouge ne représente pas préférentiellement une bande spectrale originale ou un néo-canal particulier. Les corrélations s'observent dans l'ordre décroissant avec le NDVI, les simples différences XS3-XS2 et XS1-XS2, XS2, et enfin XS1. Fort logiquement la corrélation la plus basse s'observe avec le canal XS3 qui n'entre pas dans le calcul de l'indice étudié. Par contre, il est intéressant de noter l'assez bonne corrélation avec les indices de végétation ( $R = 0,78$  pour le NDVI et  $0,7$  pour la simple différence). Cette observation peut s'expliquer comme suit. Un indice de végétation croissant traduit un accroissement de la réflectance dans l'infrarouge simultanément à une réduction de la réflectance dans le rouge. Parallèlement, on assiste à une inversion de la pente du profil spectral entre le vert et le rouge au fur et à mesure qu'on passe d'une situation de sol nu à une situation de sol masqué par la végétation. Dans le premier cas, la réflectance s'accroît régulièrement avec la longueur d'onde, tandis que dans le deuxième cas l'absorption du rouge par les pigments chlorophylliens est nettement supérieure à celle du vert. Ainsi donc, la forte redondance entre les canaux rouge et vert cache une information congruente avec celle de l'indice de végétation, tout en trouvant son origine dans des comportements radiométriques spécifiques.

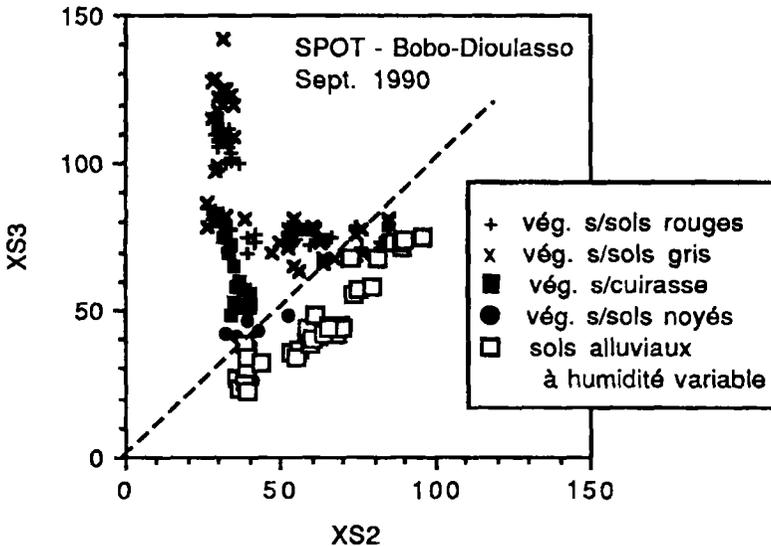
Les figures 6 et 7 confirment cette interprétation. En fonction de la nature et de la couleur de l'arrière-plan, on peut définir des trajectoires quittant le sol nu avec des indices normalisés XS1-XS2 bien différenciés, et secondairement de légères différences d'indices NDVI dues à la non-superposition de la ligne des sols avec l'isoline NDVI = 0. Avec l'accroissement de

densité de végétation, ces trajectoires convergent vers une zone qu'on peut supposer devoir se réduire à un point. En effet, lorsque le couvert végétal est complet, le sol n'interfère plus dans le signal reçu dans des longueurs d'onde du visible. La variabilité résiduelle peut être attribuée, d'une part, à de légères différences de couleur entre espèces végétales et, d'autre part, à des effets de sénescence (jaunissement du feuillage). Contrairement à ce qui était observé sur le graphique XS3-XS2 (fig. 1 et 8), les trajectoires sont ici rectilignes. Le point défini par la convergence de ces trajectoires correspond à des taux de recouvrement observés de l'ordre de 100% (fig. 6 et 9). La simple interprétation de la forme des trajectoires permet donc de localiser ce point. La relation entre indice de végétation NDVI et pourcentage de recouvrement tendant vers la linéarité (BARTHOLOMÉ, 1989), la position observée sur le graphique binormalisé de la ligne des sols nus d'une part, et du point de convergence associé au recouvrement total d'autre part permet d'étalonner le NDVI en termes de pourcentage de recouvrement. Lorsque l'observation satellitaire est enregistrée à une période où la végétation n'est pas à son plein développement, le triangle est tronqué.

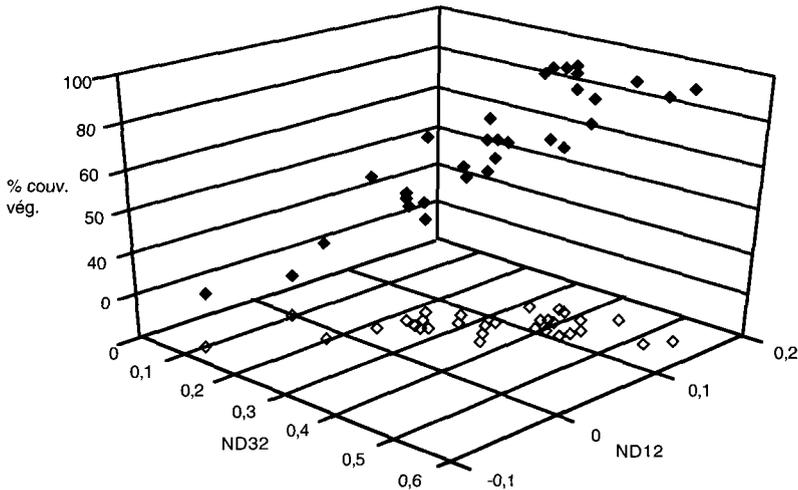
#### 4. Discussion

On peut émettre l'hypothèse que dans le cas où la dynamique des indices de végétation est tronquée, l'extrapolation des trajectoires permet de localiser le point théorique de convergence, mais cela n'a pas encore pu être vérifié expérimentalement.

Les mesures de recouvrement servent uniquement à confirmer la validité de l'hypothèse «point de convergence = recouvrement de 100%». Dans la mesure où des répétitions de cette



**Figure 8.** Site de Bobo-Dioulasso : trajectoires de la radiométrie HRV en fonction de la densité apparente de la végétation et du comportement spectral de l'arrière-plan sol; noter la très grande variabilité dans l'infrarouge pour les valeurs minima dans le rouge et la position sous la ligne NDVI=0 de la ligne des sols



**Figure 9.** Site de Ségou : relation entre les différences normalisées XS3-XS2 et XS1-XS2 et le taux de recouvrement mesuré par parcelle

expérimentation préliminaire la confirmeront, il ne sera plus nécessaire de faire appel systématiquement à des observations de terrain, les mesures significatives pouvant être effectuées directement sur l'image par sélection visuelle des sites appropriés.

Les observations menées ici n'ont fait appel à aucune correction radiométrique ou atmosphérique. Il est clair que les données utilisées sont contaminées par ces effets. Cependant, les modèles actuels ne peuvent que corriger les défauts systématiques, et non les variations locales dues par exemple à un voile atmosphérique local. De plus, elles peuvent requérir des mesures des caractéristiques atmosphériques qui sont difficilement disponibles pour les zones sahéliennes. En fait ces perturbations se traduisent sur le graphique binormalisé par des échelles plus ou moins larges, et par des valeurs absolues variables de la ligne des sols et du point de convergence. La figure 7 illustre ce point. Alors que la réflectance de la plupart des sols nus est supérieure dans l'infrarouge à celle du rouge, entraînant des valeurs de NDVI supérieures à 0, cette figure dérivée d'une image HRV de septembre 1991 montre des valeurs de NDVI sur sols nus systématiquement négatives. Ce phénomène est à attribuer soit à l'étalonnage des capteurs soit à l'atténuation de Rayleigh (vapeur d'eau). Indépendamment de la cause de cette perturbation, le graphique binormalisé permet de réajuster empiriquement le NDVI en termes de recouvrement.

Le point de convergence apparaît dans la réalité comme une zone plus ou moins large. On a déjà évoqué précédemment la question de la couleur et du jaunissement du matériel végétal. Les modèles de réflectance suggèrent aussi qu'en théorie la structure du couvert végétal n'est pas sans influence sur la relation NDVI pourcentage de recouvrement. Il reste à vérifier si ce paramètre est à prendre en compte pour des mesures satellitaires dont les pixels intègrent divers types de couvert. Dans l'affirmative, l'effet de la visée angulaire serait aussi à intégrer dans le calcul.

Néanmoins, malgré ces multiples inconnues et limitations, l'approche proposée constitue une méthode raisonnablement réalisable en conditions réelles pour d'une part tenter d'étalonner de manière empirique les données à basse résolution telles que les indices de végétation dérivés des données AVHRR, et pour d'autre part confronter les résultats des modèles déterministes à la réalité du terrain qu'il n'est matériellement pas possible de décrire d'une manière suffisamment détaillée à l'aide des seules méthodes classiques de mesures *in situ*.

## **5. Conclusions**

L'étude présentée ici a permis une évaluation préliminaire de l'utilité du graphique binormalisé pour étalonner les indices de végétation en termes de pourcentage de recouvrement par la végétation. Les premières observations indiquent la faisabilité de l'approche proposée. Elles montrent la nécessité d'en vérifier le bien-fondé par des expérimentations complémentaires, et l'utilité d'évaluer sa sensibilité à la structure de la végétation et à la visée oblique.

## **6. Remerciements**

Les données du site de Ségou ont été collectées dans le cadre de la collaboration du Centre commun de recherche (C.C.R.) avec le projet du Comité inter-États de lutte contre la sécheresse au Sahel intitulé «Surveillance des ressources naturelles renouvelables au Sahel» et financé par le Fonds européen de développement. Des remerciements particuliers s'adressent à J.-M. Grégoire, R. Zeyen et G. Bonvini du C.C.R., et à F. Ouattara et P. Delorme du projet «Surveillance» qui ont tout mis en oeuvre pour la réussite de la campagne de terrain. Ce travail n'aurait pu se réaliser sans la fructueuse collaboration du personnel de la Direction nationale de la cartographie et de la topographie à Bamako, et de l'Opération riz Ségou à Ségou. Dans la région de Bobo-Dioulasso, nous avons bénéficié du support actif et efficace du service de statistique de la Direction des études et programmes du Ministère de l'agriculture, et de l'Institut géographique du Burkina. Que tous trouvent ici l'expression de ma gratitude.

## **7. Références**

- ALLEN, W. and RICHARDSON, A. 1968. Interaction of light with a plant canopy. *Optical Society of America*, vol. 58, p. 1023-1031.
- ASRAR, G., FUCHS, M., KANEMASU, E. T. and HATFIELD, J. L. 1984. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agronomy Journal*, vol. 76, p. 300-306.
- BARET, F. 1988. Un modèle simplifié de réflectance et d'absorptance du couvert végétal. Actes du quatrième colloque sur les signatures spectrales d'objets en télédétection, Aussois-Modane, France, ESA-SP 287, p. 113-120.
- BARET, F., GUYOT, G. and MAJOR, D. 1989. TSAVI : a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI or APAR estimation. *Proceedings of the 12th Canadian Symposium on Remote Sensing and IGARSS'89*, Vancouver, Canada, p. 1355-1358.
- BARTHOLOMÉ, É., GRÉGOIRE, J.-M. and ZEYEN R. 1988. Small format air photo from ultralight aircraft as an aid for data collection of agricultural statistics in Sahelian countries. *Proceedings IGARSS'88*, Edinburgh, ESA SP-284 (IEEE 88CH2497-6), p. 269-270.
- BARTHOLOMÉ, É. 1989. Calibration of vegetation indices for APAR measurements using intrinsic satellite image information. *Proceedings of the Remote Sensing Society annual conference*, University of Bristol, p. 47-52.
- CRIPPEN, R. E. 1988. The dangers of underestimating the importance of data adjustments in band ratioing. *International journal of remote sensing*, vol. 9, n° 4, p. 767-776.

- ELVIDGE, C. D. and LYON, R. J. P. 1985. Influence of soil-rock spectral variation on the assessment of green biomass. *Remote sensing of environment*; vol. 17, p. 265-279.
- GAUSMAN, H. W. 1985. Plant leaf optical properties in visible and near-infrared light. Texas Technical Press, Lubbock, Texas, 78 p.
- GRÉGOIRE, J.-M. and ZEYEN, R. 1986. An evaluation of ultralight aircraft capability for remote sensing applications in West Africa. *International journal of remote sensing*, vol. 7/8, p. 1075-1081.
- HATFIELD, J. L., ASRAR, G. and KANEMASU, E. 1984. Intercepted photosynthetically active radiation estimated by spectral reflectance. *Remote sensing of environment*, vol. 14, p. 65-75.
- HOLBEN, B. and JUSTICE, C. 1981. An examination of spectral band ratioing to reduce the topographic effect on remotely sensed data. *International journal of remote sensing*, vol. 2, n° 2, p. 115-133.
- HUBAUX, A., FERRARI, G. et GRÉGOIRE, J.-M. 1985. Suivi radiométrique de cultures vivrières en zone sahélienne. Actes du colloque signatures spectrales d'objets en télédétection, Les Arcs, France, p. 443-449.
- HUETE, A. R. 1988. A soil adjusted vegetation index (SAVI). *Remote sensing of environment*, vol. 25, p. 295-309.
- JACKSON, R. D., SLATER, P. N. and PINTER, P. J. Jr. 1983. Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmospheres. *Remote sensing of environment*, vol. 13, p. 187-208.
- KAUTH, R. J. and THOMAS, G. S. 1976. The tasseled cap - a graphic description of the spectral temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. *Proceedings Symposium on Machine Processing of Remote Sensing Data, LARS, Purdue University, West Lafayette*, vol. 4b, p. 41-51.
- KUMAR, M. 1988. Crop canopy spectral reflectance. *International journal of remote sensing*, vol. 9/2, p. 285-294.
- MONTEITH, J. L. 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, n° 9, p. 747-766.
- MOREAU, R., GUICHARD, E., LEPRUN, J.-C. et POTTIER, J.-C. 1969. Carte pédologique de reconnaissance de la république de Haute-Volta au 1:500 000. Feuille Ouest-Nord. Centre ORSTOM de Dakar.
- OUATTARA, N. 1988. L'évolution des activités agricoles dans la zone ouest du Burkina Faso. La confrontation des espaces ruraux avec des sollicitations nationales concurrentes. L'exemple des Hauts Bassins. Thèse de troisième cycle, Université de Caen, Département de géographie, 250 p.
- PERRY, C. R. and LAUTENSCHLAGER, L. F. 1984. Functional equivalence of spectral vegetation indices. *Remote sensing of environment*, vol. 14, p. 169-182.
- PIRT 1983, Atlas des ressources terrestres du Mali. USAID-TAMS, New-York, 3 vol.
- RIEFTEL, J.-M., MOREAU, R., FAUCK, R., GUICHARD, E. et MERCKY, P. 1969. Étude pédologique de la Haute-Volta, Région : Sud-Ouest - notice. Centres ORSTOM de Dakar-Hann et Adiopoumé, 250 p.
- RICHARDSON, A. J. and WIEGAND, C. L. 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 43, n° 12, p. 1541-1552.
- ROUSE, J. W., HAAS, R. H., SCHELL, J. A., DEERING, D. W. and HARLAN, J. C. 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation. NASA/GSFC Type III Final Report, Grennbelt, Maryland, 50 p.
- SELLERS, P. J. 1985. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 6, n° 8, p. 1335-1372.

*Le graphique «binormalisé» : un outil d'étalonnage des indices de végétation*

- SELLERS, P. J. 1987. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. II. The role of biophysics in the linearity of their interdependence. *Remote sensing of environment*, vol. 21, p. 143-183.
- SLATER, P. N. and JACKSON, R. D. 1982. Atmospheric effects on radiation reflected from soils and vegetation as measured by orbital sensors using various scanning directions. *Applied Optics*, vol. 21, n° 21, p. 3923-3931.
- STONER, E. R., BAUMGARDNER, M. F., WEISMILLER, R. A., BIEHLN L. L. and ROBINSON, B. F. 1980. Extension of laboratory-measured soils spectra to field conditions. *Soil Science Society American Journal*, vol. 44, p. 572-574.
- STONER, E. R. and BAUMGARDNER, M. F. 1981. Characteristic variations in reflectance of surface soils. *Soil Science Society American Journal*, vol. 45, p. 1161-1165.



# 16

## **Utilisation des bandes spectrales du vert et du rouge pour une meilleure évaluation des formations végétales actives**

PHILIPPE CHAMARD\*, MARIE-FRANÇOISE COUREL\*,  
MICHÈLE DUCOUSSO\*, MARIE-CLAIRE GUÉNÉGOU\*\*,  
JEANNINE LE RHUN\* et \*\*\*, JACQUES-ÉDOUARD LEVASSEUR\*\*,  
CATHERINE LOISEL\*\*\*\* et MÉMÉ TOGOLA\*\*\* et \*\*\*\*\*

*\*Laboratoire IMAGEO/CNRS, 191, rue Saint-Jacques, 75005 Paris, France;  
téléphone : (33) (1) 43-29-82-60; télécopie (33) (1) 43-29-63-83*

*\*\*Laboratoire de botanique, Université de Rennes I, 35042 Rennes cedex, France;  
téléphone : (33) 99-28-69-58; télécopie : (33) 99-28-67-00*

*\*\*\*Laboratoire de géomorphologie, École pratique des hautes études, IMAGEO/CNRS,  
191, rue Saint-Jacques, 75005 Paris, France; téléphone : 33 (1) 43-29-82-60;  
télécopie : 33 (1) 43-29-63-83*

*\*\*\*\*École nationale d'ingénieurs des techniques des industries agricoles et alimentaires,  
chemin de la Géraudière, 44000 Nantes, France; téléphone : (33) 40-40-03-00*

*\*\*\*\*\*Centre de recherches zootechniques de Sotuba, B. P. 262, Bamako, Mali;  
téléphone : (223) 22-41-92*

### **Résumé**

Le delta central du Niger au Mali, hydrosystème d'une superficie de 15 000 km<sup>2</sup>, est inondé chaque année de juillet à novembre; l'évolution des formations végétales actives y est déterminée par l'ampleur de la crue. Un indice de verdure utilisant les données spectrales dans les longueurs d'onde du vert et du rouge (vert - rouge / vert + rouge) s'est révélé performant

pour identifier les différentes formations. En laboratoire, une relation étroite a été établie entre cet indice de verdeur et le chroma (pureté de la teinte) : corrélation de 0,85, significative à 0,1%. Cette relation montre que l'indice de verdeur est pertinent pour discriminer des groupements végétaux présentant des états phénologiques identiques dans des conditions hydro-environnementales particulières, comme c'est le cas dans les plaines du delta pendant la période des hautes eaux.

## 1. Introduction

Le delta central du Niger, situé dans le Sahel malien, couvre une superficie de 15 000 km<sup>2</sup> (fig. 16-1, voir cahier couleur). Cette région est, au plan international, considérée comme une des zones humides les plus importantes de la planète. Il s'agit d'une immense plaine quasi horizontale (sa pente n'est que de 0,5%) parcourue par un lacs complexe de défluent : les mayos. C'est par l'intermédiaire de ce labyrinthe hydrographique que les eaux du Niger et du Bani inondent les plaines du delta et remplissent les lacs Debo et Walado de la fin juillet à la fin novembre. Le Niger et le Bani apportent à la zone d'inondation 70 milliards de m<sup>3</sup> d'eau dont la moitié seulement s'en échappe en aval du Débo. Au moment des hautes eaux, «Tiolté», la monotonie de l'immense tapis vert-émeraude (fig. 16-2, voir cahier couleur) formé par les vétiveraies, les prairies à panicées, les oryzaies et les bourgoutières n'est rompue que par les levées alluviales (péroud'i) et les tertres (tougué) sur lesquels sont bâtis les villages peuls et bozo.

Les potentialités du delta sont remarquables, mais difficiles à exploiter rationnellement, tant elles sont assujetties aux conditions pluviométriques et hydrologiques (HIERNAUX *et al.*, 1989). Les pâturages, riches et abondants, ont une production élevée : celle des bourgoutières par exemple varie entre 10 et 30 tonnes de matière sèche par hectare. La superficie totale des bourgoutières peut atteindre en cas de bonne crue 800 000 hectares, et seulement 50 000 à 200 000 hectares en cas de crue très faible comme celle de 1983 (FRANÇOIS *et al.*, 1989).

Depuis 20 ans, la crise climatique qui sévit en Afrique de l'Ouest (COUREL *et al.*, 1984) a profondément modifié le régime des crues du Niger, réduisant l'étendue et la durée de submersion des plaines inondées du delta central (FRANÇOIS *et al.*, 1991).

Les résultats présentés ici ont été obtenus dans le cadre d'un programme de recherche visant à établir, à partir de l'imagerie satellitaire, un inventaire et une cartographie dynamique des différentes unités de paysage qui composent ces milieux inondables.

## 2. Matériel et méthode

Les traitements effectués sur les canaux rouge et proche-infrarouge (classifications automatiques et supervisées, indices divers) isolent, sur les images satellitaires HRV de SPOT du 3 janvier 1989 et du 7 janvier 1990, les différentes formations végétales actives, sans pouvoir cependant discriminer les différentes formations aquatiques. Les données spectrales du vert et du rouge sont habituellement très corrélées, mais il s'avère que, dans le cas de formations vertes denses et très couvrantes, telles les bourgoutières ou les oryzaies, les informations distinctes fournies dans ces canaux apportent des renseignements spécifiques intéressants sur l'état phénologique des espèces.

Partant du constat que, pour un même stade phénologique, la couleur des différentes espèces végétales n'est pas identique, nous avons entrepris de rechercher s'il existait une

relation entre les caractéristiques de la couleur et les données de la réflexion dans les canaux S1 (vert) et S2 (rouge) de HRV. Pour cela, nous avons choisi d'analyser la couleur au maximum de l'activité photosynthétique du feuillage chez différentes espèces et tenté de mettre en évidence la valeur discriminante d'un indice de verdeur dans l'utilisation des données satellitaires.

La couleur d'une végétation est analysée à l'aide de trois caractéristiques : la teinte, liée à la longueur d'onde dominante (ici, le vert), la saturation ou pureté de la teinte et la clarté, caractéristique d'intensité (vert clair ou foncé). Ces trois caractéristiques interviennent à des degrés divers dans les données de réflexion ou d'absorption de la lumière par la végétation.

À l'aide d'un indice de verdeur appelé NDGI (Normalized Difference Greenness Index), calculé à partir des données dans les bandes verte et rouge (V-R/V+R), nous avons effectué une cartographie des formations végétales (fig. 16-3 et 16-4, voir cahier couleur).

Parallèlement, en Bretagne, des mesures de réflexion diffuse ont été réalisées à partir de 13 espèces végétales à l'aide d'un spectrophotomètre (UVIKON 810P) muni d'une sphère d'intégration. Ces mesures ont été effectuées au cours du mois de mai 1991, c'est-à-dire au maximum de l'activité photosynthétique du feuillage considéré. Les valeurs retenues pour chacune des espèces correspondent à la face du limbe foliaire directement exposée au rayonnement solaire : face inférieure ou supérieure des feuillages, selon le cas, tiges pour les Salicornes. Les caractéristiques colorimétriques, calculées à partir du spectre de réflexion (entre 360 et 850 nm), sont exprimées dans le système  $L^* a^* b^*$ , la teinte par l'angle de teinte, la pureté par le chroma et la clarté par les valeurs de  $L^*$  (fig. 16-5, voir cahier couleur). L'indice de verdeur a été calculé à partir des aires des courbes de réflexion dans les longueurs d'onde des canaux HRV S1 et S2.

### **3. Résultats**

#### **3.1. Résultats des mesures en laboratoire**

Le tableau I nous montre que l'angle de teinte est très peu variable; le coefficient de variation est en effet de 2,45%. Ce constat est logique du fait que les mesures, effectuées au maximum de l'activité photosynthétique, correspondent à un même état phénologique de ces végétaux. La réflexion est alors maximale dans le vert et minimale dans le rouge pour toutes les espèces. Le type même d'évaluation de l'angle de teinte ne justifie pas une mise en relation avec l'indice de verdeur.

Le chroma (ou saturation) évalue la pureté de la couleur. Le calcul de la régression linéaire fait apparaître une très forte corrélation de cette caractéristique avec l'indice de verdeur :

$$\text{Chroma} = f(\text{NDGI}) = 70,9 \text{ NDGI} - 8,07 \quad (r = 0,846).$$

Cette forte corrélation (fig. 6) (significative à 0,1%) s'explique par le fait que la saturation traduit la part d'énergie réfléchie dans la longueur d'onde dominante (le vert, canal S1 de HRV), par rapport à l'ensemble de l'énergie réfléchie.

Par contre, il n'y a pas lieu de rechercher une relation entre l'indice de verdeur et la clarté, laquelle traduit la quantité totale d'énergie du spectre. Une variation de la clarté entraîne une variation de l'ensemble du spectre, mais ne modifie pas obligatoirement l'indice de verdeur. En réalité, la clarté semble varier considérablement en fonction de la structure même du feuillage (observations non publiées).

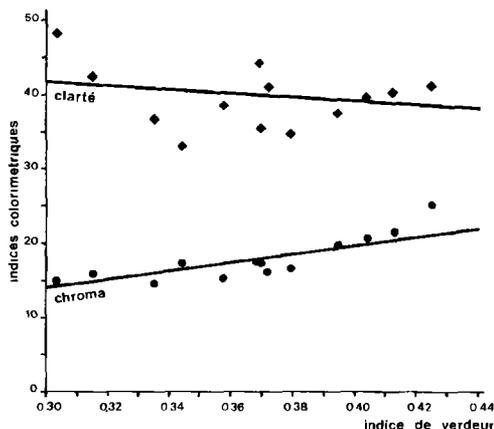
**Tableau I.** Indice de verdeur (NDGI) et données colorimétriques des espèces étudiées, à partir d'une analyse au spectrophotomètre muni d'une sphère d'intégration

	NDGI	Angle Teinte	Chroma	Clarté
<i>Elymus pycnanthus</i> Meld.	36,9	129	17,67	44,3
<i>Festuca rubra</i> ssp. <i>littoralis</i> Auq.	42,5	123	25,37	41,4
<i>Puccinellia maritima</i> Parl.	40,3	125	20,89	39,8
<i>Phalaris arundinacea</i> L.	41,3	127	21,40	40,5
<i>Typha latifolia</i> L.	37,2	132	16,36	41,1
<i>Populus nigra</i> ssp. <i>pyramidalis</i> C.	33,5	128	14,71	36,8
<i>Populus canescens</i> (Ait) Smith	37,0	126	17,36	35,4
<i>Viburnum lantana</i> L. (Viorne)	39,4	126	19,87	37,5
<i>Hedera helix</i> L. (Lierre)	37,9	131	16,66	35,0
<i>Salicornia dolichostachya</i> Moss	34,4	122	17,21	33,2
<i>Halimione portulacoides</i> Aell.	30,3	126	15,06	48,4
<i>Suaeda maritima</i> Dum. (Soude)	35,8	128	15,37	38,7
<i>Aster tripolium</i> L.	31,5	125	16,19	42,3
Coefficient de variation (en %)	10,16	2,45	18,19	10,0

On sait que la teinte varie avec l'état phénologique des végétaux (et donc avec leur teneur en chlorophylle), entraînant des variations de la réponse spectrale au cours du temps. Cependant, nous constatons ici que la teinte est très peu variable au maximum de l'activité photosynthétique, et de ce fait, ne modifie pas sensiblement la réponse spectrale d'une espèce à l'autre dans les conditions d'observation présentes. Par contre, les variations de la saturation (chroma) et de la clarté influencent nettement les courbes de réflectance. Ces variations intègrent non seulement la teneur en chlorophylle, mais aussi les éléments de la structure de surface des feuillages : poils et reliefs épicuticulaires, pruines (FELDHAKÉ, 1990), ainsi que les éléments de la structure anatomique : répartition des chloroplastes dans l'épaisseur du limbe, présence ou absence de tissu lacuneux, c'est-à-dire d'espaces intercellulaires, dont on sait déjà qu'ils interviennent fortement dans la transmission et la diffraction du rayonnement solaire (HOWARD, 1970).

### 3.2. Analyse des images

Sur les figures 16-3 et 16-4 (voir cahier couleur), les formations végétales sont distinguées en fonction de l'indice NDGI. Le rouge, indice le plus élevé en valeur, correspond aux formations très vertes et totalement couvrantes; seules les bourgoutières denses sont susceptibles de donner une telle réponse. Le vert, du plus foncé au plus clair en fonction de la valeur décroissante de l'indice, représente les oryzaies et les riz cultivés, les formations arbustives denses de levées ou les vétiveraies des secteurs exondés.



**Figure 6.** Corrélation entre indice de verdure et données colorimétriques (chroma et clarté)

L'orange et le jaune (indice faible) traduisent la présence d'une végétation graminéenne très discontinue au stade du jaunissement. Le blanc correspond aux sols nus, argileux et secs des levées anciennes ou des dunes insubmersibles. La comparaison des deux images (fig. 16-3 et 16-4, voir cahier couleur) révèle que l'état phénologique des formations en janvier est différent selon l'année considérée. En 1989, l'ensemble de la végétation était à un stade plus avancé qu'en 1990. Ceci apparaît très nettement dans les secteurs cultivés et les oryzaies; en 1990, ces formations sont encore très vertes.

La superposition des deux images (fig. 16-7 : 1989 en rouge, 1990 en vert, voir cahier couleur), montre que les surfaces végétalisées étaient plus étendues en 1989 qu'en 1990, comme l'attestent les plages rouges. De même, la prédominance du vert indique une activité chlorophyllienne plus intense en 1990 qu'en 1989.

Le fait que les unités végétales soient encore en pleine activité chlorophyllienne en janvier 1990 peut être mis en relation avec les modalités de l'inondation, donc avec les caractères de la crue : importance des débits, durée des hautes eaux, date de début et de fin de la crue. La moindre extension des formations végétales en janvier 1990 suggère une crue faible en 1989. Les relevés des stations hydrologiques de Kara sur le Diaka, principal défluent du Niger et de Mopti sur le Niger, confirment ces hypothèses et permettent de préciser que les modules et les débits mensuels ont été plus importants en 1988 qu'en 1989, que la durée des hautes eaux a été la même ces deux années là (93 et 94 jours) et que le début de l'inondation et de la décrue a été plus précoce en 1988 qu'en 1989 (25 juillet et 30 octobre en 1988; 11 août et 13 novembre en 1989).

#### 4. Discussion et conclusion

L'indice de verdure NDGI et l'indice de végétation NDVI extraits des images satellitaires sont sujets à des variations importantes liées aux conditions atmosphériques au moment de l'enregistrement (QI *et al.*, 1991).

On sait que dans le Sahel la poussière est une constante de l'atmosphère. Mais lors de concentration abondante par brume sèche, le trouble atmosphérique correspond à un fort accroissement des particules d'un rayon supérieur à 0,2  $\mu\text{m}$ . Ces particules jouent un rôle

prépondérant dans les longueurs d'onde de 0,443 et 1,58  $\mu\text{m}$  (COUREL, 1985; CERF *et al.*, 1982), leur albédo de diffusion est de l'ordre de 0,96 à 0,94.

Actuellement la correction des effets atmosphériques pose encore d'énormes problèmes en l'absence de secteurs de calibrage radiométriquement stables; c'est la raison pour laquelle nous nous sommes assurés des conditions atmosphériques optimales (épaisseur optique inférieure à 0,3) sur les régions qui ont donné lieu aux enregistrements satellitaires utilisés.

En ce qui concerne l'étalonnage des bandes HRV, les facteurs d'amplification utilisés dans les deux cas contribuent à uniformiser correctement les données. Les vérifications de cohérence de luminance ont été effectuées sur les sols nus et les zones en eaux libres. Il est bien évident qu'en cas de variations trop importantes il est nécessaire d'appliquer un facteur de pondération.

Il apparaît donc que l'indice de verdure NDGI permet de faire une cartographie fine et diachronique des formations végétales en pleine activité chlorophyllienne. La discrimination des différentes unités s'explique par la bonne corrélation entre l'indice de verdure et le chroma. Il reste à affiner ces recherches en effectuant des mesures colorimétriques sur le matériel végétal du delta dont la teneur en chlorophylle aura été calculée à partir du poids sec et des mesures radiométriques en liaison avec la composition et la structure architecturale de la végétation. Il s'agit en effet d'établir des relations entre les pigments, le chroma et l'indice, de préciser les causes des variations du chroma et de la clarté et de leurs effets sur le NDGI et le NDVI (indice de végétation).

Cette approche fine, qui pourrait améliorer très sensiblement la fiabilité des suivis des formations végétales, doit être poursuivie et validée. En effet, les relevés botaniques effectués par nos soins en 1988 et la comparaison des images 1989 et 1990 avec les cartes des pâturages réalisées mais non publiées par le Centre international pour l'élevage en Afrique (CIPEA, Bamako, Mali) mettent en évidence les remarquables changements phytogéographiques intervenus dans le delta au cours de la dernière décennie.

## 5. Références

- CERF, A., FOUQUART, Y., BONNEL, B., BROGNIEZ, G., CHAOUI ROQUAI, M. et SMITH, L. 1982. Propriétés radiatives des aérosols sahéliens. La Météorologie, 6<sup>e</sup> série, n<sup>os</sup> 29-30, Paris.
- COUREL, M. F., KANDEL, R. S. and RASOOL, S.I. 1984. Surface albedo and the Sahel drought. Nature, vol. 307, n<sup>o</sup> 5951, p. 528-531.
- COUREL, M. F. 1985. Étude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites. Thèse de doctorat d'état, publication IBM France, p. 288-300.
- FELDHAKÉ, C. M. 1990. Spectral characteristics of the light band on red clover (*Trifolium pratense* L.). Environmental and Experimental Botany, vol. 30, n<sup>o</sup> 1, p. 111-115.
- FRANÇOIS, J., RIVAS, A. et COMPERE, R. 1989. Le pâturage semi-aquatique à *Echinochloa stagnina* (Retz) P. Beauv. Étude approfondie de la plante «Bourgou» des bourgoutières situées en zone lacustre au Mali. Bulletin de recherche des Facultés agronomiques de Gembloux, vol. 24, n<sup>o</sup> 2, p. 145-189.
- FRANÇOIS, J., RIVAS, A., HELLEMANS, Ph. et COMPERE, R. 1991. Régénération des bourgoutières en zone lacustre du Mali par semis en décrue, technique basée sur des études agrométéorologiques et écophysiologicals. Bulletin de recherche des Facultés agronomiques de Gembloux, vol. 26, n<sup>o</sup> 1, p. 169-181.

*Utilisation des bandes spectrales du vert et du rouge pour l'évaluation des formations végétales*

- HIERNAUX, P. Y., DIARRA, L. et MAIGA, A. 1989. Dynamique de la végétation sahélienne après la sécheresse. Un bilan du suivi des sites pastoraux du Gourma en 1988. Document du programme AZ 192, CIPEA, Bamako, 50 p.
- HOWARD, J. A. 1970. Aerial Photo-Ecology. Faber and Faber, London, 325 p.
- QI, J., HUETE, A. R., JACKSON, R. D., MORAN, S. S. and CHEHBOUNI, A. 1991. View atmosphere soil effect on vegetation indices derived from SPOT images. Proceedings of the 5th International colloquium on physical measurements and signatures in remote sensing, Courchevel, France, ESP SP-319, p. 785-790.



# 17

## **Méthode de cartographie des systèmes de culture en région de petites exploitations du nord-est de l'Argentine**

ISABELLE DUVERNOY\*, CHRISTOPHE ALBALADEJO\*  
et CLORINDA PERUCCA\*\*

*\*Institut national de la recherche agronomique, Unité de recherche sur les systèmes agraires et le développement, Auzeville, B.P. 27, 31326 Castanet Tolosan cedex, France; téléphone : (33) 61-28-52-67; télécopieur : (33) 61-73-20-77; télex : 520009 INRATSE*

*\*\*Instituto nacional de tecnología agropecuaria, Centro regional de Misiones, Belgrano 540 3300 Posadas, Provincia de Misiones, Argentina; téléphone : (54) 752-35915*

### **Résumé**

Ce travail est une réflexion sur des méthodes de reconnaissance et de suivi cartographiques des systèmes de culture en zones de petits parcelles agricoles. La finalité pratique pour les organismes publics de développement et d'aménagement est de pouvoir caractériser l'évolution des systèmes d'exploitation, à travers la cartographie des systèmes de culture. Sur le front pionnier de la zone subtropicale humide de Misiones (province au nord-est de l'Argentine), cette caractérisation permettra de déterminer, dans des délais compatibles avec l'action, l'évolution des systèmes d'exploitation plus ou moins fortement en déséquilibre avec leurs ressources. Le travail repose sur l'hypothèse de RUTHEMBERG (1980) de correspondance entre la structure de l'assolement et la gestion de la fertilité des sols, en tant qu'indication de la durabilité des systèmes. La démarche de recherche est la suivante : 1) zonage régional et choix d'une localité (2700 ha, 100 exploitations agricoles) représentative de la dynamique agricole en cours sur le front pionnier; 2) en région où n'existe pas de cartographie de terrain, à l'exception de la topographie, utilisation de photographies aériennes pour obtenir la carte des zones essartées, chacune ayant fait l'objet d'une enquête auprès des familles agricoles pour

réaliser un inventaire exhaustif des parcelles agricoles en 1984, 1988 et 1990; 3) phase d'identification de l'occupation du sol sur des images HRV de SPOT panchromatiques et multibandes (résolution 10 m X 10 m) 1989, 1990 et 1991 par comparaison avec la cartographie de terrain; 4) phase d'analyse exploitation par exploitation (chacune est un lot de colonisation de 27 ha en moyenne). Numérisation du cadastre et superposition avec les images, en s'aidant d'une image HRV panchromatique au niveau de correction 2B. Mise en correspondance de l'occupation du sol avec une caractérisation typologique des exploitations agricoles. L'originalité de ce travail réside dans une utilisation de l'identification culture par culture, pour arriver à la reproduction d'un diagnostic au niveau des systèmes d'exploitation. L'analyse exploitation par exploitation présentée ici utilise des résultats provisoires; l'objectif étant plutôt d'exposer les aspects méthodologiques.

## 1. Introduction

De précédents travaux sur les systèmes de production agricole ont montré l'importance de la prise en compte, pour comprendre les dynamiques en cours et pour mettre en oeuvre tout projet de développement, de leurs diversités de mises en valeur de l'espace (JOLLIVET, 1978). Cela signifie disposer d'un moyen de discriminer des modes d'utilisation du sol différents, de les mettre en relation avec des modes de gestion différents et les représenter cartographiquement afin de comprendre leurs agencements spatiaux.

Nous utilisons l'agriculture de la province de Misiones en Argentine (fig. 1) comme modèle. Misiones est une province qui était couverte à la conquête sur 90% de son territoire par la forêt originelle. La colonisation agricole n'a vraiment commencé qu'au début du XX<sup>e</sup> siècle et même après 1950 pour toute la région nord-est de la province et centre-est (EIDT, 1971). Elle est encore en pleine phase de colonisation par de petits exploitants agricoles (fig. 1). Les évolutions sociales (démographie, mouvements migratoires, urgence sociale, etc.), techniques (transitions entre systèmes) et écologiques (disparition de la forêt primaire, évolution de la fertilité des sols, changement de structure du paysage) sont très rapides. Ces fortes dynamiques nous permettent d'observer des phénomènes dans des délais relativement brefs, et donc de tester nos hypothèses, modéliser et mesurer des paramètres d'évolution.

Des travaux récents de notre programme (ALBALADEJO, 1987; PERUCCA, 1991) ont mis au point des méthodes d'analyse et de discrimination des exploitations agricoles basées sur leurs tendances d'évolution et leurs capacités d'équilibration. Ces méthodes permettent de porter un diagnostic sur les capacités d'évolution ou de stabilité des exploitations en se basant sur le concept d'équilibration de la théorie des systèmes (PIAGET, 1967; LE MOIGNE, 1984). Ce diagnostic lui-même peut être élaboré de façon satisfaisante à partir des aspects paysagers des exploitations.

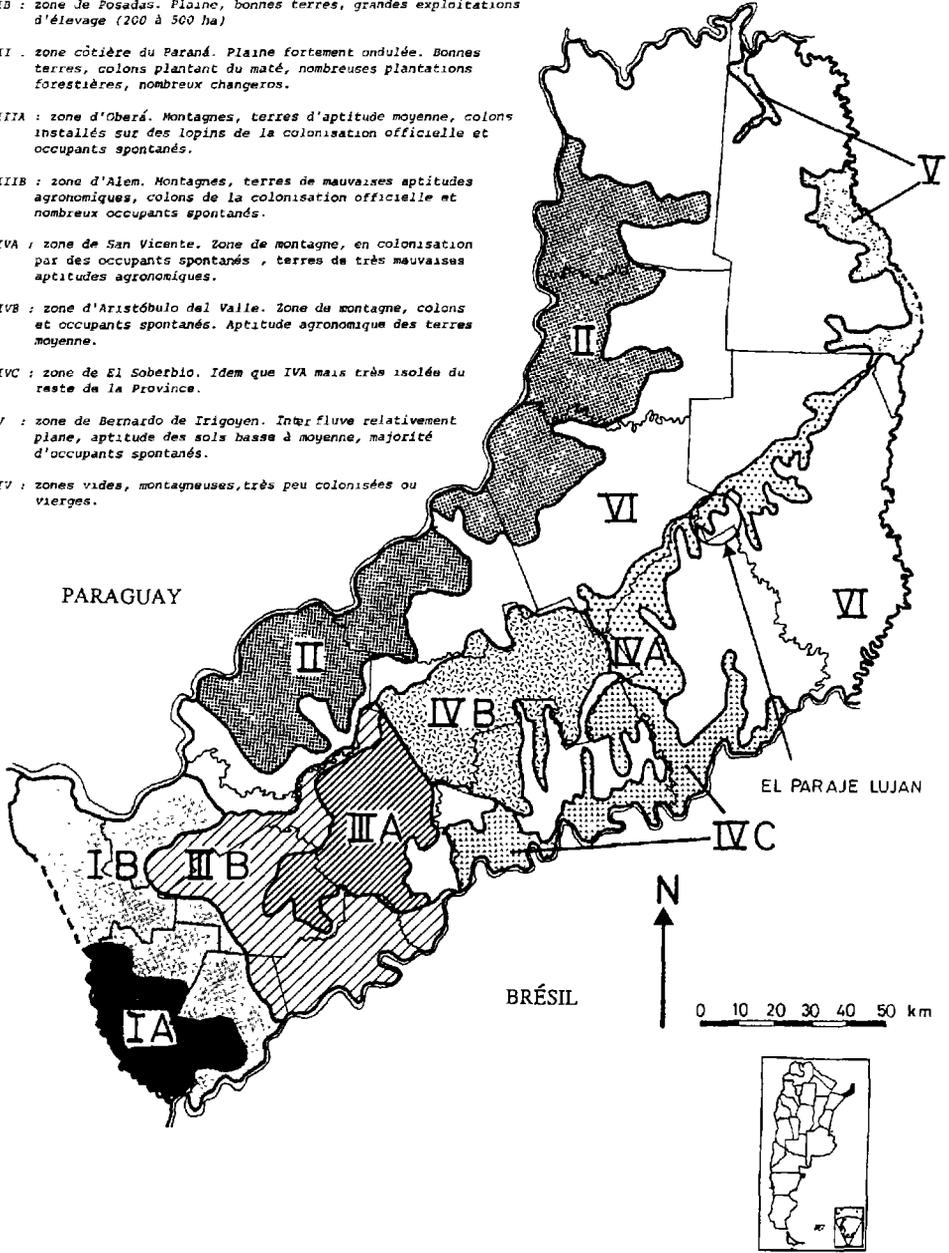
Notre objectif, dans cette communication, est d'évaluer en quoi ce diagnostic peut être porté à partir des aspects paysagers «zénithaux» [selon une expression de PINCHEMEL et PINCHEMEL (1988) qui désigne le paysage relevé par photographies aériennes ou images satellitaires] et plus précisément d'une série d'images HRV de SPOT panchromatiques (P) et multibandes (P+XS). La finalité pratique est une généralisation du diagnostic d'équilibration des systèmes d'exploitation à l'échelle de petites régions agricoles.

La question de recherche revient donc à se demander comment réaliser un diagnostic des tendances d'évolution d'un système agraire régional à partir de documents de télédétection.

Cette question générale de recherche présente un grand intérêt pratique dans des régions comme Misiones pour lesquelles les dynamiques d'évolution sont extrêmement rapides. Dans cette province, les recensements (agricoles ou de la population) et les relevés photo-aériens

*Cartographie des systèmes de culture en région de petites exploitations du nord-est de l'Argentine*

- IA : zone de Apóstoles. Plaine, bonnes terres, colons installés sur des surfaces de 25 à 100 ha (maté) et changeros.
- IB : zone de Posadas. Plaine, bonnes terres, grandes exploitations d'élevage (200 à 500 ha)
- II : zone côtière du Paraná. Plaine fortement ondulée. Bonnes terres, colons plantant du maté, nombreuses plantations forestières, nombreux changeros.
- IIIA : zone d'Oberá. Montagnes, terres d'aptitude moyenne, colons installés sur des lopins de la colonisation officielle et occupants spontanés.
- IIIB : zone d'Alem. Montagnes, terres de mauvaises aptitudes agronomiques, colons de la colonisation officielle et nombreux occupants spontanés.
- IVA : zone de San Vicente. Zone de montagne, en colonisation par des occupants spontanés, terres de très mauvaises aptitudes agronomiques.
- IVB : zone d'Aristóbulo del Valle. Zone de montagne, colons et occupants spontanés. Aptitude agronomique des terres moyenne.
- IVC : zone de El Soberbio. Idem que IVA mais très isolée du reste de la Province.
- V : zone de Bernardo de Irigoyen. Intérieur fluvial relativement plane, aptitude des sols basse à moyenne, majorité d'occupants spontanés.
- IV : zones vides, montagneuses, très peu colonisées ou vierges.



**Figure 1.** Les zones de développement à Misiones, Argentine

se succèdent avec une périodicité de 10 à 15 ans seulement et irrégulière car leur réalisation et leur traitement (très coûteux) dépendent de la situation économique des autorités publiques. De plus les traitements sont longs et coûteux. Pour donner un exemple, les résultats du recensement général de l'agriculture de 1988 commencent à peine, trois ans plus tard, à être publiés... Bien entendu, ces inventaires ne sont pas compatibles avec les délais de l'action, les organismes de développement doivent agir vite et doivent avoir une connaissance en temps réel de la situation d'action. Une autre difficulté de ces inventaires est leur manque d'interactivité avec les décideurs. Or nous savons que la décision n'est pas un processus linéaire et que le chercheur ne peut porter un diagnostic achevé, univoque, qui le met de fait dans une position de prise de décision à la place du décideur. Les paramètres permettant de porter un diagnostic et les seuils de classification doivent pouvoir être changés. Autrement dit les résultats de ce diagnostic régional ne doivent pas être considérés comme immuables par les décideurs, ces résultats ne sont qu'une aide à la réflexion et doivent stimuler les travaux sur le terrain. Cela implique la réalisation d'un grand nombre de diagnostics (démarche essai-erreur). Seules des images numérisées manipulées informatiquement permettent de reformuler un diagnostic porté sur l'agriculture de vastes territoires (de l'ordre de un million d'hectares). Cette rapidité de reformulation d'un diagnostic permet de tester sa solidité par rapport par exemple aux valeurs fixées aux paramètres du modèle, et donc d'évaluer sa fiabilité dans différentes situations.

Notre objet de recherche est donc un système agraire régional. Les principaux niveaux d'organisation que nous distinguons sont : la zone «agro-écologique» (dans le sens où l'entend la Farming Systems Research (COLLINSON, 1983) : zone pour laquelle les conditions agronomiques de production sont similaires) ; la localité (espace de sociabilité et d'action quotidiennes des petits agriculteurs (CITTADINI, 1989)) ; l'exploitation agricole (OSTY, 1978) ; la parcelle agronomique (MILLEVILLE *et al.*, 1982).

Notre hypothèse de base repose sur les travaux de RUTHEMBERG (1980), posant qu'une typologie de fonctionnement des systèmes d'exploitation (Farming Systems), en milieu tropical, peut être déduite des relations d'ordre entre éléments du système de culture, ce terme étant pris au sens des agronomes anglophones : cropping system (répartition physique dans l'espace des cultures d'une exploitation ou d'une collectivité (ZANDSTRA *et al.*, 1981) et des géographes et non au sens des agronomes français (SEBILLOTTE, 1982). RUTHEMBERG (1980) décrit notamment les fonctionnements des exploitations sous l'angle de la gestion de la fertilité des sols, ce qui est tout à fait cohérent avec notre souci de rendre compte des capacités d'équilibration et d'évolution des systèmes d'exploitation de Misiones.

## **2. Principes méthodologiques et choix d'une zone**

### **2.1. Méthodologie**

Notre analyse adoptera classiquement simultanément une démarche déductive, à partir des images numérisées, et inductive, à partir du terrain (GIRARD et GIRARD, 1989).

Sur le terrain, dans plusieurs localités d'occupation du sol contrastée, nous procéderons à des enquêtes aux chefs d'exploitation pour réaliser une typologie des systèmes de production. Simultanément sont cartographiées toutes les parcelles agronomiques des localités. Ce repérage systématique et l'analyse des aspects paysagers permettent de définir une procédure afin de reproduire la typologie (PERUCCA, 1991). Cette cartographie permet d'autre part de faire des comparaisons avec l'image.

Ce cheminement ne peut ni ne doit être suivi d'une façon linéaire. Il est un guide pour un travail en «va et vient» entre le terrain et l'image. L'analyse de celle-ci permet d'enrichir le questionnement sur les aspects paysagers, en particulier l'analyse de la structure de l'image, par analyse des éléments texturaux et structuraux (FLOUZAT, 1988), renseigne et questionne sur la signification de la structure du paysage, du système de culture.

Une phase ultérieure concernera un diagnostic global de l'agriculture non d'exploitations isolées mais de petites localités agricoles.

Cette communication rend compte d'une première phase de ce type.

## **2.2. Choix d'une zone**

### **2.2.1. Choix de l'emplacement de la fenêtre HRV (60 par 60 km)**

Une analyse régionale des dynamiques de l'espace de Misiones a été faite préalablement aux travaux d'analyse des localités et exploitations (ALBALADEJO, 1987). La figure 1 en donne une vision synthétique des résultats. Les zones sud et ouest de la province (I A, II) représentent les zones de colonisation publiques ou privées ayant installé des exploitations familiales de taille moyenne (50 ha), ayant des cultures pérennes (maté, reforestations en pins, etc.) et disposant d'un moyen à faible capital. La zone I B est celle des anciennes estancias d'élevage bovin-viande extensif. Les zones centre-sud (III A et III B) sont celles de la colonisation publique en damiers de 25 ha organisée pour les familles ayant moins de capacités financières. Les zones IV et surtout IV A sont actuellement en pleine phase de colonisation. Cette colonisation, qui se fait sans aucun plan privé ou de l'État (colonisation dite «spontanée»), est le fait des fils des premiers colons installés plus au sud et de paysans brésiliens mis en faillite par l'évolution de l'agriculture dans les États voisins de Rio Grande, Santa Catarina et Paraná.

Nous avons choisi cette zone IV pour la rapidité des évolutions agronomiques et sociales d'une part (colonisation en cours et très intense) et pour l'analyse d'une organisation agricole spontanée (quels systèmes de production les agriculteurs sont capables d'installer et quelles sont leurs chances de pérennité ?). Cette zone est d'autre part cruciale pour les organismes de développement de la province car s'y trouvent les réservoirs «tampons» de terres encore colonisables accueillant une population importante sans ressources. Combien de temps encore va durer ce réservoir couvrant d'importants problèmes sociaux ?

### **2.2.2. Choix d'une localité**

ALBALADEJO (1987) a distingué différents niveaux locaux d'organisation : la picada (ensemble des essarts cultivés reliés par le même chemin de colonisation initial); le site d'aménagement (niveau potentiel d'organisation au cours d'une action reliant les familles rurales à des organismes extérieurs).

Nous avons choisi la localité du Paraje Luján (2300 ha et une centaine de familles agricoles) qui a, au cours de la recherche, réussi à constituer spontanément une association de paysans sans-terre, à faire mesurer les lots occupés par un géomètre privé et à faire légaliser les occupations du sol. Par conséquent cette localité est passée, au cours de la recherche, d'un statut d'occupation précaire (pratique d'une agriculture itinérante) à un statut plus stable faisant supposer l'émergence de nouvelles (et plus stables) formes d'exploitation. Ce site s'est donc révélé être un modèle d'analyse des tendances et possibilités d'évolution des formes d'utilisation du sol.

### **3. Les données de terrain et leur traitement**

#### **3.1. Cartographie de terrain**

##### **3.1.1. Documents de base**

Notre question de base est la suivante : «Comment réaliser un inventaire et une localisation des ressources et contraintes de l'espace avec des documents aériens peu récents au regard de la vitesse d'évolution du milieu géographique?»

Nous avons décidé d'utiliser au mieux les quatre sources d'information suivantes (ALBALADEJO, 1987) :

1) des cartes topographiques au 1:10 000 ou au 1:20 000 qui couvrent toute la province et qui ont été établies en 1963 à partir de photographies aériennes de 1962;

2) les photographies aériennes d'une mission privée de l'entreprise CELULOSA S.A. en 1980. Nous avons préféré utiliser ces documents plutôt que les documents officiels de 1981 qui présentent deux défauts : l'échelle des clichés est d'environ 1:50 000 alors qu'elle est de 1:20 000 environ pour les photos de CELULOSA, une série de clichés a été mal effectuée en cours de vol et une partie de notre territoire de recherche n'a pas été couverte;

3) la carte cadastrale établie directement sur le terrain par le géomètre, après ententes préalables entre les agriculteurs occupant les terres de l'État;

4) les enquêtes que nous avons effectuées auprès des agriculteurs par lesquelles nous avons dressé notamment deux types de cartes pour chaque exploitation : la carte de l'assolement actuel et des contraintes agronomiques et la carte de l'assolement projeté.

##### **3.1.2. Création de la carte**

Le graphique en figure 2 montre l'enchaînement des opérations et la hiérarchie dans l'utilisation des sources d'information. La carte des assolements a été obtenue en effet par l'emboîtement de plusieurs niveaux de renseignements, emboîtement effectué grâce à la vérification entre chaque niveau de la concordance d'un certain nombre d'informations.

La carte topographique à l'échelle 1:10 000 a été établie par assemblage et agrandissement des plans dont dispose la province. Cette matrice nous a permis de superposer la carte dessinée par le géomètre et d'en vérifier la concordance (en effet les modes d'obtention de ces deux cartes ont été différents : cheminement goniométrique pour les limites cadastrales et restitution planimétrique pour la topographie). Parallèlement nous avons utilisé les clichés panchromatiques noir et blanc de l'entreprise CELULOSA S.A. pour effectuer le tracé des limites des principales formations végétales et principalement la limite forêt / friches et cultures.

Bien que représentant une situation plus ancienne, cette carte a servi de base pour l'obtention de la carte des assolements de 1985. En effet, il a apparu au cours des enquêtes que deux générations d'occupants sans titre se succèdent dans le temps. Les premiers sont de grands défricheurs et tirent un revenu de la vente des essences forestières commercialement intéressantes. Celles-ci vendues, ces premiers intrus cherchent de nouveaux espaces et cèdent la place à une deuxième génération d'occupants. Ceux-ci tirent leurs ressources principalement de l'agriculture et cultivent la partie défrichée de préférence. Les déboisements sont limités à l'obtention de terres plus fertiles pour le tabac, ce qui n'est une nécessité que plusieurs années après l'installation. Les agriculteurs de Luján font déjà partie de la deuxième génération car la forêt n'est plus attractive pour des gens cherchant à gagner de l'argent grâce à la vente du bois. Ils ont succédé à la première génération quatre ans en moyenne avant notre passage,

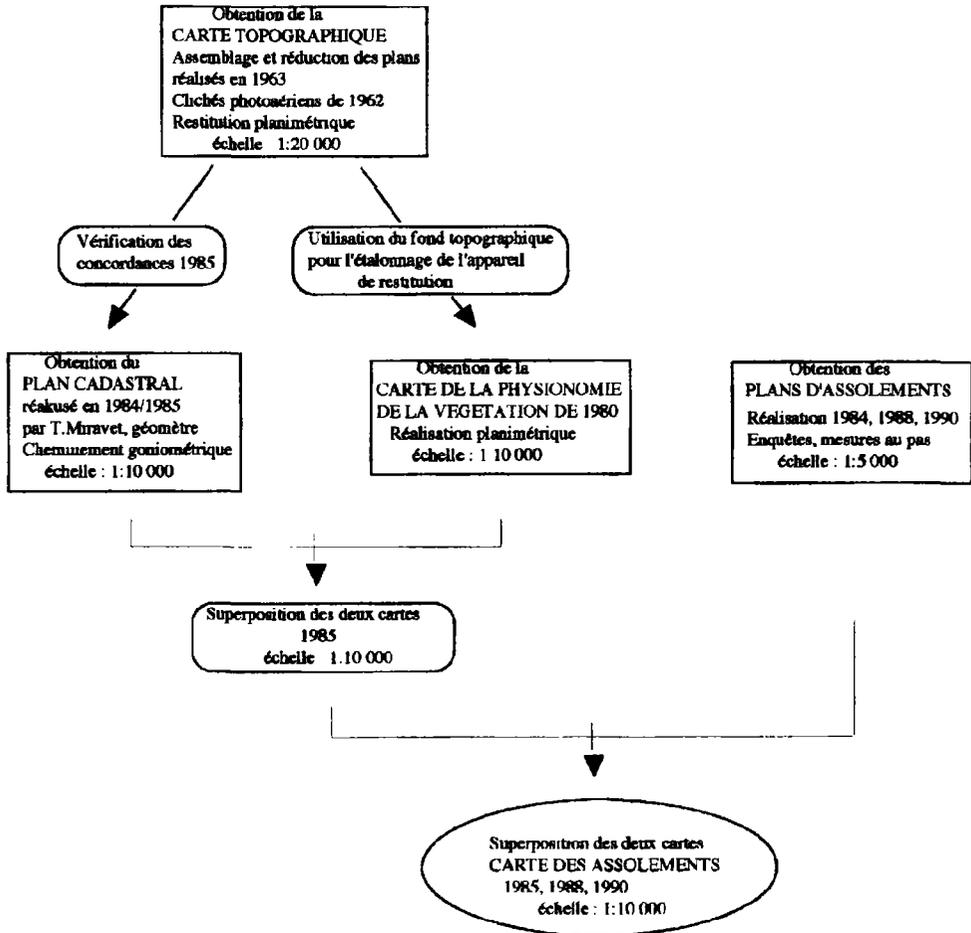


Figure 2. Enchaînement des principales étapes de la réalisation de la carte du Paraje Luján

autrement dit à peu près au même moment où CELULOSA effectuait sa mission photo-aérienne.

Par conséquent nous avons supposé que la partie déboisée depuis 1980 était relativement faible et pouvait être connue par enquête ou par déduction. Cette hypothèse nous a permis de supposer que les assolements observables en 1985 (et mesurés et dessinés sur le terrain avec chaque agriculteur) s'inscrivent géographiquement dans les zones déjà défrichées en 1980. Ce raisonnement nous a permis de dresser une carte actualisée de Luján, grâce aux enquêtes sur le terrain et ceci alors qu'il n'existait aucun document cartographique sur la zone au début de notre travail, à l'exception des cartes topographiques. Dans certains cas, les surfaces défrichées depuis 1980 nous ont été signalées par l'agriculteur, dans d'autres cas il a pu facilement se déduire quelles parties ont été défrichées mais il est indéniable que la carte que nous avons dressée n'est qu'approximative et ne répond pas aux critères habituels de précision cartographique. Ceci est d'autant plus vrai pour la carte des assolements de 1990 pour laquelle il n'a plus été réellement possible de s'appuyer sur les relevés photo-aériens de 1980.

### 3.1.3. *Recueil des données de terrain*

Notre objet n'était pas un recensement précis (au sens du géomètre) de l'ensemble des parcelles. Notre objet était de rendre compte d'une organisation de l'espace au sein de chaque exploitation : types de localisation de parcelles, de proximités, de formes en fonction des cultures pratiquées.

Sur le fond de carte ainsi créé ont été représentés les bâtiments (maisons, hangars), le dessin des cours d'eau et des chemins, les contours des lots (limites cadastrales) avec le numéro identifiant, les contours de parcelles de culture. Certains chemins ont un «statut» particulier : les «picadas». La picada est le chemin primitif de défrichement de la forêt, ce chemin est la voie de communication principale reliant les exploitations entre elles et il est entretenu par des travaux collectifs des riverains. Ces chemins servent de critère de zonage de l'espace. En effet par extension la picada désigne également la zone desservie par chaque chemin.

Pour chaque lot, la couverture végétale des parcelles est identifiée. Les couverts végétaux sont les suivants : forêt, friche, prairie, plantations d'arbres (pins, fruitiers), cultures pérennes (maté, thé, toung, citronnelle), et annuelles (tabac et cultures vivrières).

Les cultures pérennes et cultures annuelles sont souvent associées et il peut y avoir jusqu'à quatre cultures sur une même parcelle.

## 3.2. **Traitement, utilisation des données de terrain**

Les données obtenues par enquêtes auprès des agriculteurs ont servi à discriminer les exploitations entre elles selon leurs capacités d'équilibration (PERUCCA, 1991). Les exploitations agricoles sont donc considérées comme des systèmes (OSTY, 1978). Le concept d'équilibration a été introduit dans la théorie des systèmes par PIAGET (1967), puis développé par LE MOIGNE (1984). L'équilibration sert à décrire les capacités d'un système à se maintenir et à se produire, en insistant particulièrement sur les relations du système avec son environnement. Suite aux travaux de LE MOIGNE (1984), nous avons distingué quatre dimensions de l'équilibration, les capacités de stabilité, d'adaptation, de transformation et d'évolution. Nous avons hiérarchisé ces propriétés : pour être capable d'adaptation, un système doit être capable de stabilité, pour être capable de transformation, un système doit être capable d'adaptation, etc. Le concept d'équilibration est particulièrement utile dans le cas de Misiones où se pose la question de la durabilité des systèmes de production qui s'installent :

Leur apparente fragilité est-elle une étape obligatoire dans une trajectoire d'évolution ?  
Comment juger de la fragilité de ces systèmes ?

### 3.2.1. *Méthode pour produire la typologie*

Plus de 30 variables ont été utilisées pour décrire les quatre grandes dimensions de l'équilibration, par exemple le nombre de bovins présents est une réserve financière contribuant à une plus grande capacité de stabilité. Le degré d'instruction du producteur et son ancienneté sur l'exploitation rendent compte de ses capacités d'apprentissage, donc d'adaptation. Certaines variables sont plus complexes, par exemple l'indice de gestion de fertilité des sols ; cet indice, calculé à partir de la somme des surfaces cultivées ou en jachère, chacune pondérée par un coefficient d'érosion des sols, rend compte des capacités d'évolution de l'exploitation (ALBALADEJO, 1987). Plusieurs méthodes ont été testées, les plus efficaces sont celles qui permettent de hiérarchiser les variables entre elles : méthode de traitement graphique de l'information (BERTIN, 1977). Les méthodes non hiérarchiques, comme l'analyse factorielle des correspondances (BENZECRI *et al.*, 1973), donnent de moins bons résultats.

La typologie des systèmes d'exploitation obtenue comprend cinq types :

Type I : les exploitations ne sont pas capables de stabilité, ce sont généralement des jeunes en tout début d'installation, très faiblement capitalisés. Leur gestion est essentiellement minière;

Type II : ces exploitations disposent de réserve mais ne sont pas capables de mobiliser de la main d'oeuvre ou de réarranger leur assolement en cas de perturbations extérieures;

Type III : ces exploitations sont capables de stabilité, mais pas d'adaptation;

Type IV : ces exploitations sont capables d'adaptation mais pas de transformation, elles ont déjà réalisé une forte transformation et disposent de très peu de terres disponibles;

Type V : elles ont une bonne capacité de transformation.

Les critères d'évolution ont été traités après la constitution des types, comme variables supplémentaires. Les dimensions précédentes ont permis de mettre en évidence des trajectoires d'évolution des exploitations agricoles.

### **3.2.2. Reconnaissance des types par indicateurs paysagers, relevés sur le terrain et susceptibles d'être extraits par HRV**

Une première analyse des images HRV a permis le choix des variables paysagères susceptibles d'être extraites des images. Leur pouvoir de discrimination des cinq types a été testé pour chacune d'entre elles; les dix plus discriminantes ont été retenues pour analyse des propriétés de leur recombinaison. Une reconstitution des types par analyse factorielle des correspondances, à partir de dix variables aboutit à une mise en classe fortement liée à celle des systèmes de production (hypothèse d'indépendance des deux classifications rejetée avec un intervalle de confiance de 99,7%). Malheureusement la correspondance entre les deux typologies n'a pas été suffisamment claire pour faire de l'analyse factorielle des correspondances un outil opérationnel. La méthode des têtes de CHERNOFF, permettant de hiérarchiser les variables entre elles, aboutit à une meilleure correspondance entre les aspects paysagers et les types de systèmes de production. Pour chaque type de systèmes d'exploitation, l'aspect paysager a été représenté sous forme de tête de CHERNOFF (fig. 3). Chaque variable paysagère a été discrétisée en cinq classes d'effectifs égaux, afin d'éviter que les valeurs extrêmes de quelques individus n'utilisent tout le pouvoir discriminant des têtes de CHERNOFF. De cette façon, les aspects des têtes furent suffisamment semblables à l'intérieur de chaque type, et suffisamment différents entre types, pour en faire une clé de détermination basée sur une physionomie moyenne (fig. 4).

## **4. Reproduction du diagnostic à partir des images HRV**

Les images sur lesquelles nous nous appuyons pour déterminer l'occupation du sol et extraire les indicateurs paysagers «zénithaux» sont les suivantes : 16-08-1989 image HRV P corrigée au niveau 2B, 16-08-1989 imagerie HRV XS au niveau 1B, 28-07-1990 image HRV P+XS au niveau 1B, 31-12-1990 imagerie HRV XS au niveau 1B. La résolution des images XS est de 20 m et celle des images P+XS est de 10 m. D'autre part, nous disposons du tracé des lots d'occupation (limite des exploitations agricoles) numérisé.

Toutes les images HRV ont été superposées, après traitement, à l'image panchromatique corrigée au niveau 2B. Le tracé des lots d'occupation numérisé a été transformé géométriquement de manière à être superposable à cette même image. La correspondance des surfaces entre ce tracé numérisé et les mesures du cadastre s'est avérée excellente (coefficient R carré de 0,98 pour 50 observations).

ÉPANOUISSEMENT DU VISAGE :  
INSTALLATION DE CULTURES PÉRENNES

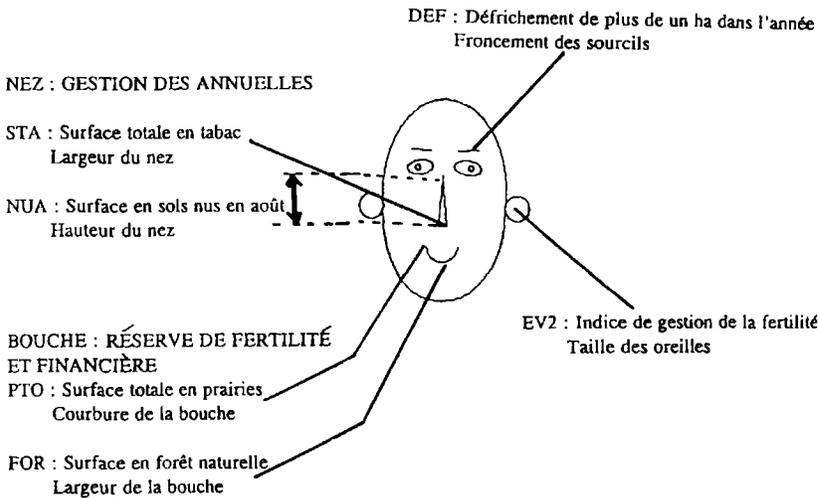
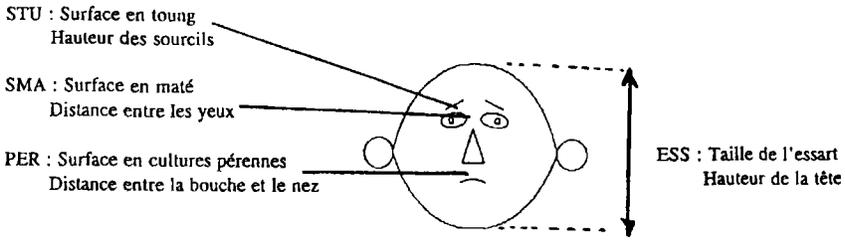
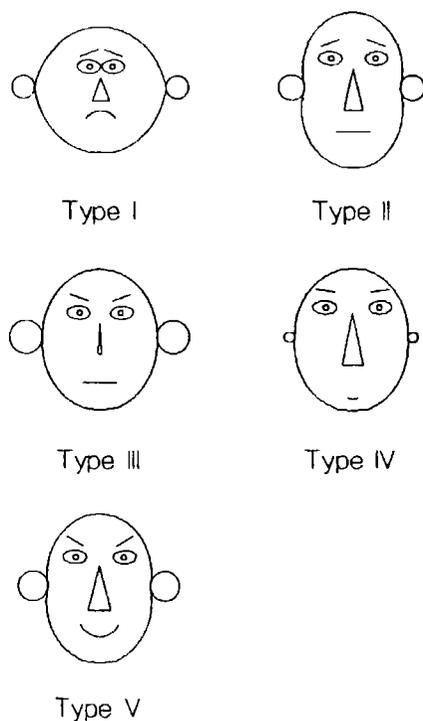


Figure 3. Légende des têtes de Chernoff pour les variables paysagères zénithales de Luján en 1990

#### 4.1. Identification des éléments

##### 4.1.1. Objectif

Les indicateurs paysagers recherchés sur les images sont ceux qui ont eu le meilleur pouvoir de discrimination des cinq types de systèmes d'exploitation. Il s'agit de la surface essartée (surface cultivée plus surface en friches), la surface en forêt, la surface en prairie, la surface déboisée dans l'année, la surface en sols nus en août (hiver), la surface cultivée en tabac, la surface en maté et la surface en toung. Nous avons également utilisé l'indice de gestion de la fertilité des sols calculé à partir des précédentes surfaces en leur attribuant des coefficients sur la base des déclarations des agriculteurs sur l'impact de chaque occupation du sol sur la fertilité des sols (ALBALADEJO, 1987).



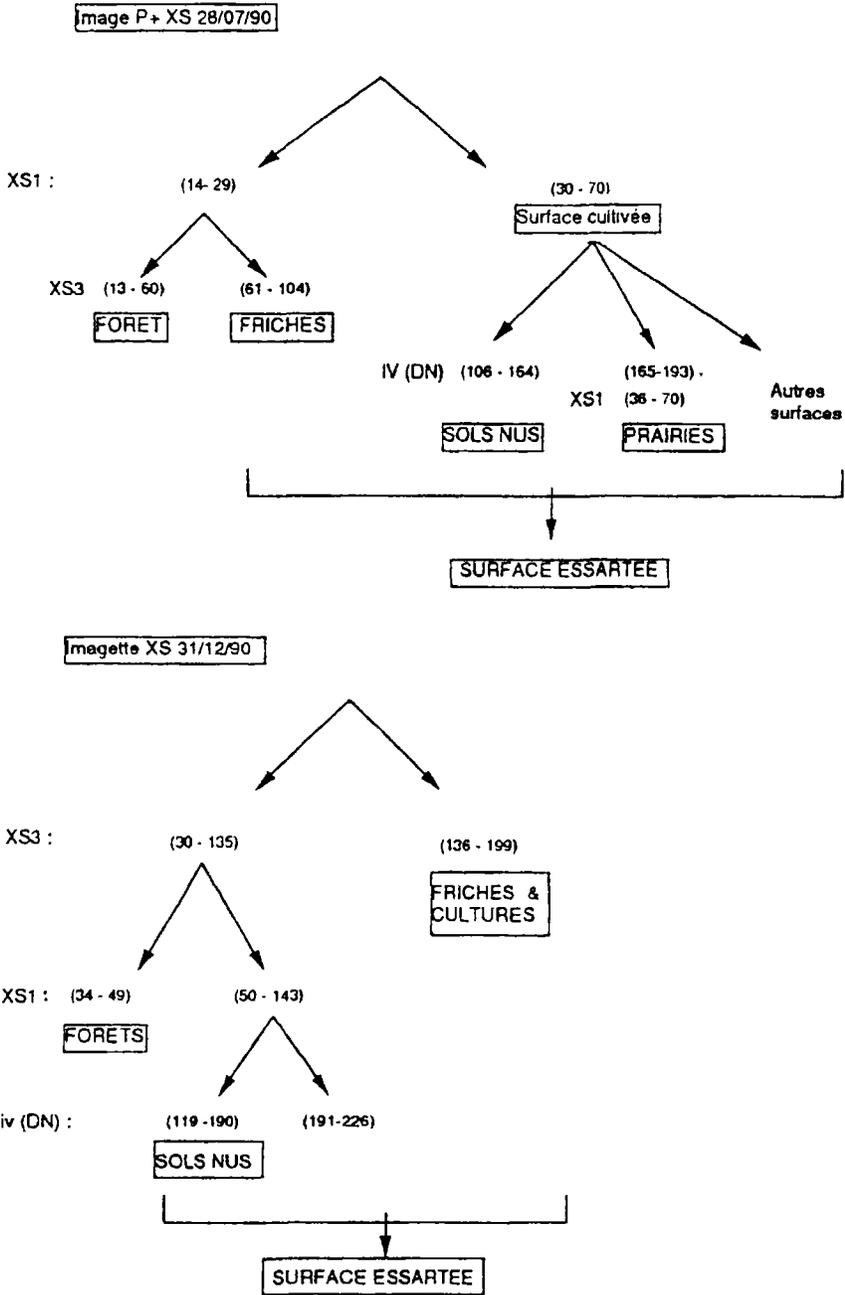
**Figure 4.** Aspects paysagers zénithaux moyens de chaque type de systèmes de production de Luján en 1990 (typologie manuelle)

#### 4.1.2. Méthode

La première méthode testée pour identifier ces classes d'occupation du sol sur les images a été un simple seuillage sur les canaux bruts et sur l'indice de végétation (différence normalisée) (fig. 5). Les seuils ont été choisis en fonction de trois critères, la conformité avec le comportement spectral des surfaces enregistré lors de relevés radiométriques de terrain effectués en août 1990, la correspondance avec la cartographie du parcellaire agricole de 1990 et la délimitation d'éléments connexes. Ceci a permis d'obtenir la carte d'occupation du sol de Luján en juillet 1990 (fig. 17-6, voir cahier couleur). De l'image P+XS de juillet 1990 ont été extraites les surfaces en prairies, sols nus, forêt et surface essartée. Pour obtenir ces deux dernières, il a été nécessaire d'identifier la classe des friches, qui fait partie de la surface essartée.

L'analyse de l'imagette XS de décembre 1990 a permis d'identifier les surfaces en forêt, sols nus et la surface essartée, pour chaque lot d'exploitation. Une classe a été définie rassemblant les surfaces en friches et les cultures. En effet, il n'a pas été possible de discriminer mieux, par cette méthode, les cultures en raison de leur comportement spectral similaire aux friches sur cette image.

L'analyse de la superposition des images d'août et de décembre 1990 a complété ces traitements pour l'estimation de la surface déboisée dans l'année, de la surface cultivée en tabac, et des surfaces en cultures pérennes [maté (*Ilex paraguensis*)]. Du fait des exigences des compagnies de tabac sur la préparation des sols et la lutte contre les adventices, nous avons considéré que les surfaces en sols nus en août et décembre (durée du cycle cultural) étaient un



**Figure 5.** Représentation schématique de l'extraction des indicateurs paysagers des images par seuillage

estimateur des surfaces en tabac. Le toung étant conduit en verger et étant caducifolié, nous avons choisi les surfaces classées en sols nus en août et en cultures et friches en décembre comme estimateur de surfaces en toung. Les surfaces en maté, arbuste à feuilles persistantes, ont été estimées par les surfaces cultivées n'étant classées ni en sols nus ni en prairies en août et étant classées en friches et cultures en décembre.

La validation de cette identification a été effectuée suivant les critères suivants : concordance de forme, d'emplacement et de surface de chaque indicateur avec ceux estimés lors des relevés de terrain effectués la même année. La forme et l'emplacement de chaque surface ont été contrôlés par analyse visuelle. Cependant, deux contraintes ont été rencontrées. La première provient du fait que la taille des parcelles dans le front pionnier peut être extrêmement petite (inférieure à 0,2 ha), et on observe donc généralement des regroupements de parcelles sur les images. La seconde procède du fait que la cartographie de terrain employée pour la validation du traitement des images n'avait pas été faite expressément dans ce but et était trop schématique pour permettre réellement d'estimer la conservation de la forme des parcelles sur les images traitées. En effet, pour l'élaboration de cette carte de terrain il n'a plus été possible de s'appuyer en 1990 sur les relevés photo-aériens de 1980 pour obtenir le tracé des limites des principales formations végétales.

Les surfaces ont été comparées à celles estimées sur le terrain.

#### **4.1.3. Résultats**

Les surfaces des occupations du sol recherchées n'ont été estimées correctement que dans le cas de la forêt et des zones essartées en juillet 1990 (coefficient de régression  $R^2$  de 0,93 pour 50 observations).

Dans le cas de la surface en forêt essartée en décembre 1990, la présence de brume et de nuages sur l'image n'a pas permis, par cette méthode, de retrouver les surfaces estimées lors de relevés de terrain. Cependant, par analyse visuelle des lots ne semblant pas avoir été affectés par ce phénomène, il a été constaté une concordance des formes des essarts entre la carte de terrain et l'image traitée.

Les surfaces en prairies n'ont pas été correctement estimées. Cependant, par vérification de la reconnaissance de la forme et de la position par analyse visuelle, pour les 20 prairies de taille au moins égale à deux hectares, 4 n'ont pas été reconnues de façon satisfaisante, 3 avaient été notées comme très enfrichées lors des relevés de terrain, et 16 ont été reconnues correctement en ce qui concerne leur forme et leur position.

Dans le cas des parcelles de tabac, en maté et en toung, les surfaces n'ont pas été estimées correctement.

#### **4.1.4. Conclusion**

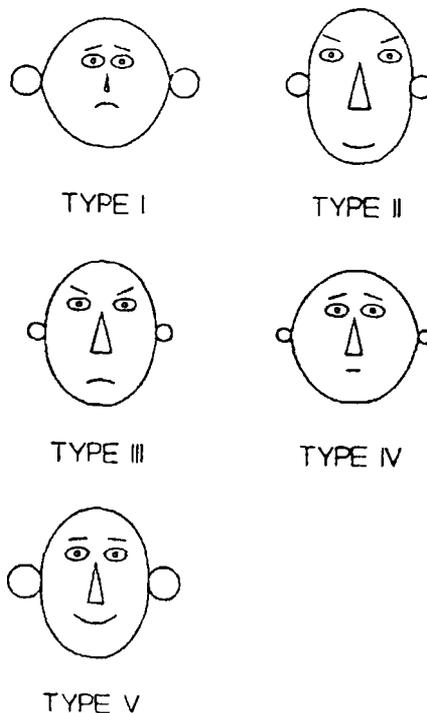
Les résultats en ce qui concerne l'extraction des indicateurs paysagers des images sont globalement mauvais. Ceux-ci devraient pouvoir être améliorés par l'emploi d'autres méthodes de traitement d'images, telles que les classifications supervisées ou l'emploi d'indices de texture. D'autre part, cette analyse a été faite avec des images de résolutions différentes, l'image de plus basse résolution étant celle d'été, période où l'occupation du sol par des cultures est plus importante qu'en hiver.

De plus, il apparaît important de caractériser plus finement les classes d'occupation du sol, en différenciant éventuellement les parcelles d'une même culture en fonction de leur enfrichement et de la présence d'adventices qui peuvent avoir un impact important sur le comportement spectral de la parcelle.

#### 4.2. Utilisation des indicateurs extraits de l'image

La finalité est de retrouver à partir des images HRV le diagnostic sur les systèmes d'exploitation. Neuf variables sur les dix ayant été testées en recombinaison pour retrouver les types de systèmes d'exploitation ont été cette fois-ci extraites des images HRV. À partir de celles-ci, une recombinaison à partir des têtes de CHERNOFF a été testée. Le codage des têtes est rigoureusement identique à celui précédemment utilisé (fig. 3), à l'exception de la variable surface en pérennes qui est absente. Chaque exploitation a été représentée sous forme de têtes de CHERNOFF après transformation des variables en classes d'effectifs égaux. Ceci a eu pour conséquence de limiter l'incidence de la mauvaise détermination des surfaces. Les moyennes de toutes les variables exprimées en hectares pour chaque type d'équilibration ont été également représentées sous forme de têtes de CHERNOFF.

Globalement la correspondance entre la physionomie des types de systèmes d'exploitation obtenue par des variables de terrain et des variables extraites des images est relativement satisfaisante, compte tenu des difficultés de détermination vues précédemment. En effet, même s'il n'y a pas eu concordance exacte entre les indicateurs trouvés sur l'image et ceux utilisés à partir des données de terrain, une physionomie générale de chaque type d'exploitation a été retrouvée (fig. 4 et 7). Les caractères distinctifs de chaque groupe ont été en général conservés. Cependant, n'a pas été retrouvée la discrimination du type III qui est caractérisé par une très faible surface en tabac et par un fort indice de gestion de fertilité des sols. Pour le type I, également, n'a pas été retrouvée la surface en tabac attendue.



**Figure 7.** Aspects paysagers vus par HRV des exploitations de Luján selon chaque type d'équilibration

L'hypothèse d'indépendance entre la variable «types d'équilibration des exploitations» et la variable «aspects paysagers satellitaires», peut être rejetée avec un intervalle de confiance de 99,9% (nombre de degrés de liberté = 16). Nous n'obtenons, cependant, pas un nombre suffisant de reconnaissances correctes des types d'équilibration par les aspects paysagers satellitaires (faible corrélation) pour disposer d'un outil permettant de retrouver, à partir de l'imagerie HRV, le diagnostic sur les systèmes d'exploitation.

## **5. Conclusion**

Les résultats à ce stade de la recherche sont encore insatisfaisants, principalement en ce qui concerne la détermination des surfaces des indicateurs paysagers sur les images. La combinaison de ces indicateurs, en vue de la reproduction d'un diagnostic, est néanmoins encourageante. C'est sur cette étape de détermination que portent les efforts actuels. Parallèlement vont être travaillées les méthodes de combinaisons d'indicateurs en vue d'améliorer la reproduction du diagnostic. Simultanément à l'interprétation des images satellitaires, les méthodes de diagnostic peuvent être affinées; nous nous sommes rendus compte, en effet, que la méthode de recherche d'indicateurs paysagers renvoyait à une analyse critique du diagnostic. Ce type d'approche ne peut pas être envisagé comme une succession linéaire entre le diagnostic et son extrapolation à des superficies étendues grâce aux images.

Par ailleurs, les méthodes de combinaison d'indicateurs extraits des images doivent le plus possible coller au modèle d'analyse, et par conséquent regrouper et hiérarchiser les variables (cluster analysis, arbres d'Hartigan).

## **6. Références**

- ALBALADEJO, C. 1987. Aménagement de l'espace rural et activités d'élevage dans des régions de petites exploitations agricoles, l'exemple des Cévennes, sud en France et de la province de Misiones en Argentine. Thèse de doctorat. Université de Grenoble I, INRA/SAD Toulouse, 538 p.
- BENZECRI J. P. *et al.* 1973. L'analyse des données. Tome II : L'Analyse des Correspondances. Dunod, Paris, 619 p.
- BERTIN, J. 1977. La graphique et le traitement graphique de l'information. Flammarion, Paris, 277 p.
- CITTADINI, R. 1989. Le facteur local dans l'innovation technique en milieu rural. Mémoire de DEA, Université de Toulouse II, 156 p.
- COLLINSON, M. 1983. Research methodology notes. Farming Systems Newsletter, tome 12, p. 6-20.
- EIDT, C. R. 1971. Pioneer settlement in Nort-East Argentina. University of Winconsin Press, Madison, USA, 248 p.
- FLOUZAT, G. 1988. Morphologie mathématique et analyse des images de télédétection. Photo-interprétation, n° 1988-5, fasc. 1, p. 1-16.
- GIRARD, M. C. et GIRARD, C. M. 1989. Télédétection appliquée, zones tempérées et intertropicales. Masson, collection Sciences agronomiques, Paris, 260 p.
- JOLLIVET, J. (éd.) 1978. Pour une agriculture diversifiée. L'Harmattan, collection Alternatives paysannes, Paris, 421 p.

- LEMOIGNE, J.-L. 1984. La théorie du système général, théorie de la modélisation. Presses Universitaires de France, Paris, 330 p.
- MILLEVILLE, P., COMBES, J. et MARCHAL, J. 1982. Systèmes d'élevage sahéliens de l'Oudalan, étude de cas. Document ORSTOM, Paris, 127 p.
- OSTY, P.-L. 1978. L'exploitation agricole vue comme un système. Bulletin technique d'information, n° 326, p. 43-49.
- PERUCCA, C. 1991. Diagnostic paysager des systèmes de production paysans de la province de Misiones, Argentine. Mémoire de DEA, Université de Toulouse II, 158 p.
- PIAGET, J. (éd.) 1967. Logique et connaissance scientifique. Gallimard, Paris, 1345 p.
- PINCHEMEL, P. et PINCHEMEL, G. 1988. La face de la terre. Armand Colin, collection U., Paris, 518 p.
- RUTHEMBERG, H. 1980. Farming systems in the tropics. Oxford University Press, Oxford, 3rd edition, 366 p.
- SEBILLOTTE, M. 1982. Les systèmes de culture. Séminaire du Département d'agronomie de l'Institut national de recherches agronomiques, Vichy, 56 p.
- ZANDSTRA, H. G., PRICE, E. C., LITSINGER, J. A. and MORRIS, R.A. 1981. A methodology for on farm cropping systems research. International Rice Research Institute, Los Baños, Philipinas, 147 p.

# 18

## **Inventaire cartographique des ressources renouvelables du Burkina Faso par téledétection**

JACQUES FONTÈS\* et SITA GUINKO\*\*

*\*Institut de la carte internationale de la végétation (ICIV), Université Paul-Sabatier et Centre national de la recherche scientifique, 39, allées Jules-Guesde, 31062 Toulouse cedex, France; téléphone : (33) 61 53 02 35; télécopie : (33) 61 25 90 33*

*\*\*Institut du développement rural et Faculté des sciences et techniques, Université de Ouagadougou, Burkina Faso; téléphone : (226) 30 71 59; télécopie : (226) 30 72 42*

### **Résumé**

La présente note développe les méthodes mises en oeuvre pour dresser la cartographie des ressources végétales du Burkina Faso. La carte produite se rattachera à la collection des cartes internationales du tapis végétal de l'ICIV au 1:1 000 000, dont les concepts sont repris. Un fragment de la carte est présenté ici avec sa légende commentée. Elle est établie sur la base des informations satellitaires MSS de Landsat, traitées par photo-interprétation classique en liaison étroite avec des levées de terrain. Son originalité réside plus particulièrement dans l'expression des potentialités ligneuses exprimées par des volumes moyens de bois sur pied à l'hectare. Cette synthèse doit compléter les connaissances trop fragmentaires des états de surface du pays. Elle est attendue comme un maillon supplémentaire pour mieux orienter les décideurs nationaux et internationaux en matière de gestion et de protection de l'environnement et du patrimoine forestier.

## 1. Introduction

Ce programme répond d'abord à une demande du Comité burkinabé de la recherche forestière pour une meilleure gestion du patrimoine ligneux du pays. Il vise, de plus, à stimuler les activités nationales en matière d'inventaires utilisant l'outil télédétection et à les encourager à se donner un cadre et des méthodes qui font défaut. Il répond aussi aux besoins exprimés par les institutions internationales en quête de synthèses cartographiques régionales actualisées, ceci à des fins de contrôle et de surveillance continue des ressources renouvelables (BLASCO et LEGRIS, 1979; F.A.O., 1979 et 1980; UNESCO, 1973).

Il doit se traduire par une synthèse cartographique au 1:1 000 000 qui prendra place dans la série des cartes internationales du tapis végétal et des cartes écologiques de la végétation de l'ICIV de Toulouse (GAUSSEN, 1957; BLASCO, 1988).

## 2. Objectifs

Il s'agit de dresser, sur la base de produits satellitaires, un bilan des états de surface de l'ensemble du Burkina Faso au début des années 90, exprimé par une carte synoptique dans laquelle doivent apparaître :

- les différents types de végétation naturelle selon une nomenclature classique d'ordre essentiellement écologique et physionomique (AUBREVILLE, 1959 et 1965; FONTÈS, 1983; GUINKO, 1984);

- les potentialités ligneuses exprimées par des volumes moyens de bois à l'hectare. Cet aspect est encore inédit pour ce type de carte et lui confère toute son originalité. Les potentialités sont comprises ici dans le sens de volume de bois sur pied exploitable;

- les taux d'occupation du sol exprimés par le ratio «surfaces cultivées - formations naturelles»;

- les grands boisements, les forêts classées, les parcs et réserves naturelles.

## 3. Nomenclature

Deux entités majeures doivent ressortir sur la carte : les formations naturelles et les milieux de culture associant champs de l'année et jachères.

Ces deux types de surface s'interpénètrent dans des proportions variables et selon des mosaïques plus ou moins complexes, aux limites tantôt franches, tantôt floues.

### 3.1. Les formations naturelles

Il faut immédiatement souligner que la majorité de ces formations ont été soumises à une pression humaine plus ou moins lointaine. Cette action se poursuit aujourd'hui d'une manière souvent exacerbée. Leurs surfaces reculent, quelle que soit la zone considérée (FONTÈS, 1986).

Elles sont traitées à 4 niveaux qui sont repris pour la stratification de la carte (fig. 1).

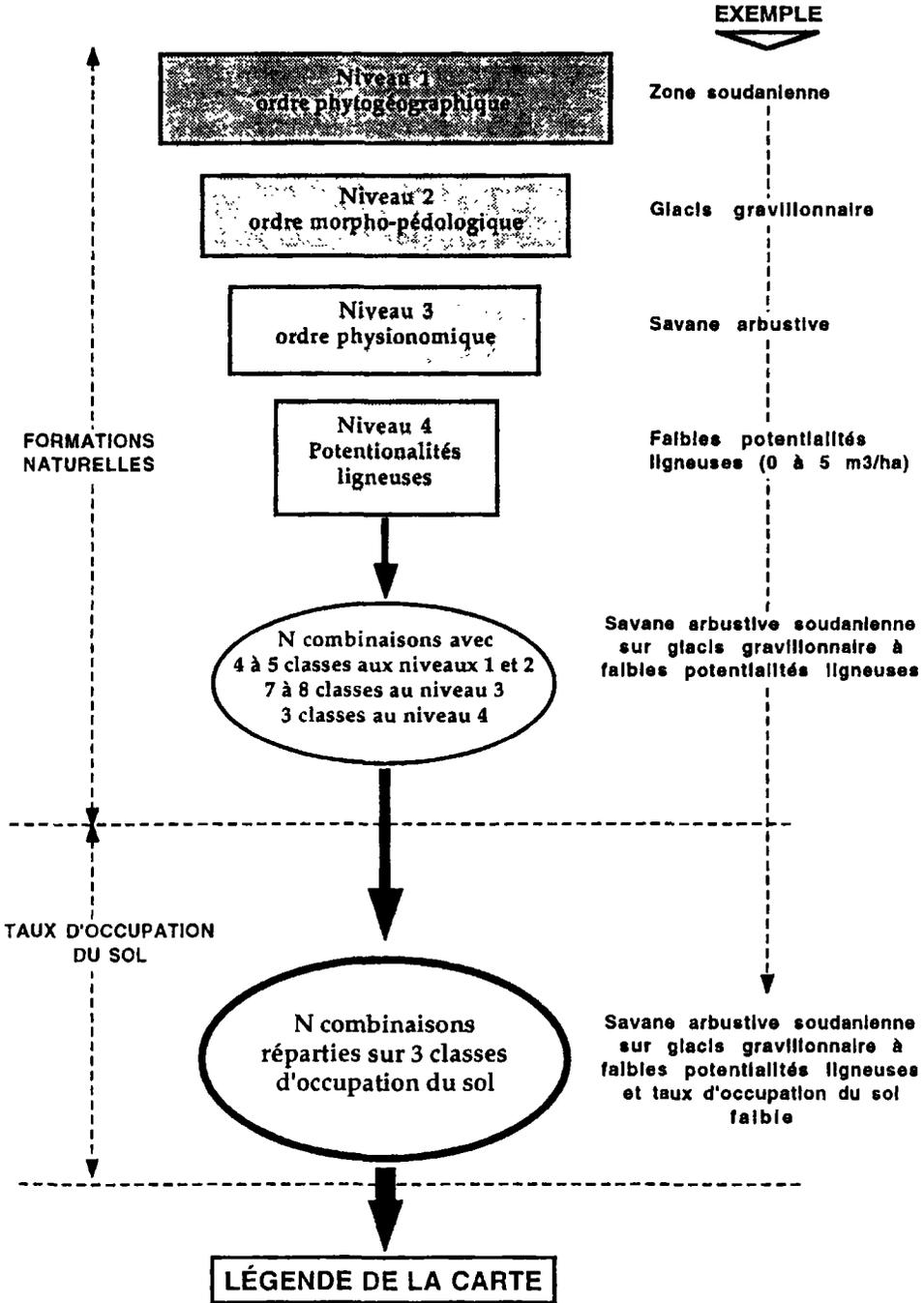


Figure 1. Schématisation de la stratification de la carte

Le premier niveau est d'ordre phytogéographique. Il s'appuie sur les travaux de GUINKO (1984) qui distinguent du nord au sud (fig. 2) :

- la zone sahéenne, subdivisée en :
  - un secteur sahéen strict,
  - un secteur subsahélien;
- la zone soudanienne subdivisée en :
  - un secteur soudanien septentrional,
  - un secteur soudanien méridional.

Cette distribution zonale s'appuie simultanément sur des faits bioclimatiques et floristiques.

Le second niveau est d'ordre morpho-pédologique. Il s'inspire en ce sens des travaux de l'Office de la recherche scientifique et technique Outre-Mer : carte pédologique de reconnaissance (ORSTOM, 1969), carte des ressources en sol (BOULET, 1976) et de la carte des milieux naturels (GUILLOBEZ, 1985).

Le Burkina Faso est un pays aux reliefs modestes et la majeure partie des surfaces s'apparente à un vaste plateau uniforme (HOTTIN et OUEDRAOGO, 1975). L'échelle finale de la carte autorise à ne considérer ici que les grandes unités physiographiques auxquelles se rattachent morphogénèse et grands types de sols : formations éoliennes, glacis, complexes orographiques ou cuirassés, vallées principales, etc.

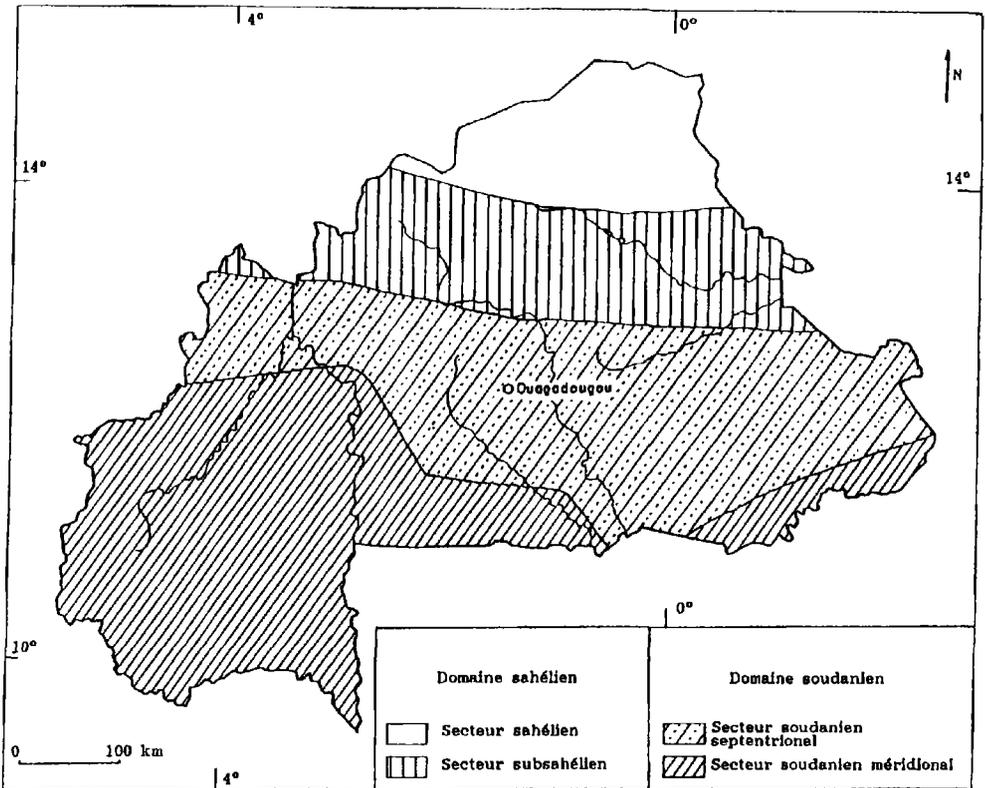


Figure 2. Territoires phytogéographiques du Burkina Faso

Le troisième niveau est d'ordre physiognomique. Suivant la classification de Yangambi (AUBREVILLE, 1957; MONOD, 1957 et 1963), seront individualisées : steppes et savanes (herbeuses, arbustives, arborées ou boisées), forêts claires et galeries forestières.

Des subdivisions floristiques peuvent être introduites ici. Elles sont alors liées à la nature du sol et au degré d'artificialisation de la formation dans son contexte général bioclimatique et morphologique.

Le quatrième niveau concerne les potentialités en bois. Les différentes formations naturelles sont rattachées à l'une des trois classes de potentialités retenues dans ce programme, à savoir :

- classe 1 : forte potentialité,
- classe 2 : potentialité moyenne,
- classe 3 : potentialité faible ou nulle.

Elles doivent mettre en valeur la dégradation globale du milieu, mais surtout permettre d'organiser une gestion plus rationnelle du patrimoine forestier, plus particulièrement dans les zones que la pression démographique a le moins affectées.

Ces classes correspondent à des tranches de volume de bois sur pied par unité de surface dont les seuils ne seront définitivement affectés qu'après acquisition et traitement complet des mesures dendrométriques au sol. Dans le contexte de savanes et de steppes qui prédominent au Burkina Faso et où les volumes sont globalement faibles, la valeur de ces seuils sera basse (de l'ordre de 5 à 10 m<sup>3</sup>/ha), à l'inverse de ce qu'elle aurait pu être en pays plus forestier.

Il faut noter que la majorité du bois sur pied au Burkina Faso est du bois de feu ou du bois domestique.

### **3.2. Les surfaces cultivées**

Les terres de culture s'organisent généralement autour des villes et villages selon des auréoles concentriques caractéristiques, des lanières le long de certains talwegs ou de vallées alluviales, en champs de brousse plus ou moins dispersés sur des glacis ou pédiplaines. Elles sont souvent associées à de vieilles jachères et à des lambeaux de formations végétales spontanées. Elles peuvent former d'immenses parcs à «karité», à *Acacia albida* ou à *Parkia biglobosa*.

La proportion respective de chacune de ces surfaces est étroitement liée à la densité des populations. Reflet fidèle de l'état et du dynamisme des paysages végétaux, cette distribution est exprimée à travers trois nouvelles classes qui figureront également sur la carte :

- taux d'occupation faible ou nul : < 10%
- taux d'occupation moyen : 10 à 30%
- taux d'occupation fort : > 30%.

Cette distinction permet de localiser immédiatement les domaines protégés et globalement stables des milieux les plus humanisés, donc les plus vulnérables.

Le seuil de 30% tient du système de culture, extensif. Un territoire où les surfaces cultivées (champs de l'année + jachères de moins de deux ans) occupent au moins 30% de l'espace, peut être déjà considéré comme fortement occupé (GUINKO *et al.*, 1991).

## **4. Méthodologie**

On s'appuie sur des méthodes simples, applicables à l'ensemble du territoire, avec des adaptations possibles d'un domaine phytogéographique à un autre. Elles doivent nécessairement

assurer la stratification de l'espace burkinabé répondant aux objectifs fixés et compatibles avec l'échelle retenue (KÜCHLER and ZONNEVELD, 1988).

Les méthodes développées ici, d'une manière synthétique, sont relatives aux 3 phases qui ont présidé à cette réalisation, à savoir :

- l'interprétation des produits satellitaires ou phase 1,
- les relevés de terrain ou phase 2,
- la validation ou phase 3.

#### **4.1. Interprétation des produits satellitaires ou phase 1**

Les images satellitaires constituent la base matérielle de ce programme. Leur traitement consiste en l'interprétation visuelle semi-supervisée de 17 images MSS de Landsat, à l'échelle du 1:500 000, disponibles en «compositions colorées trois canaux» sur support papier.

La bonne adéquation entre leur résolution spatiale et l'échelle du produit cartographique final, leur disponibilité à des dates acceptables justifient leur choix dans ce programme (GUELLEC, 1980 et 1982; KÜCHLER and ZONNEVELD, 1988).

Pour compléter les images MSS de moindre qualité, une dizaine d'images HRV de SPOT (compositions colorées au 1:100 000) ont été acquises et traitées de façon similaire.

Le traitement des images est réalisé en s'appuyant sur des critères de différenciation classiques qui introduisent les contrastes : teinte, forme, structure et texture, ainsi que des critères d'environnement.

L'interprète raisonne en fonction de la date de prise de vue qui correspond à un stade phénologique précis, tant des groupements végétaux naturels que des cultures. Les images sont choisies si possible à une date avancée de la saison sèche, époque où le tapis herbacé fournit une réponse chlorophyllienne faible ou nulle, où les récoltes, déjà réalisées, laissent les champs de l'année à nu, et où, enfin, les ligneux sont encore feuillés (FONTÈS, 1983).

Les thèmes simples sont immédiatement interprétés : cordons ripicoles, cours d'eau libre, réseau hydrographique en général, mares et lacs, massifs rocheux, complexes cuirassés, feux de brousse, sols nus cultivés ou érodés. L'identification des espaces cultivés est facilitée par superposition de fonds routiers et démographiques à l'image. Leur rattachement aux classes d'occupation du sol est réalisé grâce à l'utilisation d'une grille-point planimétrique calibrée, puis, progressivement, grâce à l'oeil exercé de l'interprète.

La stratification des images se poursuit à l'intérieur de surfaces ainsi délimitées et dont l'hétérogénéité traduit différents degrés de recouvrement du sol et niveaux d'activité chlorophyllienne de la végétation.

Les surfaces-images les plus complexes sont traitées suivant la méthode classique de délimitation par «élimination convergente» qui permet d'individualiser, par étapes successives, des unités de complexité croissante : on délimite ainsi à chaque étape, deux ensembles opposés, correspondant sur l'image à deux aspects extrêmes par la teinte, la texture ou la structure, entre lesquels, par différence, on conserve un troisième ensemble, généralement hétérogène, pour lequel, après élimination des deux premiers, la même démarche va être entreprise (CABAUSSEL, 1967).

On parvient de la sorte à stratifier progressivement l'ensemble de la zone couverte par l'image en individualisant des entités (ou groupes) homogènes. Celles-ci sont matérialisées sur calque (d'interprétation) par des unités d'égale apparence sensées représenter le même objet au sol mais aussi des objets différents, de même parenté spectrale. Ces unités sont immédiatement confrontées, si nécessaire, à la documentation existante ou à des produits de meilleure résolution : photographies aériennes et images satellitaires HRV qui assurent une

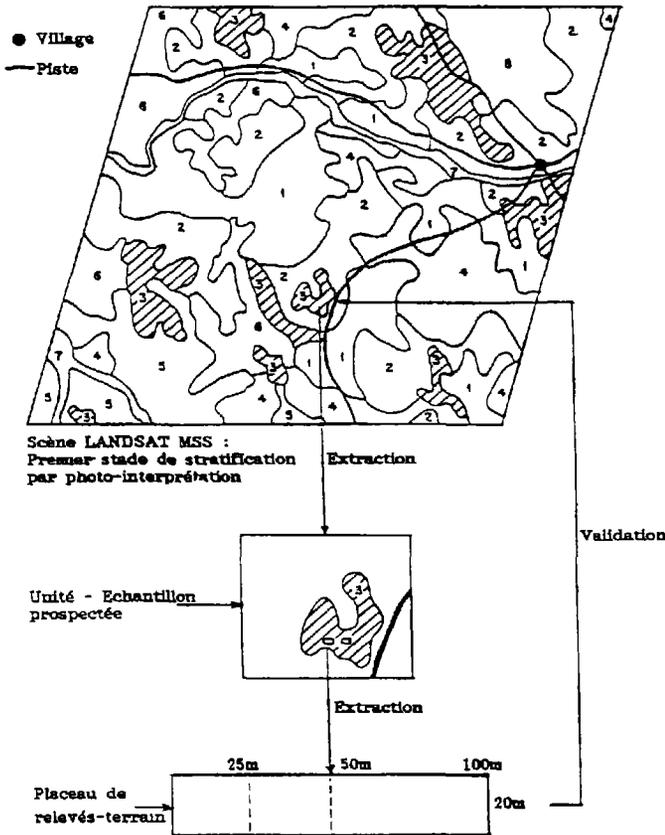
bonne transition avec la phase-terrain, voire même une parfaite identification. Leurs limites et leur affectation ne deviennent définitives qu'après les reconnaissances et mesures au sol que complètent des survols aériens sur les sites d'accès difficile ou de qualité-image médiocre.

#### 4.2. Relevés de terrain ou phase 2

Ils sont étroitement liés à la première phase d'interprétation. Ils sont réalisés à trois niveaux d'observation (fig. 3).

Le premier niveau est celui de la zone couverte par l'image MSS. On s'efforce autant que possible d'organiser la prospection sur une seule image, compte tenu des variations spectrales bien connues d'une image à l'autre.

Le second niveau est celui des unités isophènes de l'image qui correspondent à des surfaces de 2 km<sup>2</sup> (taille minimale de représentation cartographique au 1:1 000 000, soit un rectangle de 1 x 2 mm) à plusieurs dizaines de km<sup>2</sup>.



**Figure 3.** Schématisation d'une stratification de scène Landsat et d'un échantillonnage pour validation

Le troisième niveau est celui des placeaux de 500 à 2 000 m<sup>2</sup>, aires rectangulaires de 25, 50 ou 100 m de long sur 20 m de large choisis à l'intérieur des unités-échantillons dont ils sont représentatifs.

#### **4.2.1. Le premier niveau**

Tout au long de la zone prospectée, des observations générales de type physionomique, floristique (espèces dominantes) ou concernant l'activité humaine sont consignées et calées précisément dans l'espace à l'aide de repères topographiques et du compteur kilométrique du véhicule.

#### **4.2.2. Le second niveau**

Dans un groupe d'égale apparence, sont sélectionnées, selon des considérations d'ordre morpho-pédologique, une ou plusieurs unités sur lesquelles des observations plus précises sont réalisées.

Le taux d'échantillonnage (proportion des surfaces sélectionnées par rapport aux surfaces du groupe) varie de 10 à 20% suivant l'hétérogénéité des unités.

Ce taux répond à une norme exigée par l'échelle cartographique.

#### **4.2.3. Le troisième niveau**

Le site des placeaux est défini au départ en fonction du réseau routier, des possibilités d'accès et de points remarquables (confluences, villages, reliefs, etc.) pointés sur les cartes de l'Institut géographique national au 1:200 000 et 1:500 000, pour faciliter leur emplacement sur le terrain et alléger les délais d'exécution.

Le positionnement des placeaux ne devient définitif qu'après s'être assuré de leur bonne représentativité au sein de la formation considérée.

Leur nombre est lui-même fonction de la diversité végétale. Dans une unité qui présente plusieurs faciès de végétation, ce nombre peut être multiplié par 2 ou par 3.

Ces choix relèvent naturellement de l'expérience de l'observateur à percevoir immédiatement les nuances qui existent au sein d'une formation végétale et que l'image satellitaire ne traduit pas.

#### **4.2.4. Relevés et mesures proprement dits**

À chaque niveau, sont appréhendés les paramètres qualitatifs et quantitatifs des peuplements herbacés et ligneux qui répondent à la nomenclature adoptée et induisent naturellement l'aspect visible sur image.

L'attention portée au peuplement herbacé concerne sa composition floristique majeure, sa hauteur et son taux de recouvrement apparent, variables indispensables pour le rattachement de la formation aux deux types physionomiques essentiels : steppes et savanes.

Le peuplement ligneux est décrit à l'échelle de l'unité d'après le type physionomique dominant, arboré ou arbustif, la composition floristique majeure et le taux de recouvrement apparent.

À l'échelle du placeau, tous les individus ligneux, arbres, arbustes, arbrisseaux et sous-arbrisseaux, sont comptabilisés, par genre et espèce. Seuls, les individus de diamètre de tige supérieur à 2,5 cm sont renseignés d'après la hauteur totale, le diamètre de la ou des tiges principales et le diamètre de la couronne.

Ces paramètres dendrométriques introduits dans des tarifs de cubage vont permettre d'apprécier le volume de bois sur pied sur chaque placeau, et par extrapolation, celui de la formation considérée.

La mesure des couronnes doit logiquement permettre d'évaluer les taux de recouvrement au sol de la formation puis de les corrélérer avec la signature spectrale sur image. Toutes les couronnes ont été mesurées à l'exception des formations extrêmes, soit très ouvertes, soit fermées pour lesquelles il n'y a plus de relation stricte entre couverture végétale et réponse spectrale.

Pour les petits ligneux de diamètre inférieur à 2,5 cm, on s'attache simplement à comptabiliser le nombre de sujets, par espèce. L'intérêt est ici d'ordre dynamique puisqu'ils représentent la régénération naturelle.

### **4.3. Validation des relevés de terrain**

La phase de prospection au sol permet d'arrêter pour la carte une légende (sub)définitive sur laquelle s'appuie toute la phase cartographique finale, celle de la restitution notamment que l'on n'évoquera pas ici.

Le traitement méthodique des données de terrain, qualitatives et quantitatives confirme (ou infirme) l'interprétation des images et peut assurer simultanément l'extrapolation des observations et l'affectation des unités aux classes de la légende. Les corrections des erreurs d'identification, de limites et de regroupements sont apportées et complètent celles enregistrées sur le terrain.

Le calcul des volumes de bois sur pied détermine le rattachement des unités cartographiques aux classes de potentialités ligneuses.

Les calculs des recouvrements sont également réalisés et corrélés à l'aspect visible des images, la teinte plus spécialement. Les derniers doutes et imprécisions sont levés par des appuis au sol et des survols aériens supplémentaires ou par la consultation de missions récentes de photographies aériennes et d'images HRV.

## **5. Discussion**

Différents problèmes se posent classiquement lorsque l'on aborde de tels programmes. En simplifiant, on peut dire qu'ils sont liés :

- aux produits de télédétection,
- à l'échelle de restitution,
- à la prospection au sol.

### **5.1. Les produits de télédétection**

La bonne compatibilité entre la résolution des images MSS et celle de la carte ne peut naturellement pas masquer le décalage d'échelle important qui existe avec le niveau de perception au sol.

Un effort de synthèse constant doit donc être fourni de la part des opérateurs passant de la basse résolution de l'image à la haute résolution du terrain, et vice-versa.

Cet effort est nettement atténué en intercalant les niveaux intermédiaires de perception : photographies aériennes, survols aéroportés, images HRV ou TM, malheureusement pas toujours disponibles.

Un autre problème essentiel est celui de l'acquisition des données et de la date de «prise de vue».

Dans ce projet, l'acquisition de la couverture MSS a été largement facilitée par sa présence au Centre régional de télédétection de Ouagadougou. Elle est récente puisque la majorité des images sont de 1987 et cadrent bien la période d'observation optimale pour les thèmes abordés, le début de la saison sèche.

Toutefois, la qualité médiocre de certaines images, liée aux facteurs d'occultation que sont les brumes sèches, les aérosols et les feux de brousse d'une part et, d'autre part, la variation de la restitution observée entre images voisines, s'ajoute aux difficultés déjà évoquées.

## **5.2. L'échelle de restitution**

Elle induit la nomenclature ou légende de la carte dans laquelle les classes de végétation retenues doivent être à la fois, suffisamment larges et «mixtes» comme peut l'être, par exemple, une mosaïque de «savanes arbustives et arborées soudaniennes». La difficulté réside donc dans les regroupements, souvent imposés, de certains types de végétation. Ces regroupements ne sont pas toujours au goût de l'écologue et du forestier qui souhaiteraient conserver plus de détails. Mais on aborde alors un autre type d'échelle qui n'est plus le nôtre.

## **5.3. La prospection au sol**

L'un des problèmes fondamentaux auxquels le cartographe est sans cesse confronté est celui du repérage au sol quand on passe de l'image au terrain et inversement.

Au Burkina Faso, l'uniformité des paysages et la faible densité du réseau routier, ne facilitent pas les positionnements précis. L'effet immédiat est le rallongement des prospections au sol, mais surtout la difficulté de validations et d'extrapolation des résultats.

Il est clair que dans la perspective de production cartographique qui est la nôtre, ces problèmes doivent être résolus quels que soient les moyens mis en oeuvre. Dans de nouveaux programmes, l'acquisition d'un système de positionnement ou GPS prendrait ici toute sa valeur.

## **6. Conclusion**

La carte sera éditée à Toulouse au cours du second semestre de 1992. Nous en présentons ici un extrait accompagné de sa légende (fig. 18-4, voir cahier couleur). Il faut noter l'importance du choix des couleurs qui, séparément, ont une signification écologique et biologique particulière. Les couleurs dites «chaudes», comme le jaune, l'orangé ou le beige, représentent les milieux les plus chauds et les plus secs (secteurs phytogéographiques septentrionaux), généralement moins occupés et plus pauvres. Elles rassemblent donc les formations végétales les plus xérophiles. Certains verts ou bruns froids, s'adressent aux milieux plus humides, plus denses en végétation et souvent plus cultivés. Se superposent aux couleurs, des trames et figurés conventionnels, évocateurs de phénomènes précis. La trame-point exprime la densité des arbres et arbustes qui traduit les potentialités ligneuses que l'on a cherché à mettre en valeur. Les hachures verticales représentent les zones d'occupation humaine, leur largeur en indique le taux.

Mise en oeuvre par une équipe d'enseignants, ingénieurs et chercheurs, elle a fait appel à des méthodes simples qui ne retirent en rien la part de son originalité.

Elle se doit d'être une carte dynamique, en favorisant des applications à vocation de développement, notamment :

- le lancement d'une cartographie à plus grande échelle susceptible de fournir aux scientifiques et aux décideurs des outils de travail en prise plus directe avec leurs besoins;
- l'intégration à une base de données permettant aux utilisateurs des données satellitaires de la nouvelle génération, le suivi permanent des états de surface et l'étude des changements globaux à l'échelle planétaire. Ce qui suggère que de tels programmes cartographiques soient étendus à de nouveaux pays.

## **7. Références**

- AUBREVILLE, A. 1957. Accord à Yangambi sur la nomenclature des types africains de végétation. Bois et forêts des tropiques, n° 51, p. 23-27.
- AUBREVILLE, A. 1959. Définitions physiologiques, structurales et écologiques des forêts claires en Afrique. Extension géographique. Comité scientifique pour l'Afrique au sud du Sahara, n° 52, p. 81-92.
- AUBREVILLE, A. 1965. Conceptions modernes en bioclimatologie et classification des formations végétales. Adansonia, série 2, vol. 1, 5, 3, p. 297-306.
- BLASCO, F. 1988. The international vegetation map (Toulouse, France). in A.W. Küchler and I.S. Zonneveld. Vegetation mapping. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, chap. 31, p. 443-460.
- BLASCO, F. et LEGRIS, P. 1979. Projet pilote pour la surveillance continue de la couverture forestière tropicale à partir des informations fournies par les satellites. Food and Agriculture Organisation, Rome, Projet du Programme Environnement des Nations Unies, n° 258-132, 97 p.
- BOULET, R. 1976. Notice et cartes des ressources en sol de la Haute-Volta en 5 coupures au 1:500 000. Office de la recherche scientifique et technique des territoires Outre-Mer, Paris.
- CABAUSSEL, G. 1967. Photo-interprétation et synthèse écologique. Essai d'application à la feuille de Grenoble (1:100 000). Documents pour la carte de la végétation des Alpes, Laboratoire de biologie végétale de l'Université de Grenoble, p. 127-172.
- F.A.O. 1979. Carte écologique du couvert végétal du Bénin et du Togo (basée sur des images Landsat), au 1:5 000 000. Système mondial de surveillance continue de l'environnement, UNESCO, 2 coupures.
- F.A.O. 1980. Global environment monitoring system. Pilot project on tropical forest cover monitoring Benin, Cameroon, Togo. Project Implementation Methodology, results and conclusion, Rome, 99 p.
- FONTÈS, J. 1983. Essais cartographiques de la végétation par télédétection; quelques exemples pris en Haute-Volta. Thèse de 3<sup>e</sup> cycle, Université Paul-Sabatier, Toulouse, 179 p. + annexes.
- FONTÈS, J. 1986. Forest resources in four sahelian countries. International union of societies of foresters. Newsletter, n° 23, p. 4-5.
- GAUSSEN, H. 1957. Les cartes de la végétation. Institut français de Pondichéry, Section scientifique et technique, Pondichéry, tome 1, fasc. 2, p. 51-87.
- GUELLEC, J. 1980. Possibilités d'utilisation d'images Landsat améliorées, à l'échelle du 1:200 000 pour la connaissance des forêts. Interprétation et cartographie des types de végétation ligneuse et d'occupation du sol en zone soudano-guinéenne. Bois et forêts des tropiques, n° 193, p. 41-56.

- GUELLEC, J. 1982. Analyse visuelle d'images Landsat et exploitation des informations recueillies dans le cadre d'études forestières en zone tropicale. Actes du Symposium international de la Commission VII, Toulouse, p. 433-442.
- GUILLOBEZ, S. 1985. Milieux naturels du Burkina Faso. Carte au 1:1 000 000. Institut de recherches agronomiques tropicales et des cultures vivrières.
- GUINKO, S. 1984. Végétation de la Haute-Volta. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux III, 394 p. + annexes.
- GUINKO, S., BANDRÉ, E. et OUADBA, J. M. 1991. Carte de l'occupation des sols et des risques de dégradation, au 1:1 000 000, du Burkina Faso. Atlas du Burkina Faso, Projet BKF/89/005, F.A.O., 1 coupure + notice, 42 p.
- HOTTIN, G. et OUEDRAOGO, D. F. 1975. Carte géologique de la république de Haute-Volta au 1:1 000 000 et notice explicative. Ministère du commerce, de développement et des mines, Direction de la géologie et des mines, République de Haute-Volta, 58 p.
- KÜCHLER, A. W. and ZONNEVELD I. S. 1988. Vegetation mapping. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, vol. 10, 635 p.
- MONOD, T. 1957. Les grandes divisions chorologiques de l'Afrique. Comité consultatif tropical africain/Conseil scientifique pour l'Afrique, publication n° 24, Londres, 145 p.
- MONOD, T. 1963. Après Yangambi (1956) : notes de phytogéographie africaine. Bulletin de l'Institut français d'Afrique noire, Dakar, tome XXV, série A, 2, p. 594-655.
- ORSTOM 1969. Cartes pédologique de reconnaissance en 5 coupures au 1:500 000, Paris.
- UNESCO 1973. Classification internationale et cartographie de la végétation. Série Écologie et conservation, Paris, n° 6, 93 p.

# 19

## **Utilisation du capteur aéroporté MEIS II pour l'évaluation des dommages causés par la tordeuse des bourgeons de l'épinette au Nouveau-Brunswick**

MARIO HINSE, OLGA DUPONT et GILBERT FAFARD

*Groupe de technologie forestière appliquée d'Edmundston, Centre universitaire Saint-Louis-Maillet (CUSLM), Université de Moncton, 165, boul. Hébert, Edmundston, Nouveau-Brunswick, Canada E3V 2S8; téléphone : (506) 737-5050; télécopieur : (506) 737-5373*

### **Résumé**

Il existe dans l'est du Canada un insecte qui cause des pertes énormes de bois pour les industries forestières. Pour le seul contrôle de cet insecte, communément appelé la tordeuse des bourgeons de l'épinette [*Choristoneura fumiferana* (Clem.)], la province du Nouveau-Brunswick dépense plusieurs millions de dollars annuellement afin de minimiser les dégâts. Au cours de l'été 1989, des images numériques ont été acquises avec le capteur aéroporté MEIS II (Multi-detector Electro-optical Imaging Scanner) au-dessus d'un secteur forestier du nord-ouest du Nouveau-Brunswick. L'objectif du programme de recherche est d'évaluer le potentiel des images MEIS pour l'estimation de la défoliation courante, causée par la tordeuse des bourgeons de l'épinette, et de développer un programme opérationnel pour optimiser les opérations d'arrosage et de protection des peuplements de conifères. Introduits dans un modèle de prédiction, le canal 2 de MEIS et le rapport des bandes 7/5 (bande rouge/bande infrarouge) se sont avérés les variables les plus significatives pour la prédiction de la défoliation courante. La précision du modèle s'élève à 80,6% en utilisant des limites de classes de défoliation courante trouvées statistiquement et un pourcentage de 54,3% en utilisant des limites définies par le Ministère des ressources naturelles et de l'énergie du Nouveau-Brunswick.

## 1. Introduction

La foresterie représente un secteur d'activité des plus importants au Nouveau-Brunswick. L'un des principaux soucis de l'industrie forestière et des instances gouvernementales est de pourvoir à la protection de la forêt comme source d'approvisionnement de matières ligneuses. Cependant, il existe dans l'est du Canada un prédateur qui cause des pertes énormes de bois pour les industries. Pour le seul contrôle de cet insecte, communément appelé la tordeuse des bourgeons de l'épinette [*Choristoneura fumiferana* (Clem.)], la province dépense plusieurs millions de dollars annuellement afin de minimiser les dégâts. Plusieurs programmes de recherches ont été mis sur pied afin de quantifier et de localiser les dommages causés par cet insecte. Dans le cadre de ses activités, le Groupe de technologie forestière appliquée d'Edmundston a été mandaté pour réaliser une recherche sur ce sujet, en utilisant la télédétection comme source de données.

Au cours de l'été 1989, des images numériques ont été acquises avec le capteur aéroporté MEIS II (Multi-detector Electro-optical Imaging Scanner) au-dessus d'un secteur forestier du nord-ouest du Nouveau-Brunswick. L'objectif du programme de recherche est d'évaluer le potentiel des images MEIS pour l'estimation de la défoliation courante, causée par la tordeuse des bourgeons de l'épinette, et de développer un programme opérationnel pour optimiser les opérations d'arrosage et de protection des peuplements de conifères. La défoliation courante se définit comme celle qui apparaît durant l'année en cours, contrairement à la défoliation cumulative qui représente la défoliation totale que subit un arbre d'une année à l'autre.

Des études récentes ont démontré le potentiel des capteurs aéroportés pour l'évaluation des dommages causés par les insectes (LECKIE, 1987) et pour la gestion des ressources forestières en général (TILL *et al.*, 1988). Les résultats de ces études ont permis l'ouverture de nouvelles voies de recherches pour l'application des images numériques en foresterie.

La présente étude décrit les principales étapes de traitements numériques apportées aux images MEIS dans le but de rencontrer les objectifs proposés. De plus, le développement et les résultats d'un modèle de prédiction sont présentés afin de caractériser trois niveaux de défoliation courante dans les peuplements de conifères en utilisant les données du capteur MEIS II.

## 2. Secteur d'étude

Le secteur d'étude est localisé au nord-ouest de la province du Nouveau-Brunswick et sur une partie du territoire de la réserve de Rimouski de la province de Québec (fig. 1). Le secteur couvre un corridor d'environ 4 km de largeur par 73 km de longueur, ce qui représente une superficie approximative de 292 km<sup>2</sup>. La forêt est principalement composée de sapins baumiers [*Abies balsamea* (L.)], d'épinettes [*Picea glauca* (Moench.) et *Picea mariana* (Mill)] et de feuillus tolérants [érables (*Acer saccharum* (Marsh) et *Acer rubrum* (L.)), hêtre (*Fagus grandifolia* (Ehrh)) et bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* (Britton))]. Cette zone est comprise dans les domaines forestiers (écorégions) de la rivière Verte et des Hautes terres des Maritimes (LOUCKS, 1961). L'altitude moyenne du secteur est de 375 m et se caractérise par un relief de pentes modérées. Le choix de cette zone a été principalement guidé par la gamme de niveaux de défoliation courante qu'on pouvait y rencontrer.

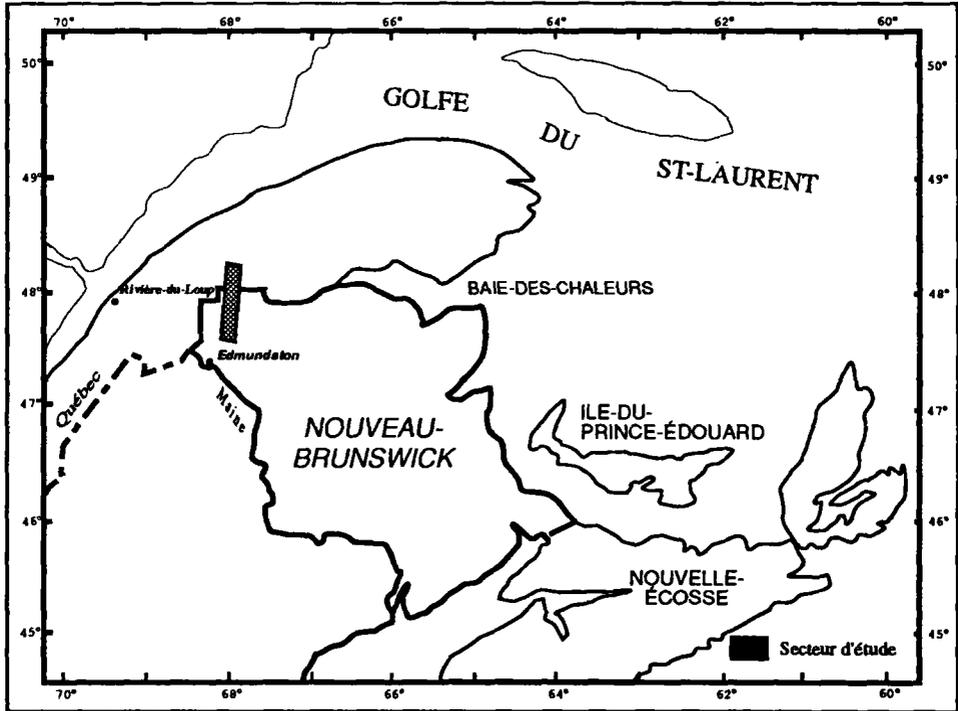


Figure 1. Localisation de la zone d'étude

### 3. Description des données

#### 3.1. Données du capteur MEIS II

Les images MEIS ont été acquises le 8 juillet 1989. Cette date correspondait au pic de la coloration relative à la défoliation courante causée par la tordeuse des bourgeons de l'épinette. Cette coloration rouge persiste habituellement pendant une courte durée au cours du mois de juillet (de 2 à 3 semaines), puis les aiguilles atteintes par la tordeuse tombent sous l'effet de la pluie et du vent.

Deux lignes de vol avec un recouvrement de plus de 60% ont servi à délimiter le territoire d'étude. De nouveaux filtres spectraux ont été utilisés lors de cette campagne d'acquisition. Ces filtres ont été spécialement conçus pour la détection des dommages causés par la tordeuse des bourgeons de l'épinette. Le tableau I résume les différents paramètres d'acquisition du capteur MEIS II qui ont servi lors de l'enregistrement des données.

#### 3.2. Mesures au sol

Durant la même période, une campagne de mesures au sol a été réalisée afin de quantifier le pourcentage de défoliation sur des parcelles expérimentales. L'estimation de la défoliation courante est effectuée par une méthode oculaire. Cette méthode consiste à observer la couronne des arbres, avec une lunette d'approche depuis le sol, et ainsi évaluer le pourcentage

**Tableau I.** Description des données MEIS II (filtre de la tordeuse des bourgeons de l'épinette)

Canaux	Longueur d'onde (bande centrale)	Région spectrale	Gain	Paramètre	Ligne de vol 1	Ligne de vol 2
1	1034,1	(IR)	1	Date	8-7-1989	8-7-1989
2	593,0	(V)	8	Heure	15h00	15h15
3	876,1	(IR)	2	Altitude(m)	4176	4145
4	525,0	(J-V)	16	Rés. spat. (m)	2,9	2,9
5	780,2	(PIR)	1	Azimut capteur	16°	196°
6	447,9	(B)	8	Zénith solaire	31,8°	30,1°
7	666,5	(R)	8	Élév. solaire	58,2°	59,9°
8	553,2	(V)	8	Azimut solaire	133,7°	139,5°

de défoliation courante. McLEAN et LIDSTONE (1982) ont démontré que cette méthode oculaire a une précision relative de  $\pm 10\%$ . Les mesures ont été effectuées sur 41 parcelles comprises dans le secteur d'étude. Dix échantillons ont été rejetés soit à cause de la présence de nuages ou soit qu'ils se retrouvaient trop près de la bordure de l'image. Un total de 31 échantillons ont été utilisés pour établir la relation entre les données de défoliation courante mesurées au sol et les valeurs numériques enregistrées par le capteur MEIS.

## 4. Prétraitement des données MEIS

### 4.1. Étalonnage des données

Les valeurs numériques des images MEIS II ont été préalablement transformées en valeur de luminance apparente. Cette transformation des données permet d'étalonner chacun des canaux du capteur pour l'effet du «gain» appliqué lors de l'acquisition des données. L'équation appliquée est (McCOLL *et al.*, 1983) :

$$L_{\lambda} = Ng \cdot [(1/R \cdot G) \cdot (F/E)] \quad (1)$$

où :

$L_{\lambda}$  = luminance apparente ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ );

R = sensibilité spectrale ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ );

F = fréquence de balayage (Hz);

Ng = niveau de gris (0-255);

G = gain;

E = temps d'exposition.

### 4.2. Correction des effets directionnels

Comme c'est souvent le cas avec les capteurs aéroportés qui ont un grand angle d'ouverture, il est nécessaire de corriger les variations d'illumination dues aux effets directionnels. Ces

effets apportent des variations d'illumination à travers les images qu'il est nécessaire de corriger afin d'obtenir un profil d'illumination constant dans les images. La méthode de correction utilisée est basée sur l'application d'une fonction polynomiale développée à partir de valeurs de luminance de sites de conifères en santé (Dupont *et al.*, 1991).

### 4.3. Normalisation des données

L'étalonnage des données ainsi que la correction des effets d'illumination ont été appliqués sur les deux lignes de vol. Malgré ces corrections, il n'est toutefois pas possible de comparer les sites de conifères d'une ligne de vol à une autre. La normalisation est un processus qui permet la comparaison des données d'images acquises selon des conditions différentes (tab. I). La normalisation que nous avons appliquée est basée sur deux paramètres statistiques, soit la moyenne et l'écart-type de sites (des conifères) extraits sur les deux lignes de vol (JOLY, 1986). L'équation est la suivante :

$$\text{Norm } P(i,j) = (E_r/E_p) \cdot (P(i,j) - m) + M \quad (2)$$

où :

Norm  $P(i,j)$  = image normalisée;

$P(i,j)$  = image à normaliser;

$E_r$  = écart-type de l'image de référence;

$E_p$  = écart-type de l'image à normaliser;

$M$  = moyenne de l'image de référence;

$m$  = moyenne de l'image à normaliser.

## 5. Prédiction de la défoliation courante

### 5.1. Élaboration du modèle de prédiction

Le modèle de prédiction a été construit à l'aide des données de terrain décrites au point 3.2. Une étude statistique préliminaire des données de terrain nous a permis de déterminer trois classes de défoliation courante. L'intérêt de cette analyse préliminaire est qu'on a pu assigner de nouvelles limites de classes de défoliation courante basées sur les mesures relevées sur le terrain soit : faible (0-35%), modérée (36-65%), sévère (66-100%). Ces limites diffèrent de celles couramment utilisées par le Ministère des ressources naturelles et de l'énergie (MRNE) du Nouveau-Brunswick, soit les classes : santé (0-10%), faible (11-30%) modérée (31-70%) sévère (71-100%).

La première étape dans l'élaboration du modèle a consisté à introduire dans une régression de type «stepwise» les 8 bandes du capteur MEIS ainsi que 12 autres néo-canaux composés de rapports de bandes soit les rapports : (7/5), (7/3), (7/3+5), (7/2), (8/2), (7/1), (3/1), (7/3), (7-5/7+5), (7-2/7+2), (8-2/8+2), (7-3/7+3). Dans le modèle, les bandes MEIS agissent comme les variables indépendantes et la défoliation mesurée sur le terrain comme la variable dépendante. Étant donné la taille de l'échantillon (N=31), nous n'avons retenu que les modèles à 1 ou 2 variables.

## 5.2. Résultats

Il existe une relation linéaire multiple entre les valeurs numériques de luminance des peuplements de conifères et les valeurs de la défoliation courante mesurées sur le terrain. Le canal 2 de MEIS et le rapport des bandes 7/5 (bande rouge/bande infrarouge) se sont avérés les variables les plus significatives dans le modèle de prédiction de la défoliation. L'équation de la régression multiple est :

$$\text{DEFOL} = (0,75 \cdot \text{BND2}) + (7,14 \cdot \text{BND7/5}) - 61,9 \quad (3)$$

où :

DEFOL = défoliation courante prédite;

BND2 = bande 2 du capteur MEIS (593 nm);

BND7/5 = rapport des bandes 7 et 5 (666,5 nm / 780,2 nm).

L'erreur-type associée à cette équation est de 19% avec un  $R^2$  de 0,74. La figure 2 présente une comparaison entre la défoliation actuelle et la défoliation prédite par le modèle. Les deux systèmes de classification sont présentés à la figure 2, soit celui proposé par l'analyse statistique et celui utilisé par le MRNE du Nouveau-Brunswick. Le pourcentage de précision du modèle est calculé en fonction du nombre total de points des valeurs prédites qui correspond aux mêmes catégories que les valeurs mesurées sur le terrain.

Ce pourcentage de précision s'élève à 80,6% en utilisant les limites de classes trouvées statistiquement et un pourcentage de 54,3% en utilisant les limites définies par le MRNE. Par la suite, l'équation 3 a été appliquée sur l'ensemble des données afin d'obtenir une image numérique de la défoliation courante. Cette pseudo-image a été filtrée et étalonnée en fonction des classes de défoliation courante trouvée statistiquement (0-35%), (36-75%) et (76-100%). Cette pseudo-classification permet une visualisation rapide du degré de défoliation courante des peuplements de conifères.

## 5.3. Validation du modèle de prédiction

Pour le moment, nous ne disposons d'aucunes données de terrain autre que celles introduites dans le modèle afin de valider nos résultats. Cependant nous avons à notre disposition une série de photographies obliques (35 mm) acquises lors du survol. Chaque photographie a pu être localisée sur notre territoire d'étude. Ces photographies ont été préalablement interprétées afin de déterminer le pourcentage de défoliation courante qu'on pouvait y déceler. Une fois ces pourcentages déterminés, nous les avons confrontés aux valeurs de notre pseudo-image de défoliation courante. Le résultat de cette comparaison indique une précision de 70% pour le modèle de prédiction (avec 24 sites échantillons, N=24).

## 6. Discussion et conclusion

Ces résultats encourageants nous indiquent que la télédétection peut jouer un rôle déterminant dans la prédiction des dommages causés par la tordeuse des bourgeons de l'épinette. Des techniques de modélisation telles que présentées par cette recherche s'avèrent un outil fort intéressant pour les gestionnaires de la forêt. Les résultats de cette étude ont une implication déterminante en ce qui concerne l'utilisation des données du capteur MEIS II pour le développement d'un programme opérationnel d'arrosage et de protection des forêts au

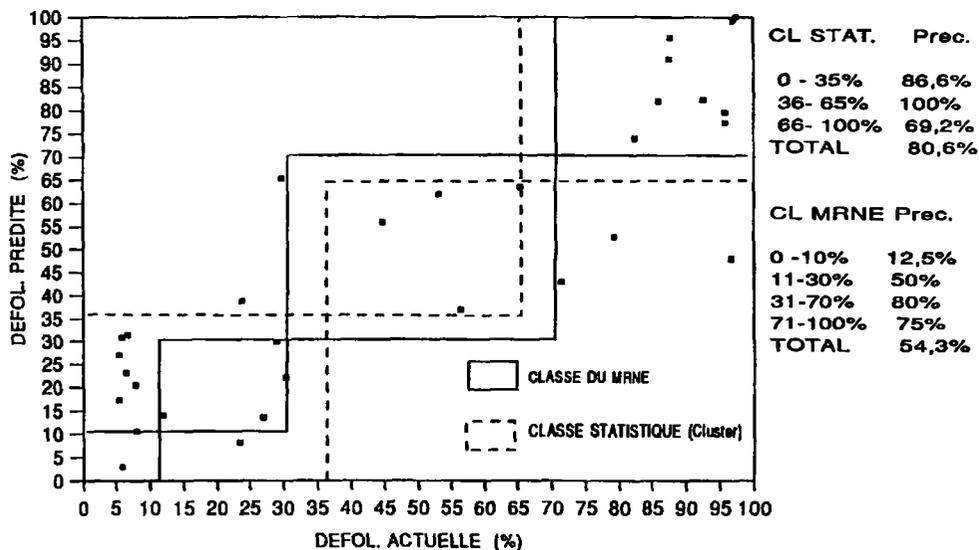


Figure 2. Comparaison entre la défoliation actuelle et la défoliation prédite; régression multiple bande 2 et (bande 7/bande 5)

Nouveau-Brunswick. L'application d'un modèle de ce genre constitue une méthode simple et relativement précise par rapport aux méthodes traditionnelles (*sketch mapping*) d'évaluation des dégâts causés par la tordeuse des bourgeons de l'épinette.

Cette pseudo-image numérique de la défoliation courante s'intègre rapidement au système d'information géographique du MRNE du Nouveau-Brunswick afin d'obtenir toute l'information nécessaire au programme d'arrosage et de l'aménagement forestier. Le dynamisme déployé par le MRNE du Nouveau-Brunswick et la division de Forêt Canada/Maritimes nous laisse optimistes tant qu'à l'application de cette nouvelle technique d'évaluation de la défoliation courante au cours des prochaines années.

## 7. Références

- DUPONT, O., HINSE, M. and FAFARD, G. 1991. MEIS Budworm Project : Preprocessing Operation - Radiometric Correction for the Illumination Effects. Internal Report, Forestry Canada-Université de Moncton, Edmundston, N.B., 50 p.
- LECKIE, D.G. 1987. Factors Affecting Defoliation Assessment Using Airborne Multispectral Scanner Data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 53, n° 12, p. 1665-1674.
- JOLY, G. 1986. Traitements des fichiers-images. Télédétection satellitaire, n° 3, Paradigme, Caen, France, 150 p.
- LOUCKS, O. L. 1961. A Forest Classification for the Maritimes Provinces. Proceedings of the Nova Scotian Institute of Science, vol. 25, Part 2, p. 85-176.
- McCOLL, W. D., NEVILLE, R. A. and TILL, S. M. 1983. Multi-detector electro optical imaging scanner MEIS II. Proceedings of the 8th Canadian Symposium on Remote Sensing, Montréal.

- McLEAN, D. A. and LIDSTONE, R. G. 1982. Defoliation by spruce budworm : estimation by ocular and shoot-count methods and variability among branches, trees, and stands. *Canadian Journal of Forestry Research*, vol. 12, p. 582-594.
- TILL, S. M., GRAY, R. G. and AHERN, F. J. 1988. Remote Sensing for Forest Resource Management : CCRS Advances in Electro-Optical and Radar Imaging Systems. *Proceedings of the 16th ISPRS Congress*, vol. 27, Part 9, Kyoto, Japan, p. VII-232-239.

# 20

## **Cartes écologiques de la végétation et télédétection satellitaire**

ÈVE JANODET et FRANÇOIS BLASCO

*URA 688 du Centre national de la recherche scientifique / Institut de la carte internationale de la végétation (ICIV), Université Paul-Sabatier, 39, allées Jules-Guesde, 31062 Toulouse cedex, France; téléphone : 61-53-02-35; télécopieur : 61-25-90-33; télex : UNIPSAB 521 880 F*

### **Résumé**

Après une présentation générale des cartes de la végétation, cet article rappelle les principes d'utilisation de la télédétection spatiale pour leur réalisation. Trois grandes familles de cartes sont examinées. Les capteurs de la série AVHRR de NOAA, à grand champ, c'est-à-dire à faible résolution géométrique, donnent des informations très générales, presque exclusivement phénologiques, utilisables pour des cartographies à petite échelle (inférieure au 1:5 000 000). Pour réaliser des cartes à échelle moyenne, du 1:1 000 000 au 1:250 000, on utilise couramment des données de satellites du type MSS de Landsat, qui fournissent des informations de type phénologique et physionomique. Enfin, les capteurs dits «de nouvelle génération» comme TM de Landsat et HRV de SPOT, dont la résolution géométrique est de l'ordre de quelques décimètres, permettent d'établir des cartes à des échelles beaucoup plus grandes (du 1:100 000 au 1:50 000). Les classifications prennent alors aussi en compte des critères floristiques ou dynamiques. Les résultats obtenus font clairement apparaître les progrès considérables réalisés dans l'utilisation des capteurs à haute résolution géométrique. Mais il n'existe actuellement pas de méthode satisfaisante d'analyse des données AVHRR pour dresser des cartes globales de la végétation.

## 1. Introduction

La cartographie de la végétation en régions intertropicales a connu un essor remarquable depuis les années 60 (KÜCHLER, 1967). Avec l'apparition de l'imagerie numérique et le grand nombre de données satellitaires mises à notre disposition depuis les années 70, il est évident que les méthodes et les moyens mis au service de la cartographie ont considérablement évolué.

La comparaison des cartographies traditionnelles en milieu intertropical, établies à partir de photographies aériennes, et des cartographies issues de l'interprétation et des traitements des données satellitaires permet de mettre en évidence les problèmes rencontrés et les progrès réalisés dans l'utilisation des capteurs à haute et basse résolutions géométriques.

## 2. Quelques rappels fondamentaux

### 2.1. Diversité des conceptions cartographiques

Il est extrêmement difficile, encore aujourd'hui, de donner une définition unique de ce qu'est une carte de la végétation. Chaque pays, chaque organisation internationale ont leurs propres méthodes et systèmes de classification, en fonction de leurs objectifs, de la taille de la région cartographiée ou des moyens mis en œuvre.

En simplifiant, on peut subdiviser les cartes de la végétation en deux grandes classes : celles qui tiennent compte des paramètres du milieu et du dynamisme des peuplements et celles dans lesquelles la physionomie et la flore de ces mêmes peuplements sont presque exclusivement prises en compte. La figure 1 illustre ce propos. On conçoit ainsi des cartes avant tout floristiques et des cartes essentiellement dynamiques et écologiques. Il est clair que les données sur la flore, sur la physionomie de la végétation et sur l'utilisation de ces ressources par l'homme conduisent à la production de cartes relativement statiques, dites «cartes d'utilisation du sol». De telles cartes ne sont en fait qu'une représentation spatiale d'inventaires. L'emploi de telles cartes est limité, car elles n'informent que sur l'état de la végétation selon un petit nombre de critères (floristiques, physionomiques) et à une date donnée (GAUSSEN, 1957). Il paraît plus intéressant de se demander ce qui conditionne cet état et comment il pourrait évoluer. Il s'agit donc d'analyser la végétation en termes dynamiques. On doit alors prendre en compte les paramètres physiques et biotiques du milieu et les types de végétation correspondants, plus ou moins perturbés et donc à différents stades de leur évolution, progressive ou régressive. On établit ainsi des cartes écologiques de la végétation, auxquelles Gausсен associe la notion de «séries de végétation».

Il va aussi de soi que la diversité des cartes de la végétation est intimement liée à celle des échelles de représentation. Par exemple, lorsqu'on cartographie une île telle que la Grande Comore au 1:20 000, il est possible de distinguer un nombre élevé de phytocénoses. Mais cette île, à une échelle mondiale, c'est-à-dire à très petite échelle, n'apparaît même pas.

On trouvera plus de détails sur la réalisation des cartes de la végétation dans KÜCHLER et ZONNEVELD (1988).

De manière classique les cartes de la végétation étaient réalisées à l'aide de la couverture aérienne de la région étudiée, qui permettait d'extrapoler des connaissances et des relevés de terrain sur des surfaces limitées. La télédétection spatiale a fourni un nouveau moyen d'observer la surface terrestre et des méthodes de cartographie de la végétation ont été

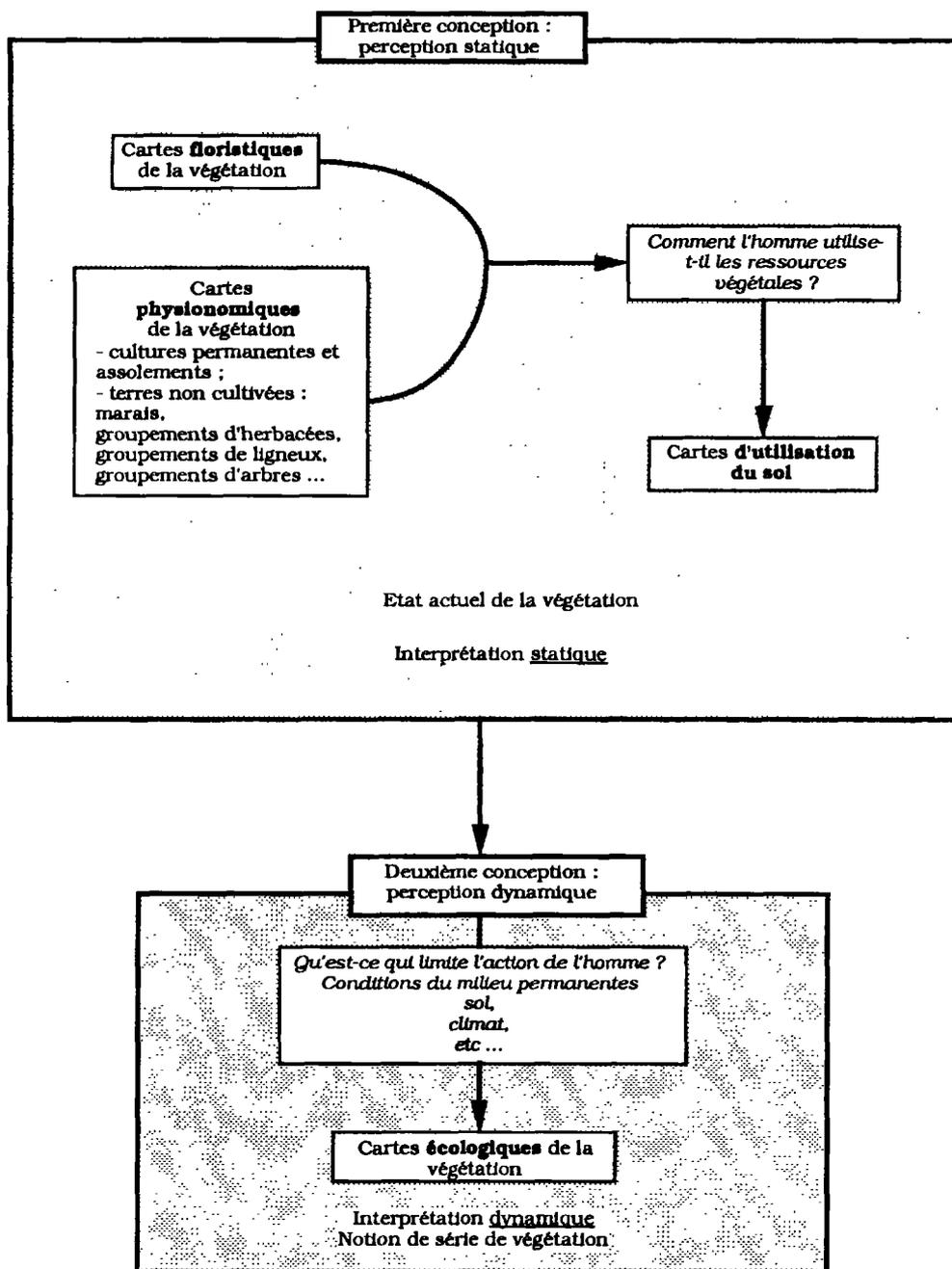


Figure 1. Les cartes de la végétation (JANODET, 1990, voir GAUSSEN, 1957)

développées autour de cet outil. Elles sont très similaires dans leur démarche aux méthodes classiques, mais l'imagerie satellitaire a introduit des procédures nouvelles liées notamment à la taille du champ de vision et à la nature numérique des données.

## **2.2. Principaux apports de la télédétection spatiale à la cartographie végétale**

### **2.2.1. Comportement spectral des végétaux**

La réalisation de cartes de la végétation à l'aide de données de télédétection spatiale repose sur la possibilité de reconnaître, à partir de leurs caractéristiques radiométriques, des types de végétation selon des critères de classification «traditionnels».

Les principes de l'utilisation de la télédétection spatiale pour l'observation et la cartographie de la végétation peuvent être résumés de façon relativement simple. Les spécialistes de la végétation s'intéressent essentiellement à deux ou trois bandes spectrales dont sont équipés les principaux capteurs satellitaires. La bande visible rouge (VIS), dans les longueurs d'onde de 0,6 à 0,7  $\mu\text{m}$  environ, est intéressante car elle inclut les longueurs d'onde du rayonnement photosynthétiquement actif : elle correspond à la zone de forte absorption par les pigments photosynthétiques des plantes. Dans la bande proche infrarouge (PIR), de 0,7 à 1  $\mu\text{m}$  environ, on observe un minimum d'absorption des radiations par les végétaux, mais un maximum de réflexion due aux propriétés anatomiques des feuilles, notamment aux cuticules et aux discontinuités des mésophylles. De plus, au delà de 1,4  $\mu\text{m}$ , le comportement spectral des végétaux est fonction de leur teneur en eau. Un végétal en bon état sanitaire présente de fortes diminutions de sa réflectance autour de 1,45  $\mu\text{m}$  et de 1,9  $\mu\text{m}$ . Au contraire, un stress hydrique provoque une atténuation de ces bandes d'absorption.

L'allure des courbes de réflexion et d'absorption du spectre lumineux par les végétaux, présentée dans la figure 2, est toujours la même. On observe cependant des variations en fonction des paramètres suivants. Des individus d'espèces différentes présentent des réponses spectrales différentes. *A fortiori* il faut distinguer les comportements spectraux de peuplements monospécifiques et plurispécifiques. La télédétection doit donc permettre de différencier des couverts végétaux selon leur composition spécifique, c'est-à-dire sur des critères floristiques. De plus, des feuilles isolées, des feuillages ou des ensembles d'individus, simples ou en mosaïque, n'ont pas le même comportement spectral. La configuration géométrique du couvert, par exemple l'orientation des feuilles, le pourcentage de couverture du sol (que l'on assimile souvent abusivement à l'indice de surface foliaire), la structure et la hauteur des végétaux, ont une influence sur les réponses spectrales. Un second critère de différenciation des couverts végétaux sera donc la physionomie des peuplements observés. Enfin, au cours de leur développement, les végétaux présentent des caractéristiques foliaires et de photosynthèse différentes, notamment en relation avec les variations saisonnières du climat. La phénologie des végétaux est donc aussi un facteur de variation du comportement spectral.

La cartographie de la végétation repose donc sur l'étude des variations spatiales et temporelles des réponses radiométriques des végétaux, comme l'illustrent les figures 3a et 3b.

### **2.2.2. Quelques avantages de l'utilisation de la télédétection satellitaire**

Les avantages de l'utilisation de la télédétection satellitaire sont en fait communs à tous ses usages dans les domaines de la cartographie.

La possibilité de visualiser et de traiter des surfaces importantes est très intéressante. Cette vue synoptique est notamment un avantage pour établir des cartographies nationales, régionales ou même globales, c'est-à-dire à l'échelle de la planète.

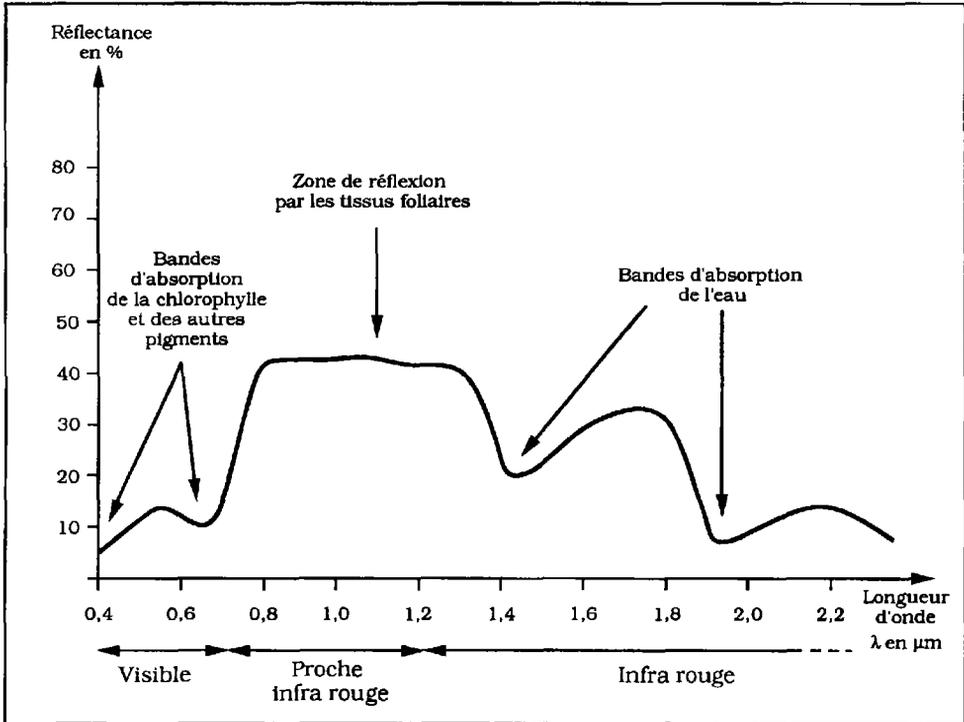


Figure 2. Courbe théorique de réflectance de la végétation verte

De plus, la rapidité d'acquisition et de traitement des données d'origine satellitaire diminue les délais de réalisation des cartes et augmente donc leur validité temporelle. L'acquisition régulière de données radiométriques permet de répéter les procédures de traitements et de cartographie avec des fréquences assez élevées. Ceci s'avère indispensable pour le suivi de l'évolution des surfaces, par exemple lors d'une évaluation de la déforestation. Cette cartographie périodique et comparative est d'autant plus performante que les données sont sous forme numérique et intégrables dans une base de données de type système d'information géographique.

Enfin, le coût de la cartographie est diminué. L'évaluation du coût d'une méthode de cartographie est complexe et doit tenir compte des paramètres suivants. Le coût d'acquisition des données est celui des photographies aériennes, des données radiométriques satellitaires ou des produits dérivés. Le coût de traitement des données concerne l'interprétation visuelle et les traitements numériques, dont la réalisation sera plus ou moins difficile selon les régions concernées, en fonction de la topographie, des types de végétation, etc. Dans le cas de l'utilisation de données de télédétection spatiale, vient s'ajouter à ce coût l'amortissement des matériels de visualisation et informatiques de traitement des données. Le coût des enquêtes de terrain est aussi très important. De cette connaissance de terrain dépend l'exactitude de l'interprétation des photographies et des données satellitaires. Enfin, il faut tenir compte du coût de la restitution cartographique et des produits imprimés.

Le tableau I, proposé par BLASCO (1990), établit la comparaison des coûts de cartographies forestières pour deux méthodes, l'une faisant appel à des photographies aériennes et l'autre à des données de type HRV de SPOT. Il semble probable que le coût par  $\text{km}^2$  est de 50% inférieur lorsque les études de la végétation sont menées à partir de données satellitaires à haute résolution.

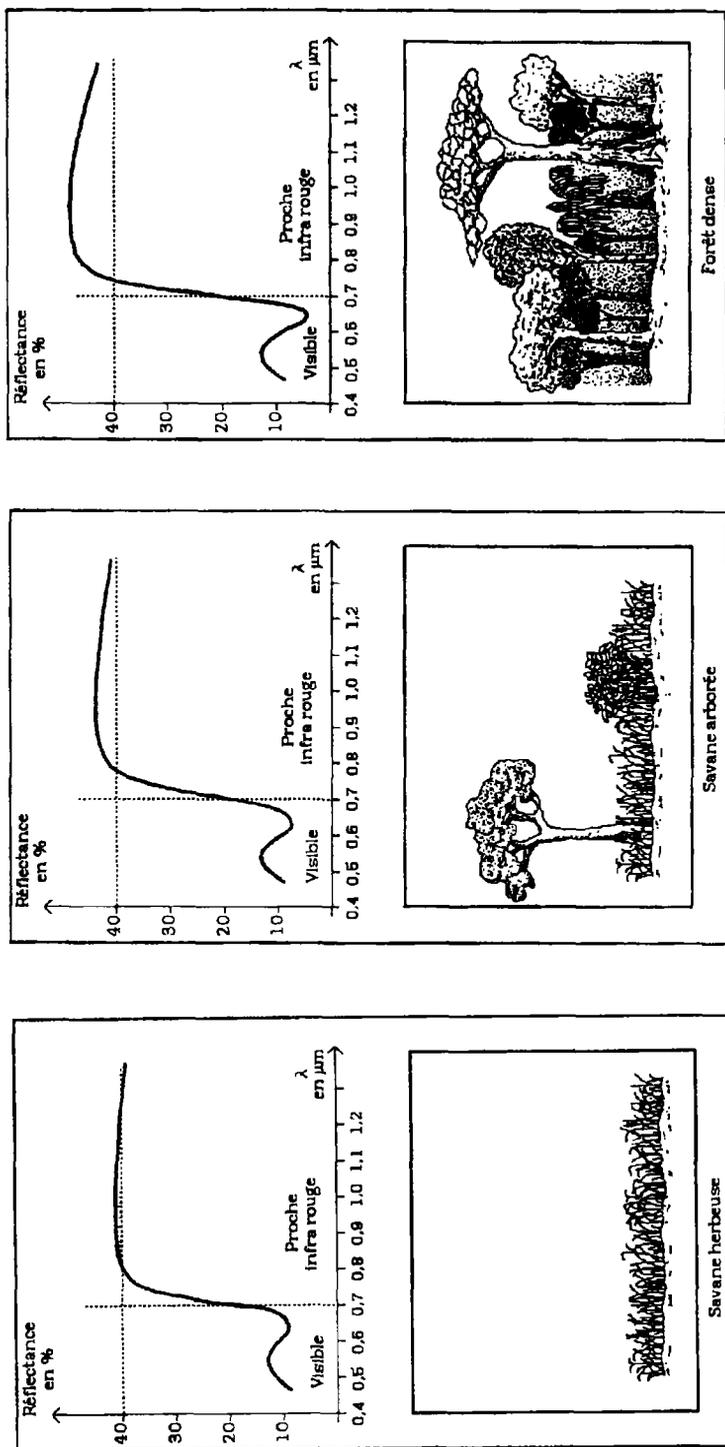


Figure 3a. Exemples d'utilisation des variations des réponses radiométriques pour la discrimination des couverts végétaux

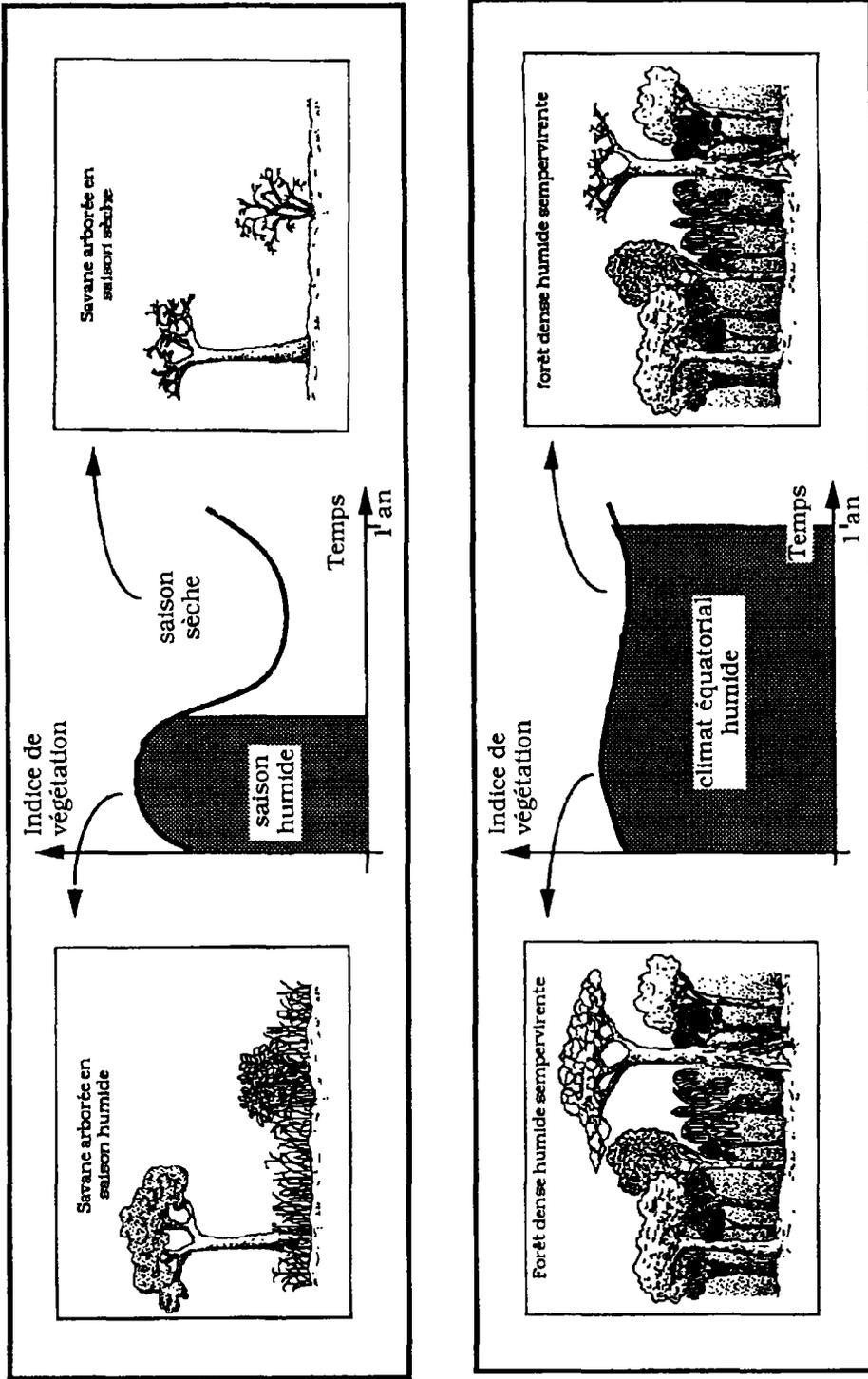


Figure 3b. Exemples d'utilisation des variations temporelles des réponses radiométriques pour la discrimination des couverts végétaux

**Tableau I.** Synthèse comparative des coûts de cartographie forestière à partir de photographies aériennes et de données satellitaires (BLASCO, 1990)

Coût		Photographies aériennes 3600 km <sup>2</sup>			Télédétection satellitaire SPOT XS 3600 km <sup>2</sup>		
1.	Données	18 missions photo 1:100 000 : 13 500 \$US Traitement : 1 100 \$US Impression :			Film papier : 366 \$US CCT : 1 950 \$US		
		Total : 14 600 \$US 4,05 \$US/km <sup>2</sup>			Total : 2 316 \$US 0,64 \$US/km <sup>2</sup>		
		Durée (jours)	Coût par unité de temps	Coût total par km <sup>2</sup>	Durée (jours)	Coût par unité de temps	Coût total par km <sup>2</sup>
2.	Traitement numérique				5	400	0,56
3	Enquêtes de terrain	10	360	1	10	360	1
4.	Interprétation visuelle	15	140	0,58	10	140	0,39
5.	Produits	15	100	0,42	15	100	0,42
	Statistiques	5	100	0,14	5	100	0,14
	Sous total (2 à 5)	45	700	2,14	45	100	2,51
	TOTAL (1 à 5)			6,19			3,15

En ce qui concerne des cartographies à petite échelle, les problèmes se posent différemment en raison de la nécessité de disposer de méthodes et d'instrument autorisant une perception globale. Leur fiabilité fait actuellement l'objet d'études approfondies.

### 3. Notion d'échelles et discrimination des classes de végétation

#### 3.1. Notion d'échelles spatiales

La télédétection satellitaire possède des limites comme tout moyen mis à disposition des spécialistes pour réaliser des cartes.

Ces limites sont principalement dues aux caractéristiques des données satellitaires et donc des capteurs qui les fournissent. Ainsi chaque type de capteur satellitaire peut être utilisé de façon optimisée pour un certain type de cartes, et notamment pour une certaine échelle de représentation.

En cartographie, la notion d'échelle spatiale est très importante. Voici comment MALINGREAU et BELWARD (1991) analysent cette question en tant que spécialistes de la télédétection.

L'échelle spatiale intrinsèque est celle du processus écologique ayant lieu au sol, dont on se préoccupe. Elle dépend de la taille des individus impliqués dans le phénomène dont on observe la traduction radiométrique.

L'échelle spatiale de mesure de ce phénomène est fonction des instruments. En télédétection spatiale, il s'agit de la résolution géométrique, c'est-à-dire de la taille de la surface au sol d'où dérivent les mesures faites par le capteur.

Enfin, l'échelle géographique est l'échelle de la restitution cartographique. C'est donc le ratio entre les distances sur la carte et les distances sur le terrain.

La non-concordance des échelles intrinsèque et de mesure peut être une source de confusion lors de l'interprétation des données satellitaires. Ce que détectent les capteurs

satellitaires, à une échelle de mesure donnée, peut être relié au paramètre ou au processus écologique étudié, à une échelle intrinsèque différente. La question est de savoir comment les critères radiométriques utilisés en télédétection spatiale traduisent les différents critères de classification utilisés habituellement (critères floristiques, physionomiques, phénologiques, de fonctionnement, etc.).

Le développement de nouveaux concepts peut alors s'avérer nécessaire. De plus, il est judicieux d'examiner les relations entre les différentes échelles de manière statique mais aussi dans leurs évolutions temporelles. Pour résumer ce point très complexe mais fondamental, la difficulté majeure, non résolue à ce jour, est de savoir comment on passe d'une mesure physique, spatiale, à la perception d'un phénomène.

### **3.2. Niveau de perception et discrimination permise : principes**

L'adéquation, ou la non-adéquation, entre l'échelle intrinsèque et l'échelle de mesure détermine donc un niveau de perception de la végétation, que l'on pourrait qualifier «d'échelle limitante».

Selon les critères d'observation et de classification retenus pour la cartographie, on pourra alors distinguer plus ou moins de classes de végétation, en fonction des caractéristiques des données satellitaires utilisées.

Dans le cas de traitement de données satellitaires, les résultats de la cartographie vont aussi dépendre de la performance des outils mathématiques et informatiques utilisés. Par exemple, l'interprétation visuelle de l'image tient compte de la texture et de la structure des «objets radiométriques». Mais ces analyses de texture et de structure sont encore difficilement réalisables par des traitements automatisés des images (reconnaissance des formes)

## **4. Grands types de cartographies végétales et outils satellitaires associés**

### **4.1. Cartographie à petite échelle**

La cartographie à petite échelle, c'est-à-dire inférieure au 1:5 000 000 ou au 1:1 000 000, vise à étudier des zones biogéographiques ou des grands biomes. Il s'agit de cartes établies à des échelles régionales, continentales, voire globales. Du fait de ces dimensions, les capteurs les plus adaptés à ces cartographies sont les capteurs à grand champ, qui permettent de couvrir la surface étudiée avec un nombre limité de scènes (tab. II).

Le radiomètre AVHRR (Advanced very high resolution radiometer) de la NOAA (National oceanic and atmospheric administration) fournit ainsi des données journalières sur tout le globe, avec une résolution de 1,1 km (données HRPT - High resolution picture transmission - et LAC - Local area coverage -) ou 4 km (données GAC - Global area coverage) au nadir. Ses caractéristiques sont présentées sur le tableau II. À une telle échelle de mesure, on ne peut évidemment détecter que des phénomènes concernant un ensemble important de végétaux : un pixel de 1,1 km de côté représente au sol une surface de 121 hectares! Un pixel AVHRR est donc la résultante d'une intégration complexe de données élémentaires sur le terrain.

L'interprétation et le traitement des données AVHRR à une seule date montrent des résultats assez limités. Les discriminations entre classes de végétation peuvent être améliorées avec un suivi temporel des réponses radiométriques ou d'indices calculés tels que le NDVI (Normalised difference vegetation index, ou indice de végétation différentiel normalisé).

**Tableau II.** Caractéristiques des principaux capteurs satellitaires, échelles et niveaux de perception associés

Instrument Satellite (altitude)	Canal	Bande spectrale	Résolution	Répétitivité Champ	Perception Échelle	Discrimination
AVHRR NOAA (860 km)	1	0,58 à 0,68 $\mu\text{m}$	HRPT, LAC : 1 km GAC : 4 km GVI : 15 km	Quotidienne 3000 km par 3000 km	Globale et régionale De 1:1 000 000 à 1:10 000 000	Forêt/non forêt Phénologie
	2	0,725 à 1,1 $\mu\text{m}$				
	3	3,55 à 3,95 $\mu\text{m}$				
	4	10,5 à 11,3 $\mu\text{m}$				
	5	11,5 à 12,5 $\mu\text{m}$				
MSS Landsat (915 km)	4	0,45 à 0,6 $\mu\text{m}$	56 m par 79 m	18 jours 180 km par 180 km	Nationale De 1.200 000 à 1·1 000 000	Phénologie Physionomie
	5	0,56 à 0,7 $\mu\text{m}$				
	6	0,67 à 0,8 $\mu\text{m}$				
	7	0,78 à 1,1 $\mu\text{m}$				
TM Landsat (705 km)	1	0,45 à 0,52 $\mu\text{m}$	30 m par 30 m	16 jours 180 km par 180 km	Locale De 1·50 000 à 1:200 000	Phénologie Physionomie Physiographie Groupe floristique dominant
	2	0,53 à 0,61 $\mu\text{m}$				
	3	0,62 à 0,69 $\mu\text{m}$				
	4	0,78 à 0,91 $\mu\text{m}$				
	5	1,57 à 1,78 $\mu\text{m}$				
	6	2,10 à 2,35 $\mu\text{m}$				
	6	10,4 à 12,6 $\mu\text{m}$	120 m par 120 m			
HRV SPOT (833 km)	1	0,500 à 0,590 $\mu\text{m}$	20 m par 20 m	26 jours 60 km par 60 km		
	2	0,615 à 0,680 $\mu\text{m}$				
	3	0,790 à 0,890 $\mu\text{m}$				
	P	0,510 à 0,730 $\mu\text{m}$	10 m par 10 m			

Ainsi, on peut citer les travaux de TUCKER *et al.* (1985a) et de TOWSHEND et JUSTICE (1986) sur l'Afrique et les travaux de TOWSHEND *et al.* (1987) sur l'Amérique du Sud, qui permettent de distinguer une dizaine de classes de végétation sur chaque continent. GOWARD *et al.* (1987) ont aussi utilisé ces données pour comparer les végétations d'Amérique du Nord et d'Amérique du Sud.

La description des profils temporels d'indices de végétation a été reprise récemment par VIOVY (1990) sur des données GVI (Global vegetation index, à 15 km de résolution au sol) de 1983 à 1988, sur l'Afrique de l'Ouest. L'utilisation de l'intelligence artificielle et de la modélisation de l'évolution *a priori* des couverts végétaux (modèles de Markov décrivant trois états - repos, croissance et sénescence - et les transitions possibles) a permis à l'auteur de distinguer sept classes de savanes.

L'instrument AVHRR de NOAA, bien qu'initialement destiné à la météorologie, a donc trouvé des applications en cartographie végétale, à des échelles petites, dans lesquelles les classifications se limitent le plus souvent à la discrimination de grands biomes. Il est possible, grâce à la répétitivité de l'observation, d'acquérir des informations phénologiques sur ces biomes relativement précises.

#### 4.2. Cartographie à moyenne échelle

Elle concerne surtout l'étude des formations végétales, à une échelle nationale, soit du 1:250 000 au 1:1 000 000 environ.

C'est typiquement le cas de la série des cartes internationales du tapis végétal et des cartes écologiques du couvert végétal, au 1:1 000 000, établies par l'Institut de la carte internationale

de la végétation (I.C.I.V.) pour l'Organisation des nations unies pour l'agriculture et contre la faim dans le monde (F.A.O., 1989). On peut aussi citer différentes cartes réalisées par SCET-International ou le CIRAD, dans le cadre d'études de potentialités forestières ou de pâturages - Guinée Bissau (SCET-INTERNATIONAL, 1978), Sénégal (SCET-INTERNATIONAL *et al.*, 1979), Djibouti (CIRAD-IEMVT, 1987), Mali (SCET-INTERNATIONAL *et al.*, 1988), Guinée (SCET-AGRI *et al.*, 1989), etc. Ces cartes ont été établies à partir de données satellitaires du capteur MSS (Multispectral scanning system) dont les caractéristiques figurent sur le tableau II.

En ce qui concerne la cartographie forestière, alors que les données satellitaires AVHRR ne permettent de distinguer que la végétation forestière de ce qui n'en est pas, les données MSS conduisent à la différenciation de plusieurs types de forêts selon leur physionomie, essentiellement sur des critères de densité.

L'exemple de la cartographie de la F.A.O. (1980) sur le Bénin, le Togo et le Cameroun est intéressant par la démarche employée. Cette méthode a aussi été décrite sur des travaux de cartographie en Asie (F.A.O., 1989). L'interprétation visuelle d'images Landsat a permis d'identifier moins de dix classes de végétation sur les critères physionomiques précédemment cités. Les cartes finales présentent cependant une trentaine de classes de végétation. Elles ont été conçues à l'aide d'une stratification écologique de la zone d'étude (BALTAË, 1980) : en considérant de manière interactive la distribution de ces classes identifiables à partir des images satellitaires et celle des principaux facteurs du milieu (topographie, climat, sol). Ces cartes sont donc des cartes écologiques de la végétation, au sens où l'entendait GAUSSEN (JANODET, 1990).

Avec l'étude de l'évolution temporelle de ces données radiométriques MSS, on peut aussi caractériser des composantes d'un couvert (strates herbacées, arbustives et arborées) si leur phénologie est contrastée (GIRARD et GIRARD, 1989). On allie donc dans ce type de cartographie des critères de discrimination phénologiques et physionomiques.

#### **4.3. Cartographie locale**

À une échelle de cartographie plus grande, par exemple entre 1:50 000 et 1:100 000, on peut s'intéresser à l'étude des étages et séries de végétation, qui fait appel à des notions de floristique. L'étage de végétation correspond à une unité de végétation caractérisée par des espèces dominantes, installées sur une certaine amplitude altitudinale. La série de végétation représente la succession de groupements végétaux, en lieu donné, depuis le sol nu jusqu'à la végétation dite climacique.

Les étages et séries de végétation pourront être distingués à partir d'évolutions phénologiques différentes, en réponses à des conditions climatiques différentes ou des compositions floristiques et des physionomies différentes. Ceci est possible sur des images TM (Thematic Mapper) et HRV (Haute Résolution Visible). Mais les observations satellitaires ne peuvent pas remplacer les données de terrain, notamment les connaissances botaniques.

À des échelles encore plus grandes, supérieures au 1:50 000, on étudie les communautés végétales. Il s'agit d'un ensemble de végétaux supérieurs structuré et généralement homogène occupant une superficie de terrain homogène dans ses conditions physiques et biologiques (DELPECH dans GIRARD et GIRARD, 1989). Du fait de la taille des objets étudiés, l'utilisation de la télédétection n'est possible qu'avec une résolution élevée et des bandes spectrales assez étroites pour permettre une distinction la plus fine possible des réponses radiométriques.

On utilise pour ce type de cartographie de la végétation les capteurs dits de «nouvelle génération», type TM et HRV. Leur résolution géométrique est de 30 à 10 m au sol (tab. II).

On conçoit donc tout d'abord qu'il devient possible, avec de telles données, de distinguer des formations végétales de structures particulières. Par exemple, on peut différencier des plantations de jeunes hévéa, en ligne, des surfaces de forêt secondaire (JANODET, 1989), ou bien encore des figures «étroites» telles que des formations ripicoles ou des zones forestières morcelées. En milieu soudanien, le décalage phénologique entre ligneux et herbacés conduit à cartographier différentes classes de savanes (LAVENU *et al.*, 1988).

De plus, le suivi du comportement spectral au cours du temps permet de caractériser des unités de végétation dominées par une ou plusieurs espèces (GIRARD et GIRARD, 1989). Mais ici encore, la reconnaissance des espèces ne peut se faire que par la connaissance du terrain.

## 5. Vers un nouveau type de cartographie

De plus en plus, les cartes de végétation sont établies avec des objectifs précis, tels que le suivi de la déforestation, des potentialités pastorales, etc.

La télédétection apporte alors la possibilité d'effectuer des révisions périodiques de l'état des surfaces. Ainsi, la F.A.O. développe actuellement une méthodologie d'évaluation de la déforestation à partir des données MSS, TM et HRV, intégrées dans un système géographique d'information (F.A.O., 1991).

De plus, on établit maintenant des cartes de production végétale, à petite ou moyenne échelle à partir de données AVHRR (TUCKER *et al.*, 1983, 1985b et 1986) ou à échelle locale (DE WISPELAERE *et al.*, 1988). C'est une première étape dans l'utilisation de l'information radiométrique dans la réalisation de cartes selon une nouvelle typologie de classification, prenant en compte par exemple la productivité primaire brute.

Demain sans doute, on pourra cartographier des éléments essentiels du fonctionnement de la biosphère continentale. On s'éloigne donc de la vision classique de la végétation selon des critères phénologiques, physiologiques et floristiques. En effet, la télédétection spatiale est peut-être mieux adaptée à la perception de processus globaux qui gouvernent notre environnement.

## 6. Conclusion et perspectives

Des progrès considérables ont été réalisés dans l'utilisation de la télédétection spatiale pour la cartographie de la végétation, surtout avec les capteurs dits «de nouvelle génération», à haute résolution géométrique. Cependant, on n'a pas encore exploité toutes les possibilités offertes par les données satellitaires. De vastes domaines de recherche restent à explorer, que ce soit pour améliorer les données mêmes (prétraitements et corrections) ou pour développer leurs utilisations, face à de nouvelles exigences scientifiques.

Un premier effort doit porter sur la compréhension et l'interprétation de la donnée radiométrique pour l'étude de la végétation. Notamment à petite échelle, on a besoin de développer de nouveaux concepts permettant d'appréhender des phénomènes écologiques à des dimensions éloignées de celles de l'écophysiologie classique. Dans le contexte actuel des

préoccupations globales, il serait bon de définir de nouvelles typologies végétales, mieux adaptées aux usages qu'on en fait dans des domaines comme la climatologie. Par exemple, les calculs de flux gazeux entre la biosphère et l'atmosphère nécessiteraient des cartes dont le système de classification rend compte des productions et des consommations de CO<sub>2</sub> (dioxyde de carbone) par les peuplements végétaux, plutôt que de leur floristique.

D'autre part, on ne connaît pas encore toutes les performances des données satellitaires disponibles. Pour les données à petite échelle en particulier, on peut citer le cas des données AVHRR. Les travaux réalisés jusqu'à présent avaient négligé les canaux thermiques du capteur. Or ces canaux semblent permettre une meilleure discrimination des différents types de forêts (LAPORTE, 1990; ACHARD, 1989; ACHARD and BLASCO, 1990).

On n'a pas parlé ici de la télédétection dans le domaine des micro-ondes passives et actives (ERS-1 a été lancé le 17 juillet 1991). Ces domaines sont pourtant importants, en particulier du fait que les brumes et les nuages ne les affectent pas, et pour étudier la composante verticale de la végétation, grâce au pouvoir de pénétration de certaines longueurs d'onde.

Enfin, comme dans tout domaine utilisant la télédétection spatiale, les progrès réalisés dans les traitements de l'image seront aussi fondamentaux : en ce qui concerne les corrections des données (notamment vis à vis des perturbations atmosphériques), mais aussi sur les traitements eux-mêmes (reconnaissance des formes, analyse de la texture des images, analyse de séries temporelles, etc.).

Mais actuellement, la télédétection spatiale reste souvent, dans le domaine de la cartographie de la végétation, un moyen d'extrapoler sur de grandes surfaces une connaissance de terrain localisée dans l'espace, ou d'orienter les recherches à effectuer au sol, au même titre que les anciennes photographies aériennes. L'utilisation de la donnée radiométrique même n'en est qu'à ses débuts.

## **7. Références**

- ACHARD, F. 1989. Étude des rythmes saisonniers de la végétation en Afrique de l'Ouest par télédétection spatiale. Thèse de doctorat, Université Paul-Sabatier, Toulouse, 243 p.
- ACHARD, F. and BLASCO, F. 1990. Analysis of vegetation seasonal evolution and mapping of forest cover in West Africa with the use of NOAA AVHRR HRPT data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 56, n° 10, p. 1359-1365.
- BALTAXE, B. 1980. The application of Landsat data to tropical forest surveys. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 120 p.
- BLASCO, F. 1990. Guidelines on use of Landsat and SPOT for land use and forest change. Provisional version, F.A.O., Rome, 63 p.
- CIRAD - IEMVT 1987. La végétation et les potentialités pastorales de la République de Djibouti. Maisons-Alfort, 1:250 000.
- F.A.O. 1980. Global environment monitoring system, pilot project on tropical forest cover monitoring. Benin-Cameroon-Togo, project implementation : methodology, results, conclusion. Rome, 99 p.
- F.A.O. 1989. Classification and mapping of vegetation types in tropical Asia. Rome, 169 p.
- F.A.O. 1991. Procedure for interpretation and compilation of high resolution satellite data for assessment of forest cover state and change. Rome, 33 p.
- GAUSSEN, H. 1957. Les cartes de végétation. Bulletin de la Société d'histoire naturelle de Toulouse, tome I, fascicule 2, Institut français de Pondichéry, p. 51-76.

- GIRARD, M. C. et GIRARD C. M. 1989. Télédétection appliquée, zones tempérées et intertropicales. Collection Sciences agronomiques, Editions Masson, Paris, 260 p.
- GOWARD, S. N., DYE, D., KERBER, A. and KALB, V. 1987. Comparison of north and south american biomes from AVHRR observation. Geocarto International, vol. 1, p. 27-39.
- JANODET, E. 1989. Télédétection et cultures industrielles : choix de site de plantation. École nationale du génie rural des eaux et des forêts (Paris), Société GEOSYS, Toulouse, 32 p.
- JANODET, E. 1990. Comparaison de deux cartes écologiques de la végétation du Cameroun. Centenaire Henri Gaussen, Toulouse, 3-7 juin 1991, Université Paul-Sabatier.
- KÜCHLER, A. W., 1967. Vegetation mapping. Ronald Press Company, New-York, 472 p.
- KÜCHLER, A. W. and ZONNEVELD, I. S. (ed.) 1988. Vegetation mapping. Handbook of vegetation science, Lieth (ed.), vol. 10, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 635 p.
- LAPORTE, N. 1990. Étude de l'évolution spatio-temporelle de la végétation tropicale : utilisation de données satellitaires NOAA AVHRR sur l'Afrique de l'Ouest. Thèse de doctorat, Université Paul-Sabatier, Toulouse, 231 p.
- LAVENU, F., BLASCO, F., PODAIRE, A., DESCHAMPS, P. Y., et ANOH, J. C. 1988. Études des formations de savanes dans la zone soudanienne, le secteur nord ouest du parc de la Comoe, Côte d'Ivoire. SPOT 1 : Utilisation des images, bilan, résultats, Centre national d'études spatiales, CEPADUES Éditions, Toulouse, p. 429-445.
- MALINGREAU, J. P. and BELWARD, A. S. 1991. Scale considerations in vegetation monitoring using AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*.
- SCET-AGRI, BDPA et CENTRE TECHNIQUE FORESTIER TROPICAL / CIRAD 1989. Potentialités et possibilités de relance de l'activité forestière. Synthèse régionale et nationale - République de Guinée. Paris, carte au 1:700 000.
- SCET-INTERNATIONAL 1978. Mapa da ocupação dos solos, Republica da Guinée Bissau. Paris, carte au 1:200 000.
- SCET-INTERNATIONAL et CENTRE TECHNIQUE FORESTIER TROPICAL / CIRAD 1979. Couverture végétale et formations forestières, Sénégal. Paris, carte au 1:500 000.
- SCET-INTERNATIONAL, DIRECTION DES EAUX ET FORÊTS DU MALI et CENTRE TECHNIQUE FORESTIER TROPICAL / CIRAD 1988. Cartes des formations végétales - Mali, feuilles des cercles de Kati et de Kolokani (province de Koulikoro) et des cercles de Koutiala et Yorosso (province de Sikasso). Paris, carte au 1:200 000.
- TOWSHEND, J. R. G. and JUSTICE, C. O. 1986. Analysis of the dynamics of african vegetation using normalized difference vegetation index. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 7, n° 11, p. 1435-1445.
- TOWSHEND, J. R. G., JUSTICE, C. O. and KALB, V. 1987. Characterization and classification of south american land cover types using satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 8, n° 8, p. 1189-1207.
- TUCKER, C. J., VANPRAET, C. L., BOERWINKEL, E. and GASTON, A. 1983. Satellite remote sensing of total dry matter production in the Senegalese Sahel. *Remote Sensing of Environment*, vol. 13, p. 369-375.
- TUCKER, C. J., TOWSHEND, J. R. G. and GOFF, T. E. 1985a. African land cover classification using satellite data. *Science*, vol. 227, n° 4685, p. 369-375.
- TUCKER, C. J., VANPRAET, C. L., SHARMAN, M. J. and VAN ITTERSUM, G. 1985b. Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the Senegalese Sahel : 1980-1984. *Remote Sensing of Environment*, vol. 17, p. 223-249.
- TUCKER, C. J., JUSTICE, C. O. and PRINCE, S. D. 1986. Monitoring the grassland of the Sahel 1984-1985. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 7, n° 11, p. 1571-1581.

- VIOVY, N. 1990. Étude spatiale de la biosphère terrestre : intégration de modèles écologiques et de mesures de télédétection. Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, 213 p.
- DE WISPELAERE, G., PEYRE DE FABREGUES, B. et GACHET, R. 1988. Évaluation de la biomasse herbacée en zone sahélienne dans la région du sud Tamesna (Niger) : «Perspectives et limites d'utilisation des données SPOT». SPOT 1 : Utilisation des images, bilan, résultats, Centre national d'études spatiales, CEPADUES Éditions, Toulouse, p. 139-151.



# 21

## **Suivi par télédétection spatiale d'une forêt dense tropicale humide soumise à des pressions agricoles**

KOUAKOU ÉDOUARD N'GUESSAN

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

### **Résumé**

Dans cette étude, nous avons déterminé et cartographié, à l'aide de l'imagerie satellitaire, les types d'occupation agricole clandestine à l'intérieur de la réserve forestière du Haut-Sassandra dans le centre-ouest de la Côte d'Ivoire. Nous avons ainsi pu caractériser l'évolution des formations forestières naturelles en l'espace de deux années grâce à des données multibandes HRV de SPOT (K45 J336) datant du 26-12-1986 et du 23-12-1988. Ces données ont été analysées visuellement et par traitement numérique, puis complétées par plusieurs missions de vérification et validation sur le terrain. Notre démarche méthodologique a consisté dans une première phase à établir une carte de la forêt classée du Haut-Sassandra à ces deux époques par photo-interprétation des compositions colorées classiques et améliorées réalisées à partir des canaux XS3, XS2 et XS1 après étalement de la dynamique et seuillage. Cette première étape a permis de choisir des sites-tests assez représentatifs des différentes unités thématiques d'occupation de sol dans la forêt et ses environs. Ces sites-tests ont été visités sur le terrain, leur végétation a été notée et 97 enclaves agricoles ont été déterminées. Une enquête socio-économique et démographique a été également menée dans toutes les enclaves agricoles à l'intérieur de la forêt et aux environs auprès des chefs d'exploitations et des populations riveraines. Toutes ces informations recueillies sur le terrain ont permis de corriger les résultats de l'interprétation visuelle et surtout d'effectuer une classification automatique supervisée de 12 classes représentant les types de végétation et d'utilisation du sol. Ceci a permis de réaliser des cartes au 1:100 000 et 1:50 000 de la forêt classée du Haut-Sassandra et surtout de mettre

en évidence l'évolution de la dégradation de la couverture forestière et des occupations agricoles clandestines de plus en plus croissantes à l'intérieur de cette forêt.

## 1. Introduction

La Terre dispose d'une couverture forestière d'environ 4,5 milliards d'hectares correspondant à peu près au tiers de la surface des terres émergées. Dans cet ensemble, les forêts tropicales couvrent environ 2 milliards d'hectares dont 16% (350 millions) sont localisés en Afrique. Ces forêts tropicales sont en nette diminution. La régression des forêts tropicales et plus particulièrement celle de la forêt dense d'Afrique de l'Ouest constitue aujourd'hui une préoccupation majeure. La disparition progressive de ce massif côtier Ouest africain est devenue d'ores et déjà une réalité incontestable. La Côte d'Ivoire n'a pas échappé à ce phénomène (LANLY, 1969). Ainsi, l'on se rappelle qu'elle possédait à la fin du siècle dernier la plus belle forêt de la région avec une superficie de l'ordre de 15 millions d'hectares. Aujourd'hui, les estimations les plus optimistes donnent une superficie de 2,6 millions d'hectares d'une forêt très fractionnée par l'agriculture itinérante et appauvrie par une exploitation très sélective du bois.

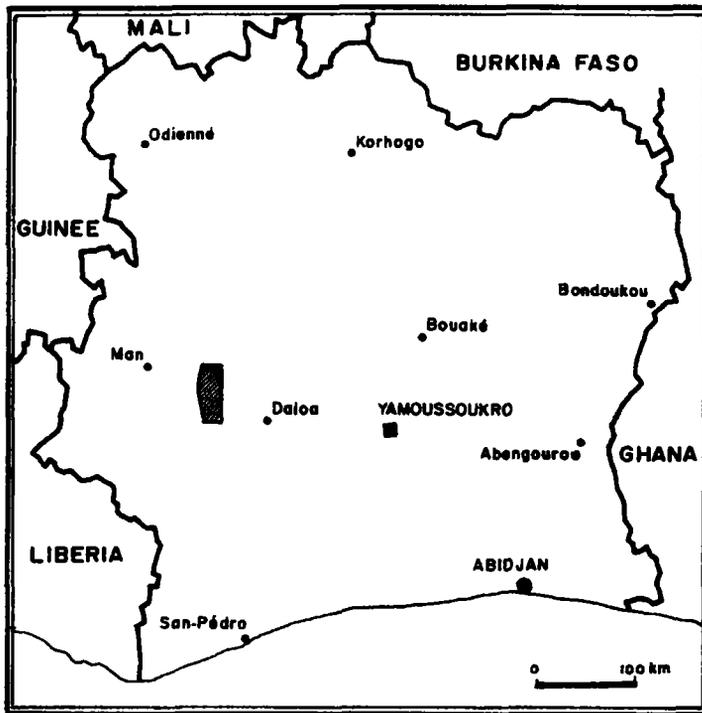
Face à cette situation, un certain nombre d'actions prioritaires ont été préconisées dans le cadre de la réhabilitation du patrimoine forestier ivoirien. Il s'agit de l'identification, de la redéfinition et du suivi par télédétection des forêts classées, de l'aménagement naturel des forêts naturelles et de l'espace rural dans les zones où les massifs forestiers sont menacés. C'est dans cette optique prioritaire d'aménagement des forêts naturelles du projet sectoriel, qui prévoit la redélimitation de 1 500 000 ha de forêts classées, qu'a été entreprise l'étude de la forêt du Haut-Sassandra.

Il s'agit, dans une première phase, à l'aide de l'imagerie satellitaire, de repérer, cartographier et analyser les limites actuelles de la forêt, les strates forestières ou types de formations végétales de même que les incursions agricoles les plus importantes. Il s'agit ensuite de préciser et d'évaluer l'ampleur exacte des incursions agricoles en forêt à partir d'enquêtes socio-économiques à l'intérieur et en périphérie de la forêt.

## 2. Le cadre de l'étude

La forêt classée du Haut-Sassandra est située par 7° de latitude nord et 7° de longitude ouest, dans la région centre-ouest du pays. Ce massif forestier délimité et classé en novembre 1974 couvrait à cette période une superficie de 102 400 hectares. Sa limite ouest est caractérisée par le fleuve Sassandra, à l'est par un tracé artificiel parallèle à la piste de Zoukougbeu-Daniafla, au nord et au sud par des tracés artificiels perpendiculaires au Sassandra (fig. 1).

Du point de vue morphologique, elle s'étend sur un glacis pénéplané encadré à l'ouest par le fleuve Sassandra et à l'est par la rivière Bolo. Ce massif se situe dans une région où le climat est une forme de transition entre le climat équatorial à quatre saisons et le climat tropical à deux saisons. La durée de la saison sèche est de 5-6 mois de novembre à mars ou avril. La pluviométrie annuelle varie entre 1 250 et 1 550 mm avec un déficit hydrique cumulé de 400 mm par an. Du point de vue de la végétation, ce massif forestier appartient au secteur mésophile du domaine guinéen caractérisé par la forêt dense semi-décidue à *Celtis spp* et *Triplochiton scleroxylon* (ADJANOHOUN et GUILLAUMET, 1971). Les formations



 **Forêt classée du Haut Sassandra**

**Figure 1.** Carte de situation de la forêt classée du Haut Sassandra

végétales sont généralement pluristratifiées avec une strate supérieure composée d'arbres de hauteur supérieure à 30 m, une strate moyenne d'arbres mesurant entre 10 et 30 m; une strate inférieure d'arbres de moins de 10 m. On rencontre parfois une formation dégradée à deux strates, la strate supérieure ayant disparu, ou une formation de recrû forestier à une seule strate.

### **3. Matériel et méthode**

#### **3.1. Matériel**

Nous avons utilisé, pour réaliser cette étude, deux types de données. Le premier type de données est constitué par des données satellitaires.

Ce sont des images à haute résolution HRV de SPOT et TM de Landsat : HRV 45-336 du 26 décembre 1986 et du 26 décembre 1988 couvrant les deux tiers inférieurs de la forêt classée; HRV 45-335 du 23 décembre 1986 et du 23 décembre 1988 couvrant le tiers supérieur de la forêt; ainsi qu'un quart d'image TM 197/55 Q3 du 4 décembre 1986 couvrant la totalité de la forêt.

Ces données satellitaires sont sous forme de rubans magnétiques et de tirage papier de compositions colorées classiques des images HRV niveau 1B (XS3 en rouge, XS2 en vert, XS1 en bleu) et TM4, TM7, TM3 pour TM.

Le deuxième type de données est constitué de données de terrain recueillies à partir des observations sur les principaux types de formations végétales et essences forestières du 01 au 10 février 1988 et du 22 mai au 22 juin 1988 ainsi que des enquêtes socio-économiques réalisées dans les enclaves agricoles à l'intérieur et à la périphérie de la forêt.

Enfin, nous disposons également de cartes thématiques de cette forêt élaborées à la suite des survols aériens effectués en 1986 par la SODEFOR (Société de développement de la forêt) et des cartes topographiques de l'IGCI (Institut géographique de Côte d'Ivoire) de 1971.

### **3.2. Méthode**

La démarche méthodologique utilisée dans cette étude est la même que celle de nos travaux précédents (N'GUESSAN, 1988, 1990). Elle comprend le traitement et l'analyse des images satellitaires (HRV et TM) de même que les missions de contrôle sur le terrain et les enquêtes socio-économiques de l'activité agricole en périphérie et à l'intérieur du massif forestier classé. Les différentes étapes suivantes ont été effectuées :

- interprétation visuelle des compositions colorées standard ou améliorées;
- mission de contrôle dans la forêt classée;
- traitement numérique automatique;
- enquêtes socio-économiques.

La phase d'interprétation visuelle a consisté à analyser par photo-interprétation tous les tirages photographiques des compositions colorées des images HRV du 26 décembre 1986 et du 23 décembre 1988 ainsi que de l'image TM du 4 décembre 1986 afin d'identifier et de caractériser les principales unités de végétation et d'occupation de la forêt classée du Haut-Sassandra.

Cette phase a permis d'élaborer une carte de la forêt avec les différents types de formations végétales plus ou moins conservées, les cultures, les zones dégradées, les parcs à bois et sols nus.

La phase de contrôle terrain effectuée lors des missions d'observations dans la forêt a permis de vérifier et de noter plusieurs points-tests représentant toutes les unités thématiques présentes dans le massif forestier.

Ensuite, une classification automatique supervisée par la méthode barycentrique a été effectuée.

Enfin, les enquêtes démographiques et socio-économiques ont été réalisées auprès des paysans installés dans la forêt et ceux situés à sa périphérie.

Toutes les exploitations agricoles enclavées dans la forêt classée et limitrophes de celle-ci étaient donc concernées par ces enquêtes.

Ainsi, à l'intérieur de la forêt classée, l'étude a combiné une enquête auprès des chefs d'exploitation sur un questionnaire bien adapté et le relevé topographique des parcelles cultivées. On a enquêté auprès de 97 chefs d'exploitation; les contrôles effectués ont montré que l'exhaustivité a été bien respectée. Par contre, en zones limitrophes de la zone classée, l'enquête s'est appuyée sur les seules déclarations des chefs d'exploitation; les données portant sur ces superficies dans ces cas peuvent comporter de grandes imprécisions. On a recensé 456 chefs d'exploitation. La zone enquêtée est une bande bordant la limite de la forêt, dont la largeur comprise entre 0,5 et 1,5 km, varie selon la proximité des campements par rapport à la forêt classée et selon la configuration du tracé de la limite.

## **4. Résultats et discussions**

### **4.1. Interprétation des images satellitaires**

L'interprétation des compositions colorées et des classifications réalisées à partir des images datant de 1986 et 1988 permet de noter les types de formations forestières et la dégradation de ceux-ci au profit des enclaves agricoles localisées dans la forêt.

La validation de l'interprétation des compositions colorées améliorées de l'image de 1986, effectuée grâce à l'observation des différents types physiologiques lors des contrôles de vérités-terrain sur les sites-tests, a permis d'élaborer un document cartographique de la forêt du Haut-Sassandra dans laquelle ont été discriminés la forêt dense à canopée fermée et à canopée ouverte, les mosaïques forêt-cultures, les défrichements agricoles et les plantations forestières industrielles de *Terminalia ivoriensis* et *Terminalia superba* et de *Pinus sp.* Déjà à cette époque (1986), les résultats montrent l'existence des infiltrations des paysans clandestins dans le sud de la forêt autour du village V12 très fortement cultivé aujourd'hui et dans le nord, aux environs de la scierie de la société d'exploitation forestière SIFCI (Société industrielle forestière de Côte d'Ivoire).

Les images HRV de 1988 ont servi à faire une classification supervisée automatique par la méthode barycentrique. Pour cela, plusieurs sites-tests représentant toutes les unités thématiques ont été choisis et vérifiés. Ces sites-tests ont été les parcelles d'entraînement assez homogènes pour appliquer la classification. L'évaluation de la classification par la matrice de confusion donne 95% de pixels bien classés sur les parcelles d'entraînement.

La carte simplifiée d'occupation des sols élaborée à partir des traitements appliqués à ces images correspond à la figure 2.

Le tableau I indique les surfaces des types d'occupations du sol dans la forêt classée d'après les images de 1988.

Cette répartition montre que, dans la forêt classée du Haut-Sassandra, la forêt physiologiquement «intacte» (la forêt à canopée fermée) ne représente que 43% de la surface, concentrée dans la moitié nord du massif; la forêt affichant des signes structuraux de surexploitation (forêt à canopée ouverte et forêt dégradée) couvre plus de 30% de la surface, surtout dans la moitié sud du massif. On doit noter aussi que la forêt sur sols hydromorphes occupe une proportion importante (21%) de la surface, surtout au nord du massif. Enfin, les incursions agricoles sont en nette progression par rapport à la situation de 1986 et sont presque exclusivement concentrées dans l'enclave sud-ouest (2 700 ha sur les 3 450 ha relevés). Les incursions agricoles de la partie moyenne de la forêt sont récentes et en pleine extension.

### **4.2. Les enquêtes démographiques et socio-économiques dans les enclaves agricoles de la forêt**

À partir des résultats fournis sur l'occupation des sols dans la forêt classée, les enquêtes réalisées dans chaque exploitation agricole incluse ou limitrophe de la forêt avaient pour objet de recenser précisément les exploitations enclavées, de décrire la dynamique de l'occupation agricole et d'identifier des zones de repli pour l'activité agricole. Cela est d'autant plus important que la connaissance des occupations à l'intérieur de la forêt classée est en effet un préalable à toute opération d'aménagement sylvicole. Le recensement a eu un volet démographique par le dénombrement des résidents permanents et temporaires et un volet foncier par la mesure des superficies cultivées, transcrit sous forme cartographique (plan de terroir des enclaves agricoles au 1:10 000).

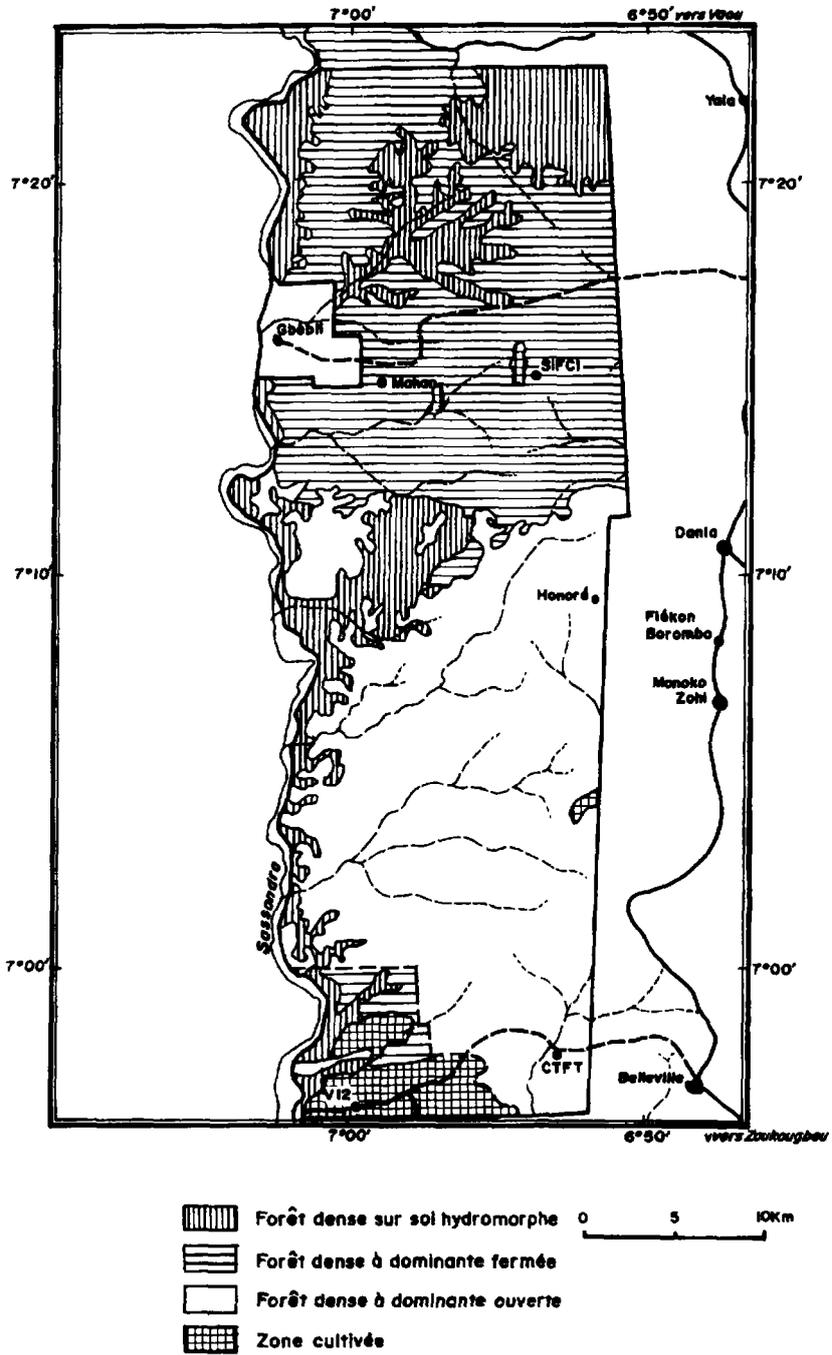


Figure 2. Carte simplifiée d'occupation des sols de la forêt du Haut-Sassandra

**Tableau I.** Répartition des surfaces en hectares des types d'occupation du sol dans la forêt classée d'après les images de 1988

Type de peuplement	Forêt sans enclave		Enclave du sud-ouest		Forêt avec enclave	
	ha	%	ha	%	ha	%
Forêt à canopée fermée	43 977	46	602	9	44 579	43
Forêt à canopée ouverte	28 412	30	1 558	22	29 970	29
Forêt dégradée	1 671	2	228	3	1 899	2
Forêt sur sol hydromorphe	20 528	21	1 307	18	21 835	21
Mosaïque forêt-culture	94	<1	2 542	36	2 636	3
Mosaïque culture-forêt	133	<1	671	10	804	1
Culture	14	<1	89	1	103	0
Reboisement	396	<1	18	<1	414	0
Sols nus, inselbergs	688	1	0	0	688	1
Villages, campements	45	<1	85	1	130	0
Total	95 958	93	7 100	7	103 058	100

Au niveau démographique, la pression autour de la forêt classée a été estimée à partir de la population des 456 exploitations limitrophes recensées dans les zones enquêtées.

L'étroitesse des zones enquêtées (0,5 à 1,5 km de large) et la fréquente dissociation des plantations et des lieux d'habitation rendent délicate l'évaluation d'une densité de population. Cependant, les résultats obtenus (tab. II) sont suffisamment homogènes entre eux et concordants avec les données issues des derniers recensements démographiques dans la région pour pouvoir être considérés comme satisfaisants.

Cette enquête montre que la densité de la population en périphérie immédiate de la forêt est de 31 habitants par kilomètre carré.

Au niveau des enclaves agricoles à l'intérieur des limites de la forêt classée, l'étude s'est faite en deux étapes. Dans un premier temps, l'interprétation des images satellitaires a permis de localiser :

- les portions de limites non respectées;
- les zones cultivées à l'intérieur de la forêt;
- les infrastructures et les campements, à l'intérieur et en périphérie de la forêt.

Dans un deuxième temps, une enquête socio-économique dans les sites repérés par télédétection a permis de préciser et d'évaluer les caractéristiques des incursions agricoles. À l'intérieur de la forêt, une enquête exhaustive auprès de tous les chefs d'exploitation a permis, avec un relevé topographique de toutes les parcelles cultivées, de connaître avec précision la situation des incursions à la date de l'enquête.

Les résultats obtenus sont présentés au tableau III.

L'analyse de ces données montre qu'en dehors de la grande enclave du sud-ouest de la forêt :

- les incursions agricoles à l'intérieur du territoire classé représentent une surface de 391 ha;
- ces incursions, qui ont débuté de façon significative en 1978, se sont surtout développées depuis 1984 et continuent de s'étendre à un rythme accéléré;
- les nouvelles installations se situent actuellement en pleine forêt (entre Gbeubli et Pelezi), avec le risque important de voir la forêt coupée en deux tènements séparés par une zone cultivée, alors que les incursions les plus anciennes se cantonnaient aux bordures de la forêt.

**Tableau II.** Résultats des enquêtes dans les villages limitrophes de la forêt

Zone (villages de rattachement)	Superficie en km <sup>2</sup>	Nombre d'exploitations recensées	Population	Densité en h/km <sup>2</sup>
Nord (Vaou, Diafla)	21	87	715	34
Nord-est (Yala, Pelezi, Bohinou)	18	54	531	30
Sud-est (Dania, Fiokon, Monoko, Belleville, Gnime)	26	80	836	32
Sud (V12)	34	170	926	27
Ouest (Gbeuli)	14	65	421	30
Total périphérie	113	456	3429	31

**Tableau III.** Résultats des enquêtes dans les enclaves agricoles à l'intérieur de la forêt;

\* = exploitations dont le siège est à l'extérieur de la forêt, mais dont les terres sont à l'intérieur de la forêt

Campement	Pop. totale	Nombre d'expl.	Cacao en ha	Café en ha	Vivrier en ha	Total en ha
SIFCI	145	33	67,7	0,12	23,15	90,97
Trouvougbeu	186	34	47,6	11,60	18,16	77,36
Mahan Robert	31	5	15,6	1,32	1,45	18,37
Taya	31	5	21,0	12,00	2,50	35,50
Honoré	13	1	6,9			6,90
Amani-Kouadiokro	95	8	97,0		2,90	99,90
Djarabana		(6)*	59,0			59,00
CTFT	16	2				2,56
Total	517	88	314,8	25,04	50,72	390,16
			81%	6%	13%	100%

Dans la grande enclave du sud-ouest de la forêt, on peut distinguer deux zones différentes :

- au sud, la zone (une bande de 1500 à 2000 m de large au sud-ouest de la forêt, jusqu'à la vallée de la lobo à l'est) est presque complètement cultivée, sauf l'extrémité orientale où la forêt est bien conservée;

- au nord, une vaste zone est en cours de colonisation : sur la cartographie du couvert végétal réalisée à partir des images satellitaires de 1986, cette zone apparaît peu cultivée, sauf dans son extrémité méridionale.

À l'extérieur de la forêt classée du Haut-Sassandra, les résultats du sondage effectué tout le long des limites du territoire classé au cours de l'enquête socio-économique confirment les données obtenues par interprétation des images satellitaires : le territoire est fortement cultivé (en général plus de 75% de la surface), laissant peu de terrain disponible pour de nouvelles installations.

En conclusion, sur les incursions agricoles en forêt classée du Haut-Sassandra, on peut retenir que :

- les limites de la forêt ont été relativement bien respectées, sauf aux endroits où le bornage était défectueux (Amanikouadiokro et enclave sud-ouest),
- les incursions agricoles peuvent se répartir en trois catégories :
  - deux enclaves limitrophes relativement étendues, compactes, anciennes et stables à Amanikouadiokro et dans la zone attribuée aux émigrants de Buyo;
  - des enclaves internes, moyennes, diffuses, relativement récentes et en pleine extension;
  - une vaste zone limitrophe, compacte, récemment colonisée au sud-ouest de la forêt.

## **5. Conclusion**

Dans cette étude, l'utilisation des données satellitaires multidates a permis de montrer la progression des incursions agricoles et la dégradation des strates forestières dans la réserve forestière du Haut-Sassandra en l'espace de deux ans. L'imagerie satellitaire permet de repérer et cartographier les limites récentes du massif et les enclaves agricoles les plus importantes de même que les principales strates forestières.

Les enquêtes de terrain ont permis de préciser et d'évaluer l'ampleur exacte des incursions agricoles en forêt et d'apprécier les capacités d'accueil des paysans en périphérie de la forêt.

Cela est important pour l'aménagement de cette forêt. En localisant les portions de limites non respectées et les zones cultivées à l'intérieur, l'analyse des images satellitaires a permis de bien mener des études d'enquêtes socio-économiques dans la forêt et sa périphérie et de mettre en évidence les pressions agricoles sur cette réserve forestière.

## **6. Références**

- ADJANOHOON, E. et GUILLAUMET, J. L. 1971. La végétation *in* Avenard, J. M. *et al.* Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoires ORSTOM, n° 50, p. 157-262.
- LANLY, J. P. 1969. Régression de la forêt dense en Côte d'Ivoire. Bois et forêt des tropiques, Nogents-sur-Marnes, n° 127, p. 45-59.
- N'GUESSAN, E. 1988. Cartographie des forêts classées par télédétection. Carte de la forêt du Haut-Sassandra. *in* Proceedings of the 22th International Symposium on Remote Sensing of Environment, ERIM, p. 445-465.
- N'GUESSAN, E. 1990. Étude de l'évolution de la végétation du «V Baoulé» contact forêt/savane en Côte d'Ivoire. *in* Lafrance, P. et Dubois, J.-M. M. (réd.) Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse. Journées scientifiques de Thiès, 21-24 novembre 1989, Éditions AUPELF et John Libbey Eurotext, Paris, p. 181-196.



## 22

# **Cartographie d'une forêt spécifique à partir de données satellitaires TM de Landsat et HRV de SPOT : la forêt alluviale de la Robertsau**

CHRISTIANE WEBER\*, JACKY HIRSCH\* et AZIZ SERRADJ\*\*

*\*URA 902 CNRS / Groupement scientifique de téledétection spatiale, 12, rue Goethe, 67000 Strasbourg, France; téléphone : (33) 88-35-82-31; télécopieur : (33) 88-35-84-46*

*\*\*COSTEL, Université de Haute-Bretagne (Rennes II), 6, avenue Gaston-Berger, 35043 Rennes cedex, France; téléphone : (33) 99-33-51-24; télécopieur : (33) 99-33-51-75*

### **Résumé**

Cette étude a été faite avec le concours de l'Office national des forêts, sur un espace particulier : la forêt de la Robertsau (Strasbourg). À l'aide de plusieurs images satellitaires, nous avons tenté d'analyser les caractéristiques de ce milieu forestier. Les résultats satisfaisants concernant la discrimination des essences forestières, obtenus grâce à l'intégration de plusieurs images : TM de Landsat (juillet 1984), HRV de SPOT multibande (juin 1986) et panchromatique (septembre 1986), permettent d'envisager la poursuite de l'étude à une échelle plus grande par la constitution d'un système d'information dédié aux préoccupations forestières à la fois des administrations et des diverses instances locales qui en ont la charge.

### **1. Introduction**

L'Alsace depuis quelques années tente de protéger au mieux une des particularités de son territoire, la forêt rhénane (COLLECTIF, 1977; LERAT, 1990). La protection de ce patrimoine forestier décidée par le Comité interministériel d'aménagement du territoire (CIAT) du 23

février 1976, a été concrétisée par un plan de protection des forêts rhénanes qui a été adopté au travers du schéma régional d'orientation et d'aménagement de l'Alsace en 1977. L'établissement de documents administratifs procède du grand intérêt écologique de ces forêts et de la concurrence entre les différentes formes d'occupation du sol (en particulier l'implantation de zones industrielles portuaires). Entre 1977 et 1990 de nombreux travaux ont été réalisés pour assurer une meilleure connaissance de la densité forestière et des caractéristiques écologiques du milieu. L'introduction des images satellitaires au niveau du suivi de la démarche fournit un apport considérable aux actions de préservation du milieu.

## **2. Présentation du milieu**

Les caractéristiques de la forêt rhénane sont bien entendu liées aux comportements du Rhin, ou en tout cas l'étaient jusqu'à la canalisation du fleuve. Il y a plus d'un siècle le Rhin s'étalait en bras anastomosés sur plusieurs kilomètres de largeur isolant des îles d'importance diverse au couvert végétal humide. Au cours des années, cet écosystème renfermant des richesses exceptionnelles en faune et en flore provenant de régions multiples (Europe centrale, Méditerranée, Alpes, etc.) s'est appauvri.

Les actions anthropiques avec notamment les travaux de correction et de régularisation du XIX<sup>e</sup> siècle ont entraîné un abaissement de la nappe phréatique au sud de l'Alsace (la plus importante d'Europe), un accroissement des dépôts de limons lors des inondations au nord, ainsi qu'un isolement des forêts extérieures à la digue des hautes eaux. La canalisation du fleuve en 1950, la création d'usines hydroélectriques et de barrages, la prolifération d'implantations industrielles et l'extension des agglomérations ont conduit à une disparition progressive du patrimoine forestier.

Seuls 6 800 ha subsistent sur les 15 000 ha de 1930. Ces témoins résiduels doivent être protégés d'une disparition totale, d'autant plus que l'évolution actuelle est fortement induite par les actions que l'homme continue de perpétrer (défrichements, assèchement progressif du milieu, artificialisation des forêts par introduction d'espèces plus productives, etc.).

La forêt urbaine de la Robertsau, n'est qu'une faible partie de l'ensemble de la forêt rhénane (329 ha) cependant, en plus d'un intérêt écologique et scientifique important, elle constitue un milieu récréatif et un atout primordial au cadre de vie des Strasbourgeois.

La sauvegarde des forêts alluviales depuis 1976 passe par un classement qui a pour but le maintien de l'état boisé par une réglementation interdisant tous les défrichements, fouilles, dépôts, etc. contrôlant la circulation et le stationnement ainsi que le renforcement du caractère rhénan par une gestion adaptée du milieu naturel. Ce classement par décret des forêts concerne actuellement 1800 ha afin que soient conservées les spécificités écologiques, biologiques et physiques du milieu.

## **3. Objectifs de l'étude**

Cette analyse a pour but la caractérisation du milieu forestier ello-rhénan, connu pour la richesse écologique et l'hétérogénéité de ses essences, par l'utilisation de données satellitaires multicapteurs et multitudes.

Une évaluation des capacités des différents capteurs a été tentée en fonction de deux critères : d'une part, le choix d'un même enchaînement méthodologique; d'autre part l'étude

de la stabilité des résultats obtenus, notamment au travers de la conservation des sites de «vérités terrains». L'intégration des données panchromatiques aux données multibandes nous a permis d'améliorer la résolution spatiale, et d'obtenir une meilleure appréciation visuelle des éléments de structure. La confrontation avec les sites de reconnaissance sur le terrain et les avis des forestiers nous a permis de valider pas à pas les résultats de cette analyse.

#### **4. Présentation du matériel**

Le matériel utilisé est :

- images : TM de Landsat (juillet 1984), HRV de SPOT multibandes (juin 1986) et panchromatique (septembre 1986);
- cartes : feuille du parcellaire 1:20 000, report de localisation des séries de rajeunissement 1:5 000;
- photographies aériennes infrarouge couleur; mission «Inventaire forestier national» de juin 1986;
- relevé de terrain, mission 1987 pour la ville de Strasbourg sur le parcellaire forestier de l'Office national des forêts;
- relevé de terrain et travaux de classification d'un étudiant de l'École nationale du génie rural des eaux et forêts (Direction départementale de l'agriculture).

#### **5. Présentation du corpus méthodologique**

Ainsi qu'il a été signalé, nous avons délibérément choisi d'opérer de la même façon sur les différentes images, afin de pouvoir évaluer les apports de l'image HRV et de l'image TM.

Pour assurer la comparabilité des données radiométriques, nous avons dû bien entendu ramener les données TM à la résolution spatiale de HRV panchromatique.

Cette opération peut être effectuée selon deux méthodes : multiplication de pixels et interpolation. La multiplication de pixels a l'avantage de préserver le caractère radiométrique intact mais présente l'inconvénient d'altérer la résolution spatiale. En revanche, selon le type d'interpolation utilisé, les valeurs radiométriques peuvent être légèrement ou fortement modifiées avec une résolution spatiale nettement meilleure que celle obtenue avec le zoom.

Nous avons choisi l'interpolation bicubique. Cette fonction d'échantillonnage, qui utilise une approximation bicubique des 16 voisins les plus proches du pixel concerné (fig. 1), permet d'améliorer la précision en modélisant l'image localement par une surface polynomiale. Cette interpolation affecte très légèrement les hautes fréquences de l'image initiale.

Après cette étape de mise en homogénéité spatiale des données, une correction géométrique de l'image TM sur celle de HRV panchromatique a été effectuée.

Afin d'utiliser la complémentarité des données TM (haute résolution spectrale) et panchromatique (haute résolution spatiale), nous avons procédé à l'intégration des données en nous inspirant des travaux de CHAVEZ *et al.* (1991), CLICHE et BONN (1985) et WELCH et EHLERS (1987).

Le critère d'intégration que nous avons retenu est le coefficient de corrélation entre les canaux TM et panchromatique de HRV.

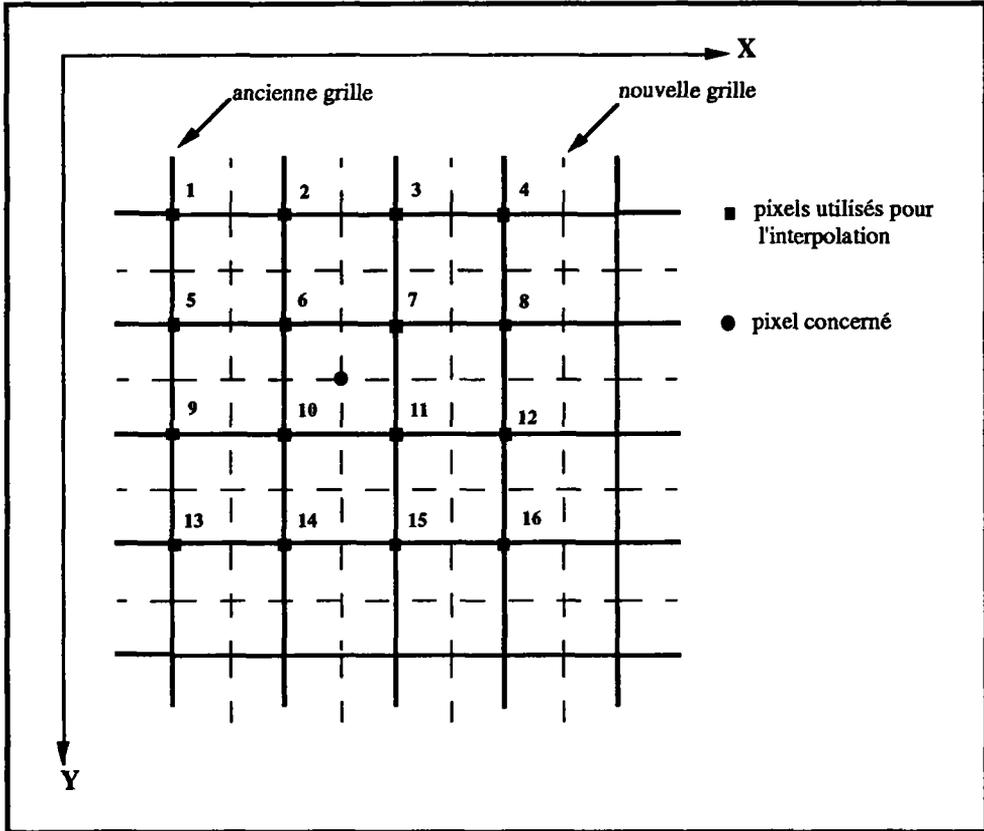


Figure 1. Surface locale d'interpolation

Ainsi, la valeur du canal panchromatique est intégrée proportionnellement à la corrélation qu'il a avec le canal TM considéré selon l'équation suivante (tab. I) :

$$PI_n(x,y) = [(TM_n(x,y) \cdot (1-Coef_n))^2 + (Pan(x,y) \cdot Coef_n)^2]^{1/2}$$

où

$PI_n$  = pixel résultant de l'intégration de  $TM_n$  et du panchromatique;

$n = 1, 2, 3, 4, 5$  et  $7$  (numéros des canaux);

$TM_n$  = valeur numérique du pixel  $(x,y)$  du canal  $n$ ;

$Coef_n$  = coefficient de corrélation du canal panchromatique avec le canal  $TM_n$ .

L'intégration du canal panchromatique de HRV n'est pas effectuée de façon systématique avec des coefficients standards (CLICHE and BONN, 1985). Elle se caractérise plutôt par un apport adapté du canal panchromatique en fonction de son coefficient de corrélation avec le canal TM concerné. Une corrélation nulle n'entraîne aucune transformation du canal TM considéré.

Tableau I. Coefficients de corrélation entre le canal panchromatique et les canaux TM originaux

Canaux	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
Coefficients de corrélation	0,40	0,50	0,51	0,01	0,32	0,47

En consultant le tableau II, on remarque que les canaux TMP (avec panchromatique intégré) ont subi une translation des distributions; les moyennes et les écarts types sont plus faibles que ceux des canaux originaux (TM). Les coefficients de variation restent relativement stables, à part pour les canaux 3 et 7 pour lesquels l'effet saisonnier entre les deux dates peut jouer fortement au niveau des réponses spectrales des zones de cultures.

**Tableau II.** Paramètres statistiques des distributions

Variable	Moyenne	Écart-type	Coefficient de variation
TM1	69,16	10,33	0,149
TMP1	42,49	5,94	0,139
TM2	28,22	6,59	0,233
TMP2	19,20	4,08	0,212
TM3	25,02	9,66	0,385
TMP3	18,18	5,08	0,279
TM4	76,58	25,65	0,334
TMP4	74,58	25,18	0,337
TM5	55,77	20,19	0,362
TMP5	38,73	12,92	0,333
TM7	19,43	10,30	0,530
TMP7	16,28	5,18	0,318

Comme nous travaillons avec des valeurs numériques et non avec des valeurs de luminance, cette translation des distributions ne perturbera pas les analyses de classification qui seront effectuées plus tard.

La réalisation de compositions colorées en cyan, magenta et jaune sur les canaux originaux (combinaisons 4, 2, 1 et 5, 2, 1) et sur les canaux avec panchromatique intégré homologues (fig. 22-2, voir cahier couleur) fait ressortir une très nette discrimination du couvert végétal forestier. On peut remarquer que les compositions colorées réalisées avec les canaux TMP accentuent cette discrimination sans doute à cause de la complémentarité des capteurs d'une part et de la diachronie d'autre part.

Cette discrimination du couvert est confirmée par les schémas discriminants obtenus, après l'analyse statistique des échantillons soumis à la classification. En effet, comme le montrent les schémas discriminants et les positions des points moyens des groupes (fig. 3 et 4), on remarque que les points moyens des groupes sont plus éloignés les uns des autres sur le schéma discriminant des données avec panchromatique intégré que sur celui des canaux originaux.

La classification de type supervisée par analyse discriminante pas à pas, nous a permis une discrimination des essences forestières. Le taux de classement fourni par la matrice de confusion est pour ces classes supérieur à 80%.

Les 35 échantillons retenus pour la classification ont été choisis par rapport à un descriptif parcellaire et une étude menée par un étudiant de l'École nationale du génie rural, des eaux et des forêts (ENGREF). Les mêmes échantillons ont été utilisés pour les deux images afin d'observer la stabilité des vérités-terrain et la transférabilité des résultats. Plusieurs problèmes ont nécessité un approfondissement du fait de la différence de dates entre TM et HRV (1984

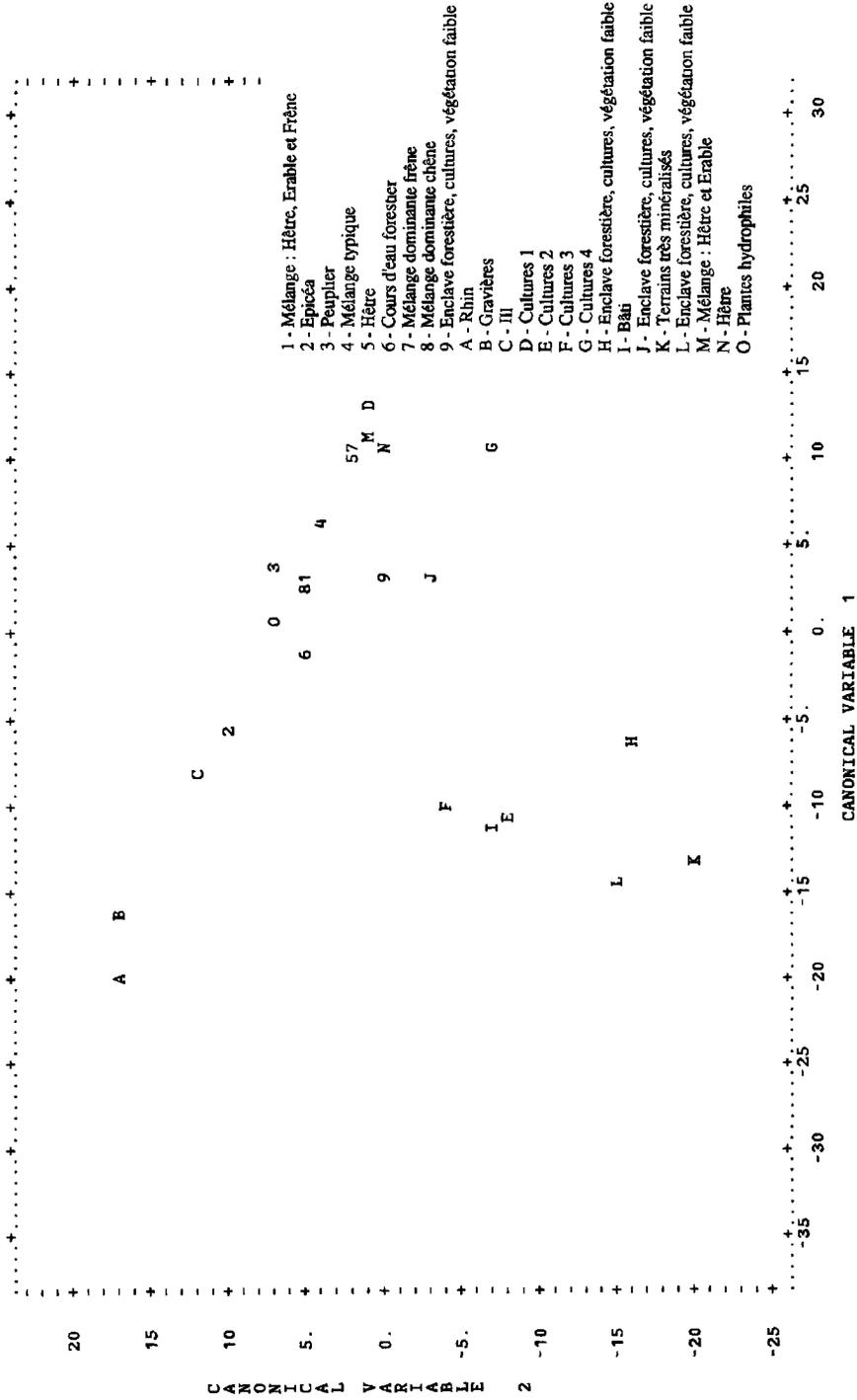


Figure 3. Schéma discriminant et position des points moyens des groupes : données TM originales

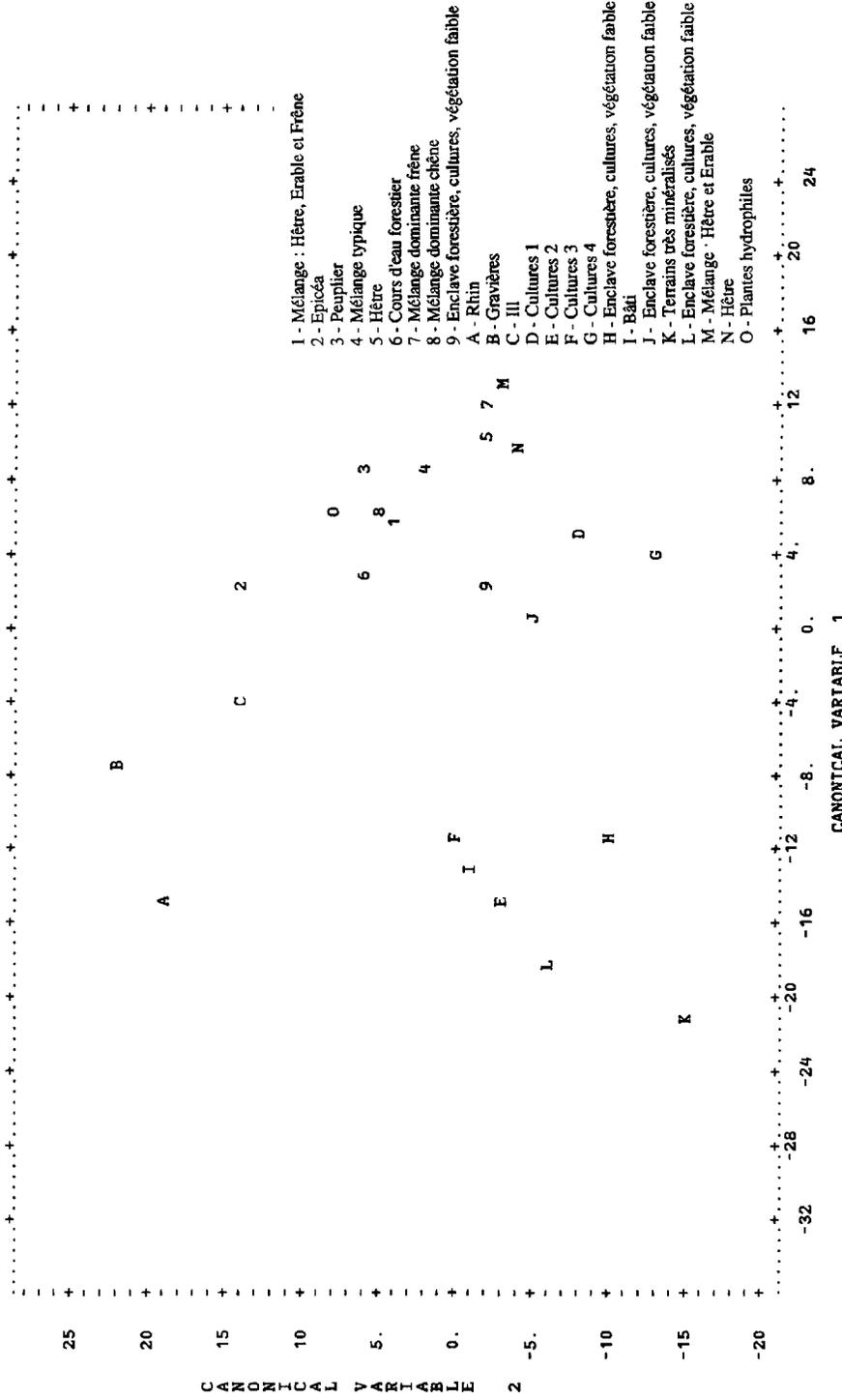


Figure 4. Schéma discriminant et position des points moyens des groupes : données TM avec HRV panchromatique intégré

et 1986) et de l'écart des états végétatifs (juin et juillet) entre les deux images. De plus, début 1986, des travaux ont démarré au nord-est de cette forêt, travaux d'irrigation par récupération d'anciens lits de divagation du Rhin et par creusement d'un nouveau lit. Cette opération avait pour but la «réhumidification» des zones dites inondables entre le Rhin et la digue des hautes eaux, afin de lutter contre l'assèchement des terres et donc le dépérissement des essences spécifiques. Ceci a bien évidemment perturbé la comparaison dans cette partie de l'espace traité.

## 6. Résultats

Étant donné la complexité du couvert forestier de la Robertsau il nous a semblé intéressant d'utiliser deux types de capteurs aux capacités différentes. Les résultats de la classification nous ont permis de caractériser 10 groupes d'essences ou de mélanges forestiers et 6 divers, que nous avons validés par la suite sur le terrain, avec l'aide des forestiers (tab. III).

**Tableau III.** Groupes thématiques retenus; le mélange typique de la forêt ello-rhénane (n° 7) se compose d'essences diverses, avec présence d'au moins trois strates arborées et arbustives, avec des lianes, de la clématite ou du tamier.

N°	Essences	Surface en ha
1	Épicéa	14,24
2	Hêtre	15,74
3	Mélange à dominante hêtre	21,13
4	Mélange à dominante hêtre et érable	14,60
5	Mélange hêtre, érable et frêne	31,73
6	Mélange à dominante frêne	47,08
7	Mélange typique	172,90
8	Mélange à dominante de chêne	62,31
9	Peuplier	16,94
10	Plantes hydrophiles	9,75
11	Cours forestiers	29,86
12	Eau : Rhin, gravières et Ill	3,86
13	Cultures diverses	10,52
14	Enclaves forestières et cultures	27,17
15	Fortes emprises minérales	2,31
16	Emprises bâties	3,45

### 6.1. L'introduction du canal panchromatique de HRV

Dans un premier temps cette intégration a permis une bonne séparation du milieu forestier par rapport au reste de l'espace analysé. La précision géométrique du canal nous a été d'une grande utilité pour discerner les aménagements forestiers, chemins ou chenaux.

Malgré le décalage temporel, ce canal a permis de mettre en évidence graphiquement des structures spatiales plus homogènes, notamment par l'élimination d'un grand nombre de pixels isolés. Un autre apport de ce canal réside dans la diminution des pixels de mélange liés aux phénomènes de bordure (brusques changements de radiométrie).

## **6.2. Bandes spectrales de HRV ou TM, voire les deux?**

Dans les deux cas, les indices de végétation (simple et normalisé) expliquent relativement bien les structures spatiales que l'on retrouve dans les résultats des classifications.

Les capacités spectrales de TM permettent l'individualisation d'un plus grand nombre d'essences que ne le font les canaux HRV. Ceci est confirmé par la plus grande variabilité de l'indice de végétation sur l'image TM.

Une première différenciation entre les types de boisements est discernable de manière fine : en effet les boisements de type futaie naturelle, par leur effet granuleux, se démarquent très nettement sur les compositions colorées des parcelles plantées (perchis essentiellement) qui elles apparaissent lisses. Cette distinction caractérise bien une différence de structure du boisement et se retrouve sur les deux types de capteurs, avec même une plus grande netteté sur HRV. En revanche TM permet une différenciation d'un plus grand nombre d'essences ou de mélanges d'essences caractéristiques au sein de l'ensemble des futaies naturelles; c'est le cas des hêtres par exemple, qui de par la taille du houppier ne permet pas ou peu de strates de sous-bois.

## **6.3. La complémentarité des deux images**

Pour bénéficier de cette complémentarité, nous avons utilisé tous les canaux (six canaux de TM et trois de HRV) avec le panchromatique intégré dans une analyse de classification supervisée. Hormis les problèmes liés à la diachronie dans la partie NE de la zone analysée, cette opération n'a pas entraîné de perturbation, la séparabilité du couvert forestier a été augmentée. La sensibilité plus grande aux phénomènes structuraux et géométriques de HRV a facilité la mise en évidence des cours d'eau forestiers malgré leur taux de recouvrement.

La validation des résultats par nos partenaires forestiers, a été faite par vérification sur le terrain des classes obtenues. Les résultats ont été considérés comme satisfaisants à 80%. Étant donné la spécificité du milieu et sa très forte variabilité spatiale, il était difficile de créer un échantillonnage de confrontation (témoins de référence).

Afin que ces premiers résultats puissent être utilisés dans une pratique quotidienne, des évaluations de surfaces par essences forestières et parcelles de gestion ont été produites, après intégration de la base cartographique des parcelles forestières (tab. III).

## **7. Conclusion**

Dans une forêt aussi riche en essences végétales où les parcelles homogènes sont de petite taille, il nous a semblé intéressant d'utiliser la plus fine résolution spectrale possible. En égard du choix des vérités-terrain disponibles (peu de surfaces «pures») et des groupes à discriminer les résultats peuvent être considérés comme satisfaisants. Les spécificités de cette forêt ello-rhénane ont pu être individualisées suffisamment pour que des opérations de calcul de surface et de cartographie puissent être envisagées de manière efficace pour les spécialistes du terrain.

Des collaborations plus formelles devraient pouvoir être concrétisées par la mise en place d'un système d'information géographique. Cette approche devrait être étendue à d'autres zones forestières de la forêt rhénane.

## 8. Références

- CHAVEZ, P. S. Jr., SIDES, S. C. and ANDERSON, J. A. 1991. Comparison of Three Different Methods to Merge Multiresolution and Multispectral Data : Landsat TM and SPOT Panchromatic. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 57, n° 3, p. 295-303.
- CLICHE, C. and BONN, F. 1985. Integration of SPOT Panchromatic Channel into Its Multispectral Mode for Image Sharpness Enhancement. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 51, n° 3, p. 313-316.
- COLLECTIF 1977. Rapport des actes administratifs de la Région Alsace, Présentation du Plan de protection de la forêt rhénane. Région Alsace, 2<sup>e</sup> trimestre, n° 10
- LERAT, F. 1990. La politique de protection des espaces naturels en France. *in* Protection et gestion des milieux naturels et forestiers, Colloque européen, Strasbourg, Éditeur SNICEF, Nîmes, p. 20-26.
- WELCH, R. and EHLERS, M. 1987. Merging Multiresolution SPOT HRV and Landsat TM data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 53, n° 3, p. 301-303.