

# 1

## **Rythmes saisonniers de la végétation en Afrique de l'Ouest par téledétection spatiale**

FRÉDÉRIC ACHARD\* ET FRANÇOIS BLASCO\*\*

*\*École nationale du génie rural, des eaux et des forêts, Ministère de l'agriculture*

*\*\*Centre national de la recherche scientifique et Université Paul-Sabatier*

*Adresse commune : 39, allées Jules-Guesde, 31062 Toulouse cedex, France, téléphone : 61-53-02-35, télex : UNIPSAB 521 880 F*

### **Résumé**

Nous commençons par décrire les problèmes de déforestation dans deux pays : la Côte d'Ivoire et le Burkina Faso. La dégradation globale des milieux naturels a une influence directe sur les transformations climatiques planétaires.

Puis, nous avons utilisé trois images à haute résolution spatiale et un jeu d'images NOAA LAC (à 1 km de résolution, année 1986-1987) au cours de deux volets principaux :

1) délimitation et classification des différents types physiologiques : nous avons étudié très précisément trois sites-tests au contact forêt-savane à l'aide des données à haute résolution spatiale SPOT et Landsat TM;

2) étude des rythmes saisonniers des formations au contact forêt-savane : variations de l'activité chlorophyllienne et de la température de surface de la forêt dense semi-décidue, de la savane herbeuse et des cultures.

Nos conclusions suggèrent qu'il ne faut pas limiter l'utilisation des données satellitaires au seul paramètre «indice de végétation». La température de surface est un complément très utile au NDVI : ce paramètre permet, d'une part, de mieux différencier les types de végétation et apporte, d'autre part, une information supplémentaire sur l'état du couvert. Nous montrons aussi que les données fournies par le capteur AVHRR ne sont pas bien adaptées à l'approche conventionnelle de la description de la végétation dans l'état actuel de nos connaissances. Il faut développer les méthodes de cartographie de la végétation en y intégrant l'information satellitaire et progresser dans l'utilisation des données à faible résolution spatiale pour mieux comprendre les mécanismes de fonctionnement des grands ensembles forestiers tropicaux.

## **1 Introduction**

### **1.1 Objectif général et tendances d'évolution globale**

Le principal objectif de cette étude est de suivre la dynamique saisonnière des formations végétales qui forment la limite entre la forêt dense et les différents types de savane en Afrique de l'Ouest. Cet objectif est justifié par le problème général d'inventaire des ressources forestières et de suivi de la déforestation dans les pays tropicaux (Malingreau et Tucker, 1988).

En effet, la déforestation, l'élargissement des zones dénudées, des périmètres irrigués ou simplement mis en culture font partie des transformations imputables aux sociétés humaines. Personne ne connaît précisément les conséquences de ces transformations de la biosphère continentale sur les composantes physico-chimiques de l'atmosphère et sur les changements climatiques. Il s'y ajoute, bien sûr, les combustions industrielles. La connaissance objective de ces transformations que subissent les régions chaudes est cependant une nécessité.

L'accroissement sensible et incontesté de la teneur en gaz carbonique dans l'atmosphère entretient en particulier la crainte d'un relèvement progressif de la température moyenne du globe.

Cette étude reprend les derniers résultats d'une thèse où sont étudiés les changements de la couverture végétale en région tropicale au moyen de la télédétection (Achard, 1989).

### **1.2 Dénudation et déforestation en milieu tropical**

En ce qui concerne les grandes transformations intervenant à la surface du globe, cinq ont été identifiées comme essentielles au dernier colloque sur l'effet de serre (Wageningen, 14-18 août 1989) :

- accroissement de la riziculture;
- extension de la déforestation;
- extension des surfaces de savanes tropicales;
- extension de la désertification;
- réduction des zones à pergélisol.

Ces cinq types de transformations planétaires majeures devraient faire l'objet d'un contrôle continu par satellite.

Il faut donc se poser la question de savoir si les instruments spatiaux actuels sont adaptés au suivi de la dénudation des terres à l'échelle globale.

Les extensions de la déforestation, des surfaces de savanes tropicales et de la désertification sont vraisemblablement des transformations interdépendantes : il faut donc les étudier conjointement (Blasco et Achard, 1990).

Il existe aujourd'hui quelque 9 millions de km<sup>2</sup> de forêts denses humides qui jouent un rôle peu connu sur les grands équilibres de notre planète. Trois massifs sont immenses : la cuvette amazonienne (3,5 millions de km<sup>2</sup>), la cuvette congolaise (Zaire : 1 million de km<sup>2</sup>) et l'archipel de l'Asie du Sud-Est (Indonésie : 1,2 millions de km<sup>2</sup>).

On ne peut pas dire précisément quelle est l'évolution actuelle de ces surfaces forestières, même si l'on sait que la forêt indonésienne est en train de disparaître à une vitesse très élevée et qu'il en est de même dans certains états du sud du bassin amazonien au Brésil.

### **1.3 Surfaces forestières dans la zone d'étude**

Notre zone d'étude recouvre en particulier la Côte d'Ivoire et le Burkina Faso où nos laboratoires ont acquis une bonne connaissance du milieu. De plus, les problèmes écologiques, climatiques et démographiques de cette partie du monde attirent l'attention de la communauté scientifique internationale.

#### **1.3.1 En Côte d'Ivoire**

Depuis une trentaine d'années, le développement économique est axé principalement sur l'exploitation des ressources du secteur forestier (économie du bois, plantations vivrières et commerciales, plantations agro-industrielles). Pour planifier le développement économique des années 1990-2000, les décideurs ivoiriens ont besoin des informations de surfaces de forêts intactes, dégradées ou occupées par les cultures.

Alors que l'estimation du massif forestier ivoirien en 1947 était de 14,5 millions d'hectares, les inventaires de 1966 conduisent à un chiffre de 8,98 millions d'hectares. En 1974, l'actualisation des inventaires de 1966 montre que la forêt dense intacte ne représente plus que 5,4 millions d'hectares tandis que 3,58 millions d'hectares sont en forêt dégradée. Enfin, un état évaluatif des surfaces de végétation ligneuse en 1980 donne 4,46 millions d'hectares de forêt dense feuillue non dégradée et 8,4 millions d'hectares de jachères forestières (FAO, 1988).

Les surfaces de forêts denses non encore exploitées ne dépassent pas quelques centaines de milliers d'hectares; les surfaces des forêts denses déjà exploitées représentent la quasi-totalité des forêts denses productives (3,094 millions d'hectares en 1980). Mais certaines zones n'ont été que très partiellement dégradées alors que d'autres l'ont été intensivement.

Les surfaces de forêt improductive pour des raisons physiques (0,515 millions d'hectares) sont principalement constituées de forêts denses sèches à *Anogeissus*. Les parcs nationaux constituent une surface importante de forêts denses improductives (0,648 millions d'hectares) ou de formations ouvertes improductives (1,150 millions d'hectares : parc de la Comoé). Il existe aussi des forêts classées où une exploitation forestière est autorisée mais où les défrichements agricoles sont interdits. Ce «domaine forestier permanent de l'État» doit permettre de produire du bois et de garantir l'équilibre écologique. Il était composé en 1980 de 2,404 millions d'hectares en zone forestière et 1,222 millions d'hectares en zone de savane de forêts déjà classées.

Ces estimations montrent d'une part la forte régression de la forêt de Côte d'Ivoire et d'autre part l'incertitude quant à l'extension réelle des surfaces forestières concernées.

Les effets des défrichements intervenus depuis 30 ans dans la zone forestière de Côte d'Ivoire sont graves : la diminution du taux de boisement, qui pour des régions entières est descendu au-dessous de 20%, entraîne la raréfaction des ressources ligneuses ainsi que des effets écologiques irréversibles.

#### **1.3.2 Au Burkina Faso**

a) Évaluation des surfaces forestières

- Les forêts galeries couvrent des surfaces limitées (270 000 ha), soit à peine 1% du territoire ou 2% du domaine forestier qui totalise 14 millions d'hectares (Fontes, 1984).

- Les plus belles forêts claires se trouvent dans le secteur de la Comoé. La surface totale de ces forêts peut être estimée à 290 000 ha soit à peine plus de 1% du territoire.

- Les formations mixtes forestières et graminéennes qui englobent à la fois les savanes arborées, les savanes boisées, les forêts claires et les jachères qui en dérivent, occupent au total 9 400 000 hectares soit plus de 30% du territoire.

- Les formations mixtes productives, qui correspondent aux forêts «classées» (qui ne sont souvent que des savanes boisées) et aux forêts claires, couvrent 499 000 ha.

- Les formations improductives pour des raisons physiques (mauvaise conformité des ligneux) et pour des raisons légales (parcs nationaux) atteignent respectivement 3 179 000 ha et 786 000 ha.

- Les jachères forestières concernent 4 919 000 ha.

#### b) Dégradation des milieux

La végétation naturelle est agressée de toutes parts. Les causes sont d'ordre climatique, d'ordre démographique et d'ordre social. L'accroissement de la population, accéléré par l'amélioration des conditions sanitaires, engendre des besoins accrus : besoins énergétiques, besoins en terres agricoles nouvelles qui s'exercent au détriment des surfaces forestières, besoins en terre de parcours des troupeaux et en pâturages. Enfin, la pratique traditionnelle des feux amoindrit la régénération forestière.

En milieu de savane, cette dégradation se confond avec les défrichements des savanes boisées et arborées pour la mise en culture. Les surfaces qui, après l'abandon des cultures, sont de nouveau chaque année traversées par les feux évoluent vers des savanes pauvres dont les sols peuvent se «latériser» en surface.

Dans la pratique, les forêts sont très peu protégées contre les feux et les défrichements. Ceci est également vrai pour les forêts classées dont quelques rares secteurs ont été mis en défens. Ces forêts sont difficilement contrôlables de par l'éloignement des axes routiers et le manque de personnel qualifié. Les ressources naturelles ligneuses, encore importantes à l'échelle de la nation, sont mal réparties et régressent de manière sensible.

## **2 Méthode**

### **2.1 Données utilisées**

Assurer un suivi des transformations qui affectent la biosphère nécessite, pour des raisons techniques et de coût, d'avoir recours à des données de type AVHRR, celles de SPOT, de Landsat TM ou MSS n'étant pas adaptées à la connaissance des phénomènes sur de grandes surfaces. En fait, nous avons utilisé les deux types de données satellitaires :

- une série de 34 images multitemporelles NOAA AVHRR LAC (National Oceanographic and Atmospheric Administration, Advanced Very High Resolution Radiometer, Local Area Coverage) entre octobre 1986 et septembre 1987;

- trois images à haute résolution SPOT et Landsat TM qui nous ont servi comme sites-tests : SPOT 047-336 du 25/11/86, SPOT 045-336 du 26/12/86 et Landsat TM 196-53 du 01/03/87 (deux quarts d'image).

Les caractéristiques principales des deux types de données sont la haute fréquence d'acquisition (tous les 9 jours au nadir) avec une faible résolution (1,1 km par 0,8 km au nadir) pour les données AVHRR et la haute résolution spatiale (20 m ou 30 m) avec une faible fréquence (tous les 26 jours ou 16 jours) pour les données SPOT ou Landsat TM. Ces caractéristiques sont données dans le tableau I.

L'instrument AVHRR fut conçu pour des applications météorologiques, mais l'inclusion de bandes sensibles au rouge et au proche infrarouge du spectre solaire ont conduit à l'utilisation des données fournies dans un grand nombre d'études des ressources terrestres.

**Tableau I.** Caractéristiques des capteurs NOAA AVHRR, SPOT HRV et Landsat TM

Satellite	NOAA 9	SPOT 1	Landsat 5
Lancement	décembre 1984	février 1986	mars 1984
Capteur	AVHRR	HRV	TM
Résolution au sol	0,8 par 1,1 km au nadir 2,4 par 6,9 km à l'angle de visée maximal	20 par 20 m en mode multispectral	30 par 30 m
Taille d'un cadre	2 700 par 1 600 km	60 par 60 km	185 par 185 km
Numérisation	10 bits	8 bits	8 bits
Heure de passage à l'équateur	14:30 (ascendant)	10:30 (descendant)	9:45 (descendant)
Périodicité	9 jours	26 jours	16 jours
Canaux spectraux (µm)	1 : 0,58-0,68 2 : 0,725-1,1 3 : 3,55-3,93 4 : 10,3-11,3 5 : 11,5-12,5	1 : 1,50-0,59 2 : 0,61-0,68 3 : 0,79-0,89	1 : 0,45-0,52 2 : 0,52-0,60 3 : 0,63-0,69 4 : 0,76-0,90 5 : 1,55-1,75 6 : 10,40-12,50 7 : 2,08-2,35

L'intérêt des bandes rouge et proche infrarouge présentes sur les instruments AVHRR, HRV et TM, réside dans l'absorption de la première par les pigments chlorophylliens et les carotènes, et dans la sensibilité de la seconde à la structure mésophylle des feuilles. Dans la partie du spectre électromagnétique située entre 0,5 et 0,7 µm, la végétation verte absorbe fortement le rayonnement, alors qu'entre 0,7 et 1,1 µm, les épidermes foliaires ont l'effet inverse de réflexion. Les rapports entre ces deux canaux sont, théoriquement, corrélés à la part du rayonnement photosynthétiquement actif absorbé (RPAA) par le couvert végétal (Tucker et Sellers, 1986). Le plus utilisé de ces rapports est l'indice de végétation normalisé (NDVI : Normalised Derived Vegetation Index).

## 2.2 Traitement des images SPOT et Landsat TM

La première étape a consisté à identifier et à classer les différentes formations végétales sur les trois sites-tests (images haute résolution). Pour caractériser les différents types physiologiques dans les zones phytogéographiques guinéenne et soudanienne, nous avons pris en compte les stades de régression suivants : forêt dense semi-décidue, forêt sèche, forêt claire, savane boisée, savane arborée, savane arbustive, savane herbeuse et cultures (cf. tableau II, d'après Guillaumet et Adjanohoun, 1971 et UNESCO, 1973).

Les trois sites-tests, le Parc de la Marahoué et la Réserve du Haut-Sassandra en zone guinéenne de Côte d'Ivoire, les forêts de Kongouko et du Dida en zone soudanienne du Burkina Faso, ont été cartographiés à partir d'images SPOT ou Landsat TM (canaux XS1,

**Tableau II.** Description physionomique simplifiée des unités de végétation dans la zone d'étude

Code	Unités de végétation	Descriptions physionomiques simplifiées
A	Zone guinéenne	
A.1	Forêt dense humide ombrophile	dense, haute (40 m), multistrate
A.2	Forêt mesophile semi-décidue	multistrate, strate supérieure en partie décidue au cours de la saison sèche, deuxième strate toujours verte
A.3	Savane herbeuse	hautes graminées avec de rares arbres
A.4	Cultures tropicales	café, cacao, plantations de bananiers et différents types de mosaïques forêt dégradée-culture
B	Zone soudanienne	
B.1	Forêt sèche	une seule strate arborée, dense, décidue en saison sèche
B.2	Forêt claire	strate arborée ouverte, recouvrement par les ligneux d'au moins 40%, décidue en saison sèche, strate herbeuse dense
B.3	Savane boisée	recouvrement par les ligneux (hauteur : 20 m) inférieur à 40%
B.4	Savane arborée	hautes graminées avec quelques ligneux, recouvrement des arbres inférieur à 20%, parfois strate arbustive
B.5	Savane herbeuse	végétation herbacée dense (hauteur de 1 à 2 m), recouvrement arboré inférieur à 5%
B.6	Cultures pluviales	millets, sorgho, etc.

XS2 XS3 et TM2, TM3, TM4 ). Les techniques de télédétection ont été utilisées pour préparer et compléter la phase de terrain.

Une méthode de classification par maximum de vraisemblance a été appliquée séparément sur quelques fenêtres après repérage sur le terrain de parcelles d'entraînement homogènes. Après réduction des scènes par pavés 6 par 6 (120 m pour SPOT et 180 m pour TM), celles-ci sont classées en utilisant les statistiques calculées sur les fenêtres.

Cette information thématique liée à la densité de recouvrement arboré a été finalement dégradée pour obtenir une résolution de 1 km dans la même projection que les images NOAA. Pour chaque élément de grille à 1 km, la classe dominante du pixel composé a été affectée.

### 2.3 Tracé des statistiques sur des graphes bidimensionnels (rouge et proche infrarouge)

Nous avons commencé par représenter les statistiques des classes de végétation dans les canaux bruts rouge et proche infrarouge qui servent au calcul du NDVI. Les ellipses de variance ont été tracées selon trois résolutions sur chaque site-test : 30 m sur les fenêtres TM à pleine résolution et 20 m sur les fenêtres SPOT à pleine résolution ; 180 m sur la scène TM dégradée par pavés 6 par 6 et 120 m sur la scène SPOT dégradée par pavés 6 par 6; 1 km sur sur les images NOAA du 8 mars 1987 ou du 7 décembre 1986.

Chaque ellipse tracée est centrée sur les moyennes des valeurs de pixel de chaque classe dans les canaux rouge et proche infrarouge. Les diamètres des ellipses sont définis par la matrice de covariance des classes dans ces deux canaux. La surface d'une ellipse contient donc statistiquement 65% des pixels de la classe correspondante.

## **2.4 Traitement de la série d'images NOAA**

La seconde étape consiste en l'étude des variations au cours de l'année de l'activité chlorophyllienne de la phytomasse sur nos sites-tests. Trente-quatre images LAC depuis octobre 1986 jusqu'à septembre 1987 ont été calibrées radiométriquement (éclairage solaire), corrigées géométriquement et cartographiées dans une projection degré-carré (1200 points par 1000 lignes, résolution : 0,01°). L'erreur moyenne géométrique finale est d'environ 1,3 pixels sur les 2 axes pour les points d'appui.

Nous avons tracé les évolutions de l'indice de végétation normalisé (NDVI) et de la température de surface (TS), calculée par la méthode du «split window» (Deschamps et Phulpin, 1980), sur les sites-tests sélectionnés pour les principales classes de végétation (forêt dense, savane boisée, savane herbeuse, cultures).

# **3 Résultats et interprétation**

## **3.1 Classification des images SPOT et TM**

L'évaluation de la classification par maximum de vraisemblance sur la région soudanienne (quarts d'image TM) est de 81,5% de pixels bien classés sur les parcelles d'entraînement. La raison de cette valeur est qu'il est très difficile de définir des parcelles homogènes dans ces types de savanes.

Pour la zone guinéenne (images SPOT), les types de végétation naturelle étant homogènes, on obtient de bons résultats (95% de pixels bien classés sur le parc de la Marahoué).

Les caractéristiques principales du parc de la Marahoué (dimensions : 100 000 hectares) sont :

- zone de contact forêt-savane, riche et diversifiée;
- dynamisme de la société locale dans un espace en mutation rapide;
- absence d'étude importante jusqu'alors;
- faune relativement abondante dans cette partie de l'Afrique de l'Ouest.

Les menaces potentielles sur la forêt classée du Haut-Sassandra sont :

- la pression humaine au sud des «déguerpis» de Buyo qui a déjà occasionné le déclassement d'une partie de la réserve;
- le village Gbeubli au nord-ouest du massif qui constitue un point de départ des occupations clandestines;
- le campement des ouvriers d'une exploitation forestière au nord qui permet aussi des occupations clandestines.

Les principales conclusions de l'étude sur le terrain dans cette zone de contact forêt-savane portent sur la richesse floristique (gradient de diversité spécifique en forêt selon l'axe nord-sud dans le parc national de la Marahoué), et sur le grand dynamisme des systèmes de production en périphérie du parc et de la réserve forestière. Ce dynamisme est lié à l'apport démographique et au prix rémunérateur du cacao. L'importance d'une cartographie était

justifiée par l'ignorance des défrichements réalisés à l'intérieur des limites du parc et de la réserve.

On conserve pour la suite de l'étude en zone soudanienne : 611 pixels de la classe cultures, 542 pixels de savane herbeuse et 181 pixels de savane boisée, et en zone guinéenne : 699 pixels de cultures, 23 pixels de savane et (308 + 145) pixels de forêt dense (1 pixel = 120 ha).

### **3.2 Interprétation des graphiques (rouge et proche infrarouge)**

Nous prenons comme exemple, le site en zone soudanienne (superficie des deux quarts d'image TM). L'unité utilisée sur ces graphiques est l'unité de quantification (intervalle [0,255] pour TM et [0,1023] pour AVHRR). Nous ne nous préoccupons pas ici de la comparaison des réflectances entre les deux canaux considérés des capteurs TM et AVHRR, mais nous nous intéressons prioritairement à la séparabilité entre classes.

#### **3.2.1 Résolution de 30 m sur quatre fenêtres TM 512 par 512 du 01/03/87**

Les ellipses représentant les classes de végétation sont ici réparties dans un triangle. Le côté le plus long de ce triangle est la ligne des sols avec les classes cultures et savane herbeuse à ses extrémités : nous ne tenons pas compte ici des classes feux, récents et anciens. Le second côté important du triangle contient l'information «végétation verte» puisqu'il correspond à un gradient de recouvrement arboré depuis la savane herbeuse, à une extrémité du côté, jusqu'à la forêt dense à l'autre extrémité. On peut aussi remarquer que ce côté correspond à peu près à l'axe de l'indice de végétation.

#### **3.2.2 Résolution de 180 m sur les deux quarts d'image TM**

L'organisation spatiale des ellipses est plus simple. Elles s'alignent selon les deux axes déjà apparents sur le premier graphique. Ici ces deux axes se dessinent très nettement. Les classes savane herbeuse, savane arborée, savane boisée et boisement dense, s'alignent selon un gradient d'indice de végétation croissant. La surface globale occupée par les ellipses a été compactée par rapport au premier graphique. La séparabilité des classes reste encore cependant satisfaisante.

#### **3.2.3 Résolution de 1km sur l'image NOAA du 8 mars 1987**

Les deux images classées à 180 m de résolution (quarts d'image TM) ont été dégradées à 1 km par affectation de la classe dominante à l'intérieur d'un élément de grille de 1 km de côté et rejet si l'hétérogénéité du pixel est trop grande. Les pixels ainsi classés à 1 km de résolution sont utilisés comme pixels de référence pour calculer les statistiques des classes de végétation sur une image AVHRR du 8 mars 1987.

On peut réitérer les observations faites pour les deux premiers graphiques. Le compactage des classes les plus arborées est encore plus net. Le nombre de pixels des classes forêt galerie et forêt dense est insuffisant pour qu'il soit significatif. Ces deux classes n'ont donc pas été représentées. Lorsque l'on prend en compte l'ensemble des deux quarts de scène, il y a une forte prédominance, en nombre de pixels, des classes cultures, jachères et savane herbeuse par rapport aux classes forestières.

Ces graphiques nous montrent que le NDVI pourra aider, en saison sèche, à mettre en évidence des différences de recouvrement arboré. Cependant, les écarts entre valeurs sur l'axe virtuel de cet indice de végétation sont faibles. Il sera en particulier très difficile de séparer

les savanes des cultures en milieu soudanien au moyen de ce seul paramètre, alors que sur la ligne des sols pour le milieu soudanien, l'écart entre la réponse des cultures et la réponse de la savane herbeuse est suffisamment important pour être significatif. De même, il sera difficile de séparer la forêt dense des mosaïques forêt-culture en milieu guinéen.

### **3.3 Interprétation de la série d'images NOAA**

L'interprétation des images NOAA traitées est faite dans une composition colorée particulière : NDVI codé en rouge, indice de brillance en vert (calculé sur canaux 1 et 2) et TS en bleu. En milieu de saison sèche, il est possible de séparer les deux grandes zones à potentialités écologiques différentes : région des savanes et région de la forêt dense humide. La première région est caractérisée par un faible indice de végétation correspondant à un dessèchement des herbacées et à une température de surface élevée, alors que la seconde montre un indice plus élevé dû à la présence du feuillage des arbres et à une température plus faible due à la protection du couvert végétal.

#### **3.3.1 Tracé des évolutions du NDVI**

Nous avons déjà montré dans Achard *et al.* (1989) que :

a) Pour la zone soudanienne, il est difficile de séparer le comportement des cultures de celui de la savane herbeuse, alors que la savane boisée présente un indice plus élevé dès le milieu de la saison sèche, au moment de la feuillaison des ligneux (saison sèche sur notre site : décembre à avril). Les trois types de végétation dominants sont les cultures pluviales, les jachères et la savane herbeuse. Les indices de végétation de ces trois types prennent à peu près les mêmes valeurs tout au long d'un cycle végétatif complet.

b) Pour la zone guinéenne, il est possible de séparer le comportement de la savane herbeuse de celui de la forêt dense semi-décidue : en saison sèche (janvier à mars) l'indice de végétation de la forêt est élevé à partir du moment de la feuillaison des arbres décidus. Mais il est impossible de séparer le comportement des cultures de celui de la forêt car ces cultures tropicales (café, cacao, etc.) ont les mêmes cycles d'activité chlorophyllienne et leurs réponses sont intermédiaires entre celles de la forêt de la Marahoué (jouxant la savane) et celle de la forêt du Haut-Sassandra (plus à l'intérieur dans la zone forestière).

#### **3.3.2 Tracé des évolutions de la température de surface**

On remarque sur la figure 1 que toutes les courbes sont ici aussi bruitées, comme pour les évolutions du NDVI, à cause des perturbations atmosphériques : il est, en effet, impossible de filtrer les poussières sèches d'Harmattan ou certaines vapeurs humides liées au passage de la mousson.

En zone soudanienne, le cycle des courbes de température de surface est déphasé d'un mois environ par rapport à l'indice de végétation. Le dessèchement progressif de la végétation s'accompagne d'une augmentation de la température de surface du couvert. Ceci est dû au réchauffement progressif du couvert végétal lorsque le stress hydrique se développe. Il est difficile de séparer le comportement de la savane boisée de celui de la savane herbeuse, alors que les cultures montrent une température plus élevée en fin de saison sèche. Le maximum de température est atteint en milieu de saison sèche pour les cultures qui ont une apparence de sols nus à cette époque de l'année.

En zone guinéenne, il est possible de séparer le comportement de la savane herbeuse de celui de la forêt dense semi-décidue sur le site du parc de la Marahoué. La savane atteint un

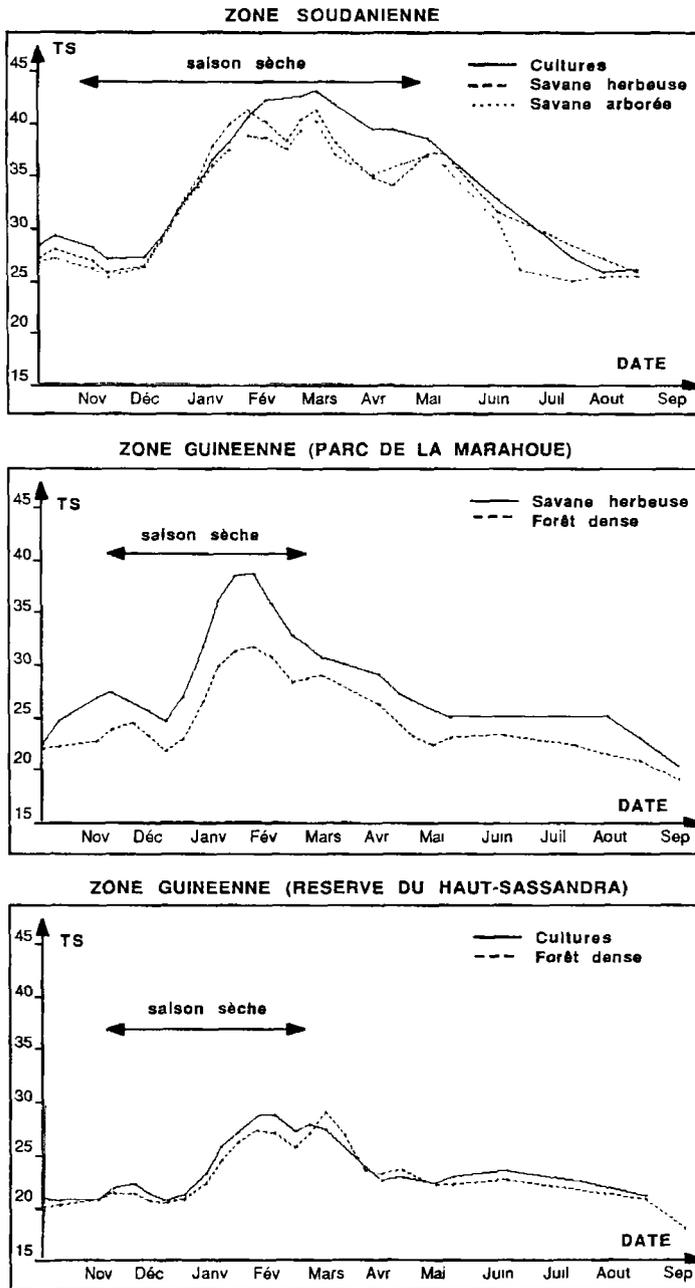


Figure 1. Évolution de la température de surface (TS) (moyenne des valeurs de tous les pixels de chaque classe)

maximum en février (40°C) qui est plus important que celui de la forêt (31°C) dont le comportement est plus stable. Pour le site de la réserve du Haut-Sassandra, la température de surface de la forêt et des couverts de culture présente de faibles variations (moyenne de 23°C pour la forêt) et il est impossible de séparer ces deux classes.

Le maximum de température en fin de saison sèche permet donc de différencier la végétation à cycle saisonnier bien marqué (savane herbeuse) de la végétation sempervirente ou semi-décidue. Les différences de comportement thermique deviennent nettes à partir du mois de janvier et restent élevées jusqu'au mois de mars. Le déphasage de la croissance de la température par rapport au début de la saison sèche s'explique probablement par l'inertie thermique des sols et du recouvrement partiel par les herbacées desséchées en début de saison sèche.

### **3.3.3 Histogrammes bidimensionnels NDVI/TS**

Afin de compléter l'analyse du NDVI à 1 km, nous avons tracé, pour six dates, les ellipses de variance des principales classes de végétation sur un graphique où le NDVI est porté en abscisse et la température de surface en ordonnée (fig. 2).

On observe sur chaque graphique que les ellipses sont approximativement alignées le long d'une droite de pente négative. Ceci confirme la forte corrélation négative entre le NDVI et la température de surface à un instant donné. Par contre la pente des droites varie au cours du temps. Elle passe par un maximum en début de saison sèche (image du 05/01/87) lorsque le NDVI est très faible pour toutes les classes (intervalle 0,08-0,15) et que l'écart de température entre les types en zone soudanienne et la forêt ou les cultures en zone guinéenne est encore important (minimum 22°C, maximum 34°C). Au milieu de la saison des pluies, les ellipses sont très regroupées avec de fortes valeurs du NDVI (0,35-0,5) et de faibles valeurs de la température (22°C-25°C).

En zone soudanienne la meilleure séparabilité entre les classes est obtenue en milieu de saison sèche (images du 22/01/87 et 01/02/87). On peut différencier le type «savane boisée» des types «savane herbeuse» et «cultures». Ces deux derniers types ne sont séparables que sur l'image de fin de saison des pluies (21/10/86), mais les écarts types sont alors très forts, ce qui montre une certaine disparité des valeurs à l'intérieur de ces types de végétation.

## **4 Conclusions**

### **4.1 Données SPOT et Landsat TM**

Les trois images à haute résolution qui ont été utilisées comme référence pour trois sites-tests ont montré leur utilité pour travailler avec une série d'images NOAA LAC.

La résolution des images SPOT ou Landsat TM est suffisante pour produire une classification automatique à grande échelle. L'hétérogénéité spatiale de la végétation naturelle en région soudanienne nécessite cette résolution pour obtenir une cartographie valide.

L'interprétation des graphiques (rouge, proche infrarouge) nous suggère que le NDVI n'est pas, dans le cas de la zone soudanienne, le meilleur outil de différenciation des divers types de couvert végétal. Un indice des sols ou un indice de brillance serait probablement plus approprié.

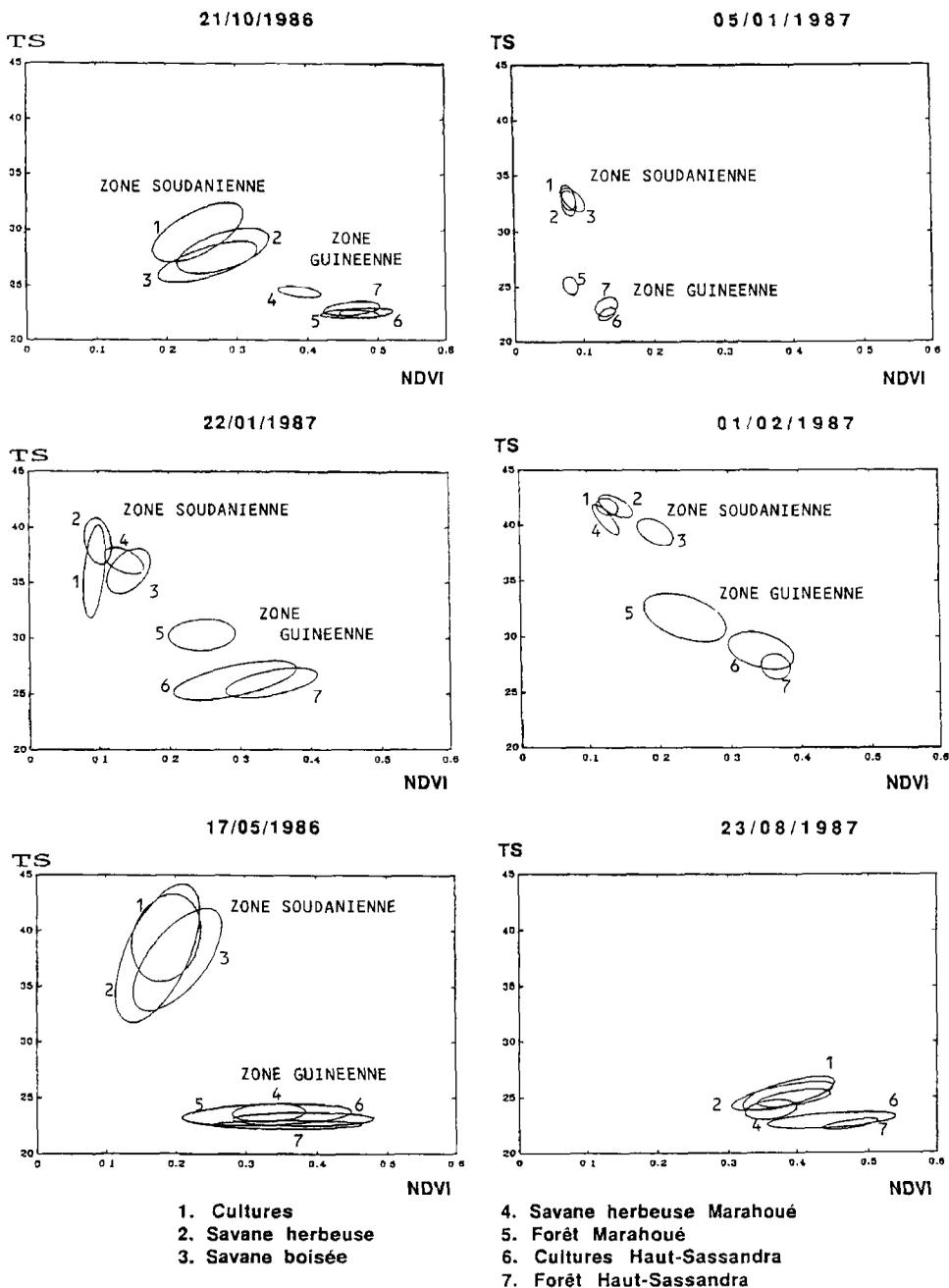


Figure 2. Évolution des ellipses de variance sur histogrammes bidimensionnels NDVI/TS

## **4.2 Données NOAA AVHRR LAC**

La qualité des réponses enregistrées par le capteur AVHRR est fortement limitée par les perturbations atmosphériques présentes dans cette région : vent d'Harmattan ou nuages de la mousson. Cependant, la séparation entre les deux zones à potentialités écologiques différentes que sont la zone forestière (forêt dense humide) et la zone de savanes (et forêt sèche) est possible en milieu de saison sèche.

Le suivi de l'indice de végétation normalisé et de la température de surface sur un site en région soudanienne et sur deux sites en région guinéenne nous montre qu'à l'intérieur de chaque zone, il n'est pas possible de séparer les surfaces de cultures des milieux naturels. À l'intérieur des milieux naturels ou spontanés, seuls les comportements de la savane herbeuse (sans ligneux) et des types très boisés peuvent se séparer, notamment grâce au décalage phénologique des herbacées et des ligneux en saison sèche.

À la résolution du kilomètre, l'indice de végétation (NDVI) est donc insuffisant, seul, pour caractériser les paysages complexes des zones soudanienne et guinéenne.

Nous montrons aussi que l'indice de végétation est corrélé avec la température de surface à un instant donné. Nous avons mis en évidence sur les graphiques (indice de végétation, température de surface) l'alignement des ellipses de variance le long d'une droite de pente négative. La variation de la pente des droites au cours du temps est la conséquence du déphasage thermique.

La température de surface est en définitive un complément très utile au NDVI : ce paramètre permet, d'une part, de mieux différencier les types de végétation et apporte, d'autre part, une information supplémentaire sur l'état du couvert.

## **4.3 Prospective**

Ce travail sur l'utilisation des produits spatiaux aux diverses résolutions nous permet d'exprimer quelques idées sur le thème de la déforestation intertropicale, étudiée grâce aux satellites actuels. Il s'agit essentiellement de dégager les principaux axes d'investigations dans ce domaine.

Nos conclusions suggèrent d'une part, qu'il ne faut pas limiter l'utilisation des données satellitaires au seul paramètre «indice de végétation», et font apparaître, d'autre part, que les données fournies par le capteur AVHRR ne sont pas bien adaptées à l'approche conventionnelle de la description de la végétation dans l'état actuel de nos connaissances.

Il apparaît donc primordial de développer plusieurs axes d'investigation susceptibles de faire progresser notre connaissance de la végétation et des informations spectrales :

1) Il faut d'abord remettre en cause les cartes de végétation à petite échelle, afin d'y intégrer les informations fournies par les satellites, en particulier sur les cycles saisonniers d'activité chlorophyllienne des couverts végétaux. À l'heure actuelle, les cartes de végétation ne permettent pas de se faire une idée, même vague, des rythmes biologiques des unités décrites.

2) Il faut de plus mener une approche différente où l'on considère l'usage de la télédétection pour l'étude de ces problèmes globaux, non plus simplement comme un outil, mais comme une problématique propre : ces données sont probablement les seules qui puissent nous permettre de comprendre les mécanismes de fonctionnement des grands ensembles forestiers tropicaux et d'évaluer les conséquences des transformations planétaires en cours.

## 5 Remerciements

Nous tenons à remercier Alain Podaire et François Lavenu du Laboratoire d'études et de recherche en télédétection spatiale (LERTS) de Toulouse qui nous ont assuré une collaboration scientifique indispensable à la réalisation de l'étude. Celle-ci a été financée par une aide du Programme national télédétection spatiale (PNTS) (aide CNES : 87/CNES/1270) et par un contrat avec le Centre commun de recherche de la Commission des communautés européennes, établissement d'Ispra, Italie (contrat no 3268-87-11 ED ISP F).

## 6 Références

- ACHARD, F., F. BLASCO, F. LAVENU et A. PODAIRE, 1989. Étude de la dynamique des formations au contact forêt-savane en Afrique de l'Ouest par télédétection. —Bulletin de la Société française de photogrammétrie et de télédétection, n° 114, p. 37-39.
- ACHARD, F., 1989. Étude des rythmes saisonniers de la végétation en Afrique de l'Ouest par télédétection spatiale. —Thèse de doctorat de l'Université Paul-Sabatier de Toulouse, 246 p.
- BLASCO, F. et F. ACHARD, 1990. Analysis of vegetation changes using satellite data. —in A. F. Bouwman (éd.). Soils and the Greenhouse effect. John Wiley & Sons, Inc., 10 p., sous presse.
- DESCHAMPS, P. Y. et T. PHULPIN, 1980. Atmospheric correction of infrared measurements of sea surface temperature using channels at 3,7, 11 and 12  $\mu\text{m}$ . —Boundary-Layer Meteorology, 18, p. 131-143.
- FAO, 1988. An interim report on the state of forest resources in the developing countries. —Publication FAO Forest Resources Division, Rome, 18 p. + tableaux.
- FONTES, J., 1984. Évaluation des ressources forestières en Haute-Volta. Situation 1980-85. —Rapport FAO/ICITV, Toulouse, 30 p.
- GUILLAUMET, J. L. et E. ADJANOHOOUN, 1971. La végétation. —in J. M. Avenard *et al.* Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoires ORSTOM, n° 50, p. 157-262.
- MALINGREAU, J. P. et C. J. TUCKER, 1988. Large scale deforestation in the Southeastern Amazon Basin of Brasil. —Ambio, vol. 17, n° 1, p. 49-55.
- TUCKER, C. J. et P. J. SELLERS, 1986. Satellite remote sensing of primary production. —International Journal of Remote Sensing, 7, p. 1395-1416.
- UNESCO, 1973. Classification internationale et cartographie de la végétation. —Unesco, Paris, p. 41-65.

## 2

# Suivi par télédétection des productions céréalières pluviales en pays sahéliens

ÉTIENNE BARTHOLOMÉ

*Institut pour les applications de la télédétection, Centre commun de recherche de la Commission des communautés européennes, 21020 Ispra, Italie*

### Résumé

Des valeurs hebdomadaires d'indices de végétation sont comparées aux rendements officiels en mil et sorgho pour 83 unités administratives du Sénégal, du Mali, du Burkina Faso et du Niger durant l'année 1984.

Les indices de végétation arrivent à décrire les 2/3 de la variabilité du rendement dès le début du mois de septembre, soit un à deux mois avant la récolte, suivant les régions.

Les indices intégrés ne se montrent pas supérieurs aux indices instantanés. Cependant, les paramètres de la régression avec les indices intégrés évoluent dans le temps d'une manière progressive et modélisable.

L'efficacité des moyennes régionales d'indice de végétation dans la description des rendements indique que le facteur explicatif principal est commun à la fois au domaine agricole et au domaine non agricole : il s'agit de la pluviométrie.

### 1 Introduction

Les indices de végétation sont reconnus depuis longtemps déjà comme un moyen efficace de mesurer l'état et la quantité de biomasse photosynthétisante. Leur signification est bien établie du point de vue théorique (Sellers, 1985 et 1987; Choudhury, 1987), et confirmée aussi bien en conditions expérimentales qu'en milieu naturel.

En Afrique de l'Ouest, ces études ont porté surtout sur le suivi des pâturages (Tucker *et al.*, 1983; De Wispelaere, 1983; Justice et Hiernaux, 1986; Hiernaux et Justice, 1986; Tucker

*et al.*, 1986). Les applications aux cultures sont restées limitées et ponctuelles. Par contraste, peu de choses ont été faites en ce qui concerne l'étude de zones spatialement étendues.

Malgré cette relative faiblesse des connaissances sur l'Afrique de l'Ouest proprement dite, l'USAID (les abréviations citées dans le texte sont définies à la fin) et par la suite le Centre AGRHYMET de Niamey se sont mis à exploiter d'une manière opérationnelle les indices de végétation dérivés des données AVHRR fournies journalièrement par les satellites à orbite polaire de la NOAA. Faute de base de référence adéquate, ces applications opérationnelles se sont cantonnées jusqu'à présent dans des analyses purement qualitatives de la distribution spatiale et temporelle des indices de végétation.

Une telle approche ne satisfait cependant pas complètement l'utilisateur final de l'information. Pour prendre ses décisions, celui-ci a en effet besoin d'informations quantitatives sinon précises, du moins avec une marge d'erreur connue. Il désire obtenir ces informations par unité administrative, base de toute action concrète. Les informations fournies doivent permettre de déceler et de quantifier les situations de crise. En situation normale, elles doivent aider à organiser les flux commerciaux interrégionaux.

Les résultats présentés ci-après ont été obtenus dans le cadre d'une étude orientée par ces différentes exigences. Son objectif est de préciser par une comparaison empirique avec des données officielles de rendement et des données de pluviométrie la signification des indices de végétation calculés par unité administrative (taille moyenne : 10 000 km<sup>2</sup>) sur les régions agricoles du Sénégal, du Mali, du Burkina Faso et du Niger. L'intérêt d'une telle approche est double. D'une part, elle fournit des résultats directement comparables avec les statistiques officielles. D'autre part, elle autorise l'utilisation de procédures peu exigeantes de pré-traitement de l'imagerie satellitaire, et elle réduit fortement le volume des données à transmettre, favorisant ainsi une diffusion aisée de l'information.

L'analyse se limite ici à l'année 1984 pour des raisons de disponibilité de données statistiques.

Tant du point de vue climatique que du point de vue agricole, l'année 1984 a été calamiteuse (AGRHYMET, 1984). Alors que le mois de mai avait vu un bon démarrage de la saison des pluies, le mois de juin s'est caractérisé par une situation contrastée entre l'Est et l'Ouest. La Mauritanie, le Sénégal, la Gambie et l'ouest du Mali ont reçu des pluies excédentaires par rapport à la moyenne, alors que le reste (l'est du Mali, le Burkina, le Niger et le Tchad) était déficitaire, ce qui a entraîné un retard de la saison agricole dans ces régions. Les mois de juillet et d'août ont été partout déficitaires : il a manqué au moins 100 mm par mois sur les régions agricoles stratégiques des pays du CILSS. Le mois de septembre a été quant à lui pratiquement dans la norme, mais localement des pluies violentes ont occasionné des dégâts. Les déficits hydriques antérieurs n'ont cependant pas pu être comblés.

En résumé, les cultures ont subi des déficits hydriques sévères depuis la deuxième décennie de juillet jusqu'à la fin de la saison qui est parmi les plus mauvaises de la décennie.

## 2 Données

### 2.1 Statistiques agricoles

L'analyse s'appuie sur les données officielles de rendement obtenues par enquêtes agricoles. Celles-ci sont organisées de manière indépendante par l'administration de chaque État selon des procédures relativement similaires et en voie d'harmonisation. «Partout la méthodologie d'enquête utilisée est le sondage à plusieurs degrés, stratifié au premier degré en fonction d'un

seul critère qui est la taille démographique des villages (cas le plus fréquent) ou de plusieurs critères (cas le plus rare). La taille des échantillons à différents niveaux de tirage et dans chaque strate est déterminée sur la base d'un compromis entre les exigences scientifiques et les moyens humains et matériels disponibles. Dans bien des cas, les moyens étant limités, ce sont eux les plus déterminants» (DIAPER, 1987).

Le premier degré de sondage porte sur un tirage de villages-échantillons. Le deuxième degré porte sur un tirage d'exploitations-échantillons dans ces villages. Au troisième degré, on tire un certain nombre de parcelles-échantillons dans chacune de ces exploitations. Ces pièces de terre sont arpentées, en général à la boussole et au podomètre ou à la chaîne d'arpenteur. La nature de culture est déterminée et un carré de rendement (en général de 5 m par 5 m) est mis en place, le plus souvent sur un sous-échantillon. Au total, on peut considérer que les enquêtes sont réalisées selon une méthodologie non critiquable du point de vue strictement statistique, mais bien du point de vue agronomique : les critères de sélection des échantillons sont principalement d'ordre démographique. Les facteurs influençant la variabilité des observations ne sont donc absolument pas maîtrisés. Les statistiques sont publiées depuis quelques années pour des unités administratives d'une taille de l'ordre de 10 000 km<sup>2</sup>.

Bien que le taux de précision ne soit pas spécifié dans les annuaires officiels, des observations indépendantes laissent penser que le taux d'erreur des chiffres de rendement est de l'ordre de 20%. Par ailleurs, l'analyse des statistiques de rendement par unité administrative a montré qu'à cette échelle géographique, les rendements en mil et sorgho sont suffisamment similaires pour qu'on puisse les considérer ensemble (Bartholomé, 1989).

## **2.2 Données télédétectées**

On a exploité des données AVHRR archivées au Centre AGRHYMET qui nous ont été fournies pour analyse dans le cadre du projet du CILSS «Surveillance des ressources naturelles renouvelables au Sahel», financé par le Fonds européen de développement. Il s'agit d'indices de végétation calculés à partir de données AVHRR GAC et dégradés spatialement à des cellules de grille de un degré en longitude et un demi-degré en latitude. Ces données ont été préparées aux États-Unis pour le Centre AGRHYMET selon la procédure suivante (AGRHYMET, 1986; Johnson *et al.*, 1987) :

- réception journalière des données GAC à Washington (station NOAA);
- correction géométrique selon la projection «plate carrée», et calcul du NDVI;
- assemblage des séries temporelles, et extraction, pixel par pixel, des valeurs maximales de NDVI pour chaque semaine de l'année;
- calcul des NDVI moyens et d'autres paramètres statistiques par cellule de grille d'un demi-degré;
- lissage des données par calcul de la moyenne sur une fenêtre temporelle mobile de 5 semaines (la valeur centrale est pondérée par les valeurs des deux semaines précédentes et des deux semaines suivantes), de manière à réduire le bruit résiduel lié principalement à l'état de l'atmosphère;
- transfert hebdomadaire des valeurs par cellule de grille au Centre AGRHYMET via télex commercial pour intégration dans la chaîne de suivi opérationnel.

À partir de ces données pré-traitées par demi-degré carré, les valeurs hebdomadaires moyennes de NDVI ont été calculées pour 83 circonscriptions administratives du Sénégal, du Mali, du Burkina Faso et du Niger. Les moyennes ont été calculées proportionnellement aux surfaces. Certaines unités administratives ont été écartées de l'analyse, soit par manque

de données, soit parce que leur grande extension latitudinale ne donnait guère de sens à une comparaison entre NDVI et rendements de cultures concentrées sur quelques sites-refuges, soit encore parce que la proximité de l'océan risquait de biaiser les observations. L'arrière-pays de Dakar et les régions septentrionales du Mali et du Niger ont donc été écartés.

### 3 Résultats

#### 3.1 Corrélations instantanées

Johnson *et al.* (1987) proposent d'établir la corrélation entre NDVI global et rendements au moment de la formation du grain. Ce moment est fonction de la longueur du cycle et donc des variétés. Il pourrait, selon ces auteurs, être déterminé en considérant que l'émergence radiométrique correspond à l'émergence des cultures. Cette argumentation est sans doute correcte si la résolution du satellite est compatible avec la taille du domaine agricole, ou si celui-ci domine nettement dans le paysage. L'extrapolation de cette argumentation au suivi de l'agriculture sahélienne paraît audacieuse, à cause à la fois de la faible résolution des données utilisées, du faible taux de mise en culture (en général 5% à 25% de la superficie totale) et de l'étalement dans le temps des activités agricoles. Néanmoins, la méthode préconisée par ces auteurs a certaines chances de fonctionner sur les données à un demi-degré de résolution principalement à cause de la forte autocorrélation temporelle des données. Celle-ci est dûe pour une part à la procédure de lissage sur cinq semaines (dans cet intervalle, les coefficients de détermination entre dates sont supérieurs à 0,95) et pour une autre part au déterminisme inhérent au développement de la végétation. Ainsi, les NDVI du 25 juin décrivent déjà les trois quarts de la variabilité des NDVI du 3 septembre, moment où la relation NDVI-rendement est la plus forte.

Même si on estime mal l'émergence réelle des cultures, il est très peu probable que cette erreur soit supérieure à cinq semaines. Si en outre on fait une hypothèse erronée sur la durée du cycle des cultures, il y a de fortes chances que cette erreur ne dépasse pas non plus cinq semaines. L'argumentation utilisée pour déterminer le moment optimum du calcul de régression ne paraissant pas complètement fondée, on retombe ainsi dans le champ de l'analyse purement empirique.

Le tableau I montre que le NDVI global arrive à décrire plus des 2/3 de la variabilité du rendement moyen des deux principales céréales pluviales pour l'ensemble des quatre pays considérés.

Plusieurs observations peuvent être tirées de ce tableau :

1) Les conclusions tirées par Johnson *et al.* (1987) sur une dizaine de lieux au Burkina Faso peuvent se généraliser à l'ensemble des unités administratives des quatre pays où la culture du mil et du sorgho est pratiquée.

2) Il n'est pas nécessaire de rechercher un quelconque stade critique eu égard à l'autocorrélation temporelle des données.

3) La meilleure corrélation est obtenue aux environs de la transition montaison-épiaison (du 20 août au 17 septembre), comme l'ont montré les observations en parcelles expérimentales, que ce soit sur le mil et le sorgho (Bartholomé, 1988a) ou sur d'autres céréales, et non au moment de la formation du grain, qui apparaît environ trois semaines plus tard.

4) La meilleure corrélation est postérieure au NDVI maximum, indiquant sans doute un déphasage entre le développement de la végétation naturelle et celui des cultures.

**Tableau I.** Coefficients de détermination pour différentes procédures d'intégration du NDVI (les coefficients de détermination sont significatifs s'ils sont supérieurs ou égaux à 0,047 [p=0,05])

Jour	Indices instantanés $R^2$	Intégration des indices de végétation				
		Depuis le 30 avril $R^2$	Depuis le 11 juin			
			Données originales		Racines carrées	
			Non sélectionnées $R^2$	Sélectionnées $R^2$	Non sélectionnées $R^2$	Sélectionnées $R^2$
11 juin	0,40	0,11	0,40	0,15	0,43	0,25
18 juin	0,42	0,12	0,42	0,18	0,45	0,26
25 juin	0,29	0,17	0,43	0,21	0,46	0,29
2 juillet	0,43	0,27	0,40	0,32	0,47	0,42
9 juillet	0,42	0,29	0,47	0,33	0,50	0,38
16 juillet	0,49	0,35	0,49	0,39	0,53	0,44
23 juillet	0,58	0,41	0,52	0,47	0,56	0,52
30 juillet	0,58	0,45	0,54	0,51	0,59	0,54
6 août	0,62	0,51	0,56	0,55	0,61	0,60
13 août	0,65	0,53	0,57	0,56	0,62	0,62
20 août	0,67	0,55	0,58	0,58	0,63	0,64
27 août	0,67	0,56	0,59	0,59	0,64	0,64
3 sept.	0,67	0,57	0,60	0,59	0,64	0,65
10 sept.	0,67	0,58	0,60	0,60	0,65	0,65
17 sept.	0,67	0,58	0,60	0,60	0,65	0,65
24 sept.	0,65	0,59	0,60	0,61	0,65	0,65
1 octobre	0,62	0,58	0,60	0,61	0,65	0,65
8 octobre	0,64	0,58	0,60	0,60	0,65	0,65
15 octobre	0,70	0,57	0,60	0,59	0,65	0,65
22 octobre	0,62	0,56	0,60	0,58	0,65	0,65

5) Les données télédétectées permettent de se faire une idée à la fois précise (les moyennes sont estimées à environ 100 kg/ha) et globale des rendements environ un à deux mois avant la récolte.

6) La partie de la variabilité non décrite par la régression est attribuable dans une mesure non déterminée d'une part à l'imprécision intrinsèque des statistiques de rendement (nombre réduit d'observations), et d'autre part à celle de l'observation satellitaire globale.

7) Le comportement général de toute la végétation est un bon indicateur de l'état des cultures. Ceci indique que le facteur déterminant la variabilité des rendements à cette échelle spatiale n'est pas lié spécifiquement aux cultures, mais affecte toute la végétation : il ne peut s'agir que des conditions météorologiques de la saison et en particulier de la pluviométrie. Une telle conclusion valable à l'échelle sous-continentale ne peut sans doute se transposer directement à une analyse intrarégionale (quelques dizaines de kilomètres carrés). La nature des facteurs explicatifs dépend du niveau d'échelle spatiale auquel on considère le problème.

### 3.2 Intégration temporelle

Pour vérifier d'une manière purement empirique l'applicabilité à l'échelle globale du modèle liant l'énergie lumineuse absorbée par le couvert végétal à la production de matière sèche (modèle APAR-rendement) proposé par Warren-Wilson (1967 et 1969) et Monteith (1972) et contrôlé à l'échelle de la parcelle, on a établi les corrélations entre données intégrées de NDVI au cours de la saison et rendement en mil et sorgho.

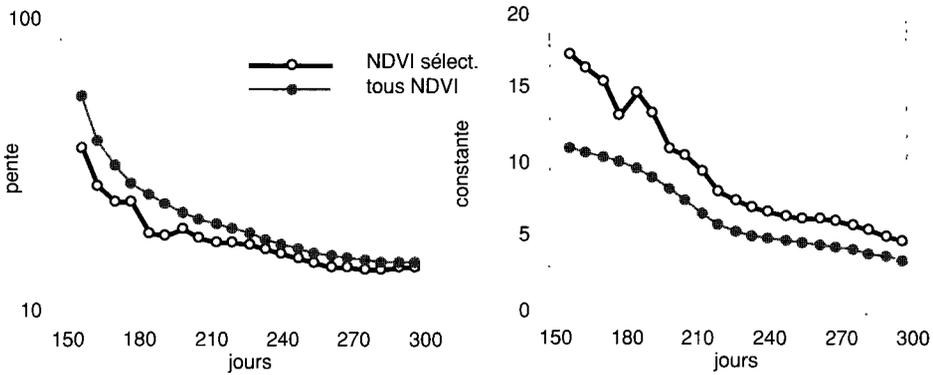
L'intégration a été effectuée de trois manières différentes : à partir du minimum de NDVI d'avant-saison, soit le 3 avril; à partir du moment où les corrélations avec les NDVI instantanés deviennent significatives, soit le 11 juin; et finalement à partir de la date de démarrage de la saison définie par le moment où l'accroissement cumulé de NDVI dépasse 0,01. Ce critère s'avère être un bon indicateur du démarrage des pluies utiles (Bartholomé, 1989). Il s'avère que les corrélations les plus fortes sont observées avec les deux dernières procédures d'intégration. Une date de démarrage trop précoce intègre le comportement radiométrique de végétations n'ayant aucun rapport avec les cultures, mais qui affecte néanmoins les valeurs tout au long de la période d'intégration. La prise en compte de la date de début de saison donne des corrélations légèrement inférieures en début de période par rapport à la simple intégration générale à partir du 11 juin, mais les différences s'amenuisent avec le temps (tableau I). Ceci indique que l'émergence radiométrique globale n'est pas un estimateur précis de l'émergence réelle des cultures.

Contrairement à ce que suggéraient des observations sur parcelles expérimentales (Bartholomé, 1988b), les NDVI intégrés ( $R^2 = 0,65$ ) ne sont pas significativement différents des NDVI instantanés ( $R^2 = 0,67$ ). Au contraire, ils ont une tendance systématique à être légèrement inférieurs.

On peut noter que la force des relations reste stable du début septembre jusqu'à la fin octobre, c'est-à-dire durant toute la période de formation du grain.

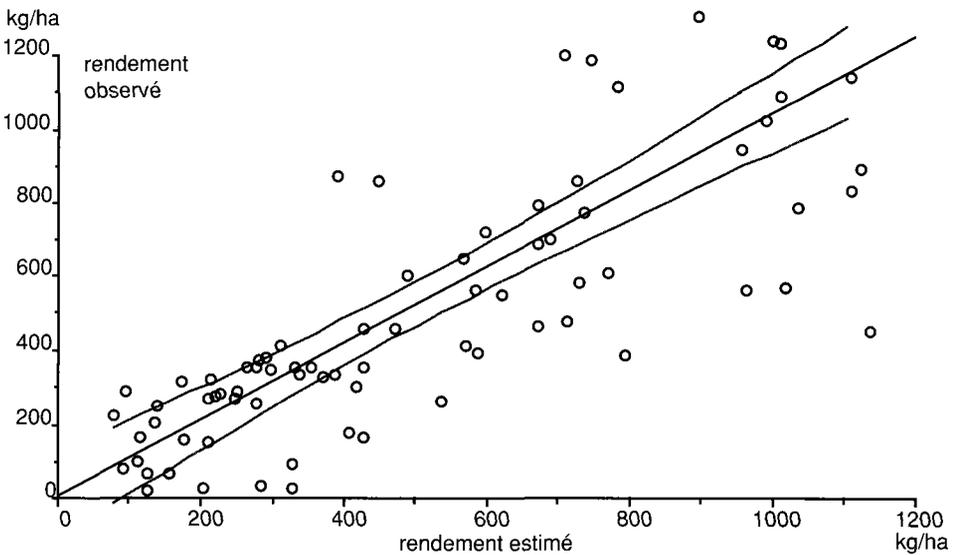
L'applicabilité du principe du modèle de relation APAR-rendement à l'échelle sous-continentale est donc confirmée par les fortes corrélations observées, mais contrairement à ce que prédit le modèle APAR-rendement, on constate dans le cas étudié que l'intégration de l'indice de végétation ne permet pas de décrire mieux la variabilité du rendement que l'observation instantanée. On peut sans doute invoquer, du moins en partie, des causes techniques : d'une part, l'analyse se base sur une mesure globale du NDVI et non sur une mesure ciblée sur les cultures, d'autre part le NDVI «instantané» étant obtenu par lissage, il est donc déjà le résultat d'une forme d'intégration temporelle.

Dans la pratique, l'avantage du NDVI intégré appliqué à des données globales pourrait alors se situer principalement dans la possibilité de prédire les paramètres de la régression. L'analyse des paramètres de régression (pente et constante) confirme les observations effectuées sur parcelles expérimentales (Bartholomé, 1988b et 1989). Ceux-ci suivent une trajectoire temporelle curviligne qui tend vers la linéarité après l'apparition du NDVI maximum (fig. 1). Ces observations indiquent qu'il est possible de prévoir les paramètres de la régression en fonction du moment dans la saison.



**Figure 1.** Évolution temporelle des paramètres de la régression NDVI intégré - rendement en mil et sorgho

Les figures 2 et 3 comparent les estimations obtenues par intégration des NDVI moyens régionaux jusqu'au 3 septembre. À ce moment, le coefficient de détermination est de 0,64, soit une valeur du même ordre de grandeur que les valeurs observées sur parcelles expérimentales (Tucker *et al.*, 1980; Markham *et al.*, 1981; Pinter *et al.*, 1981; Daughtry *et al.*, 1983; Gallo *et al.*, 1985; Daughtry, 1988; Bartholomé, 1988b). On peut constater que l'intervalle de confiance de l'estimation est relativement étroit : de l'ordre de 60 kg/ha pour des estimations de 600 kg/ha, et de 150 kg/ha vers des rendements de 1000 kg/ha. Cependant, la dispersion des points est relativement importante, principalement à cause, d'une part, de la précision incertaine des mesures de rendement, et d'autre part, à cause de l'observation globale.



**Figure 2.** Comparaison entre rendement estimé au 3 septembre 1984 par l'intégration des NDVI régionaux et rendement observé par enquête agricole (les courbes donnent l'intervalle de confiance à 95% de l'estimation, le coefficient de détermination est de 0,64)

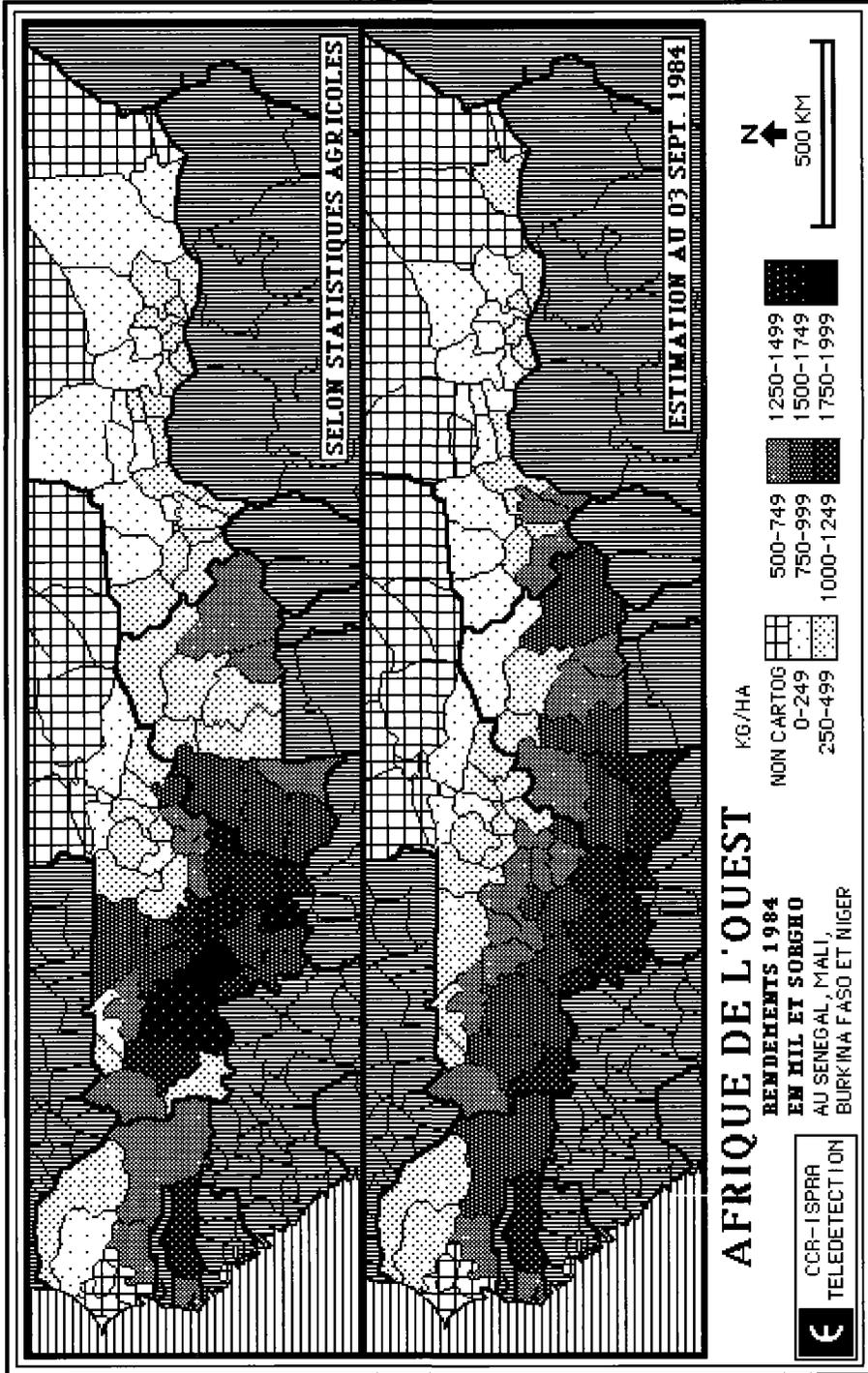
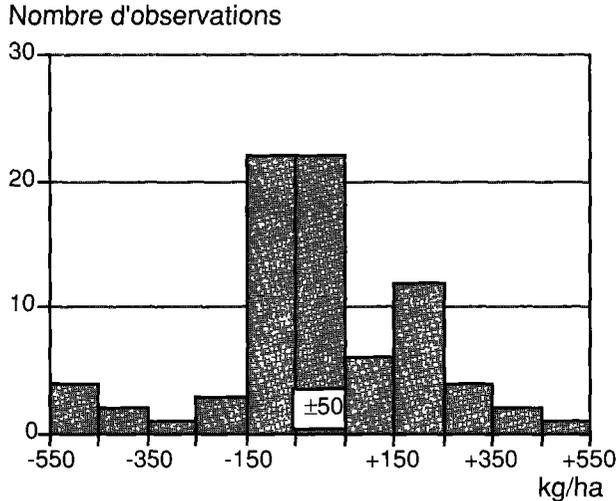


Figure 3. Comparaison entre rendement observé et rendement estimé par intégration des NDVI moyens régionaux jusqu'au 3 septembre 1984

La figure 4 nous apprend cependant que 49 observations sur 83 ont fourni un résidu compris dans une fourchette de  $\pm 150$  kg/ha, ce qui correspond au niveau probable de précision des enquêtes de terrain, alors que 20 observations présentent un écart supérieur à 250 kg/ha.



**Figure 4.** Histogramme des écarts entre rendement estimé au 3 septembre 1984 par l'intégration des NDVI régionaux et rendement observé par enquête agricole

La figure 5 indique la répartition spatiale des résidus de corrélation. La correspondance entre estimation et observation paraît satisfaisante pour toute la moitié orientale de la zone étudiée, c'est-à-dire le nord-est du Mali agricole, la moitié septentrionale du Burkina Faso, et pratiquement tout le Niger. Il s'agit en fait de toutes les zones à faible rendement (<500 kg/ha). En revanche, les zones à rendement moyen (500-1000 kg/ha) ont tendance à être surestimées. Il s'agit principalement de régions appartenant au domaine nord guinéen du sud du Mali et du Burkina Faso, ainsi que de territoires à proximité de la haute vallée du fleuve Sénégal. Enfin, une grande poche de sous-estimation barre le Mali en deux. Dans ces régions, des rendements relativement élevés (>1000 kg/ha) ont été révélés par les enquêtes agricoles.

La comparaison visuelle de cette carte avec celle des pluviométries mensuelles (AGRHYMET, 1984) n'a permis d'observer aucune corrélation évidente. De même, il n'y a pas de correspondance apparente avec le taux de mise en culture et le taux de céréaliculture (Bartholomé, 1989) qui aurait pu expliquer une meilleure efficacité de l'observation globale là où la culture domine.

Ces discordances peuvent avoir principalement trois origines :

1) Biais des statistiques de rendement : des biais locaux ne sont pas à exclure (voir par exemple la répartition spatiale «anormale» par rapport aux isohyètes des rendements élevés au Mali). Un biais possible pourrait être par exemple la prise en compte dans certaines régions ou au contraire l'élimination dans d'autres de parcelles à très faible rendement, qui pourraient être déclarées comme sinistrées par les enquêteurs (dans ce cas, il y a aussi influence sur les surfaces récoltées), même si en pratique elles sont récoltées, surtout en période de disette.

2) L'observation globale ne permet pas de rendre compte correctement des adaptations locales de l'agriculture au milieu. Il est probable que, dans certaines régions, les pratiques

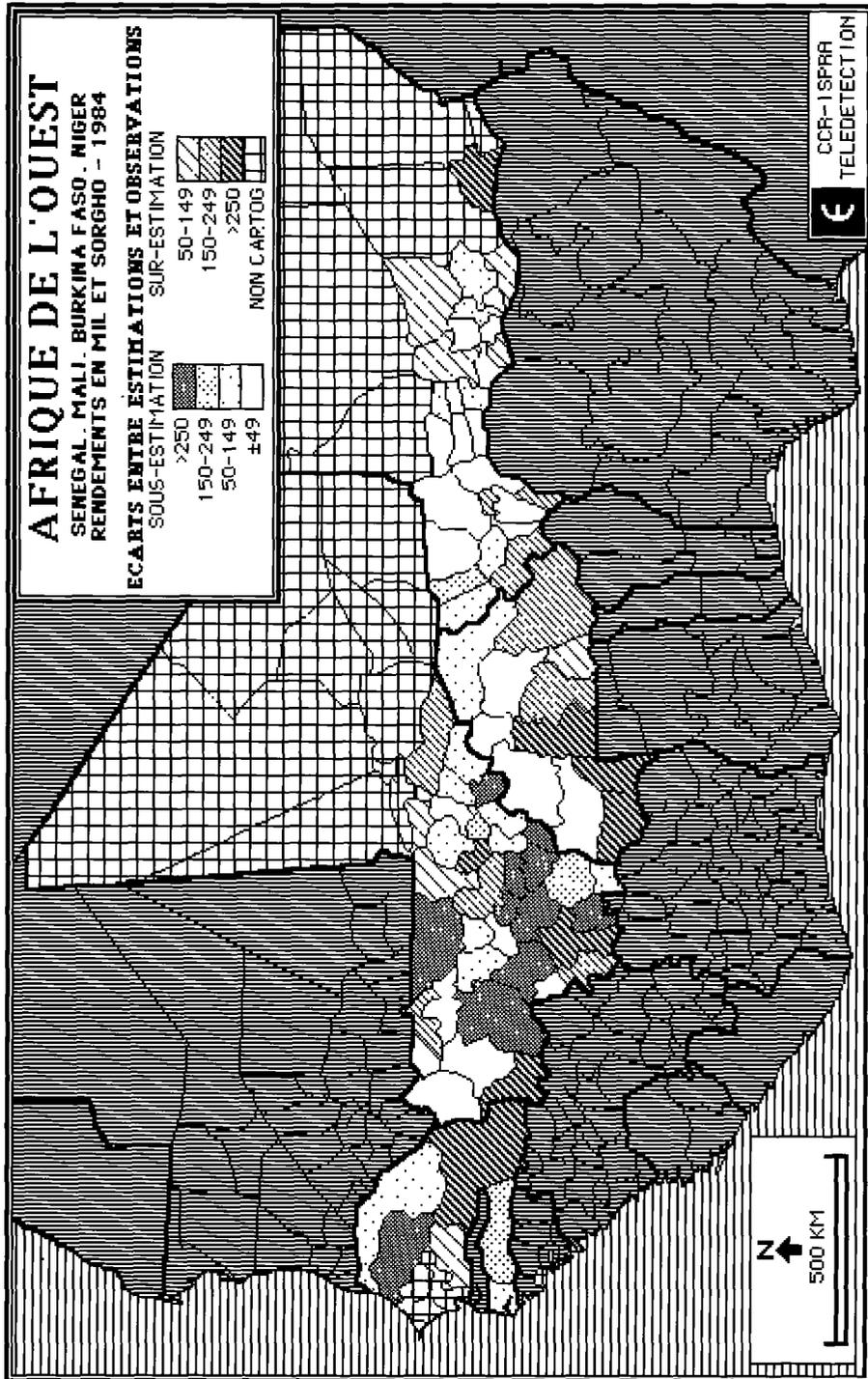


Figure 5. Cartographie des résidus de rendement observé et rendement estimé par intégration des NDVI moyens régionaux, jusqu'au 3 septembre 1984

agricoles permettent de manière plus efficace que la moyenne les potentialités du milieu. Ceci pourrait expliquer les «anomalies» notées précédemment.

3) L'état de l'atmosphère peut localement biaiser les indices de végétations. Ainsi, la bande de rendements sous-estimés au Mali correspond à la position moyenne des maxima de tension de vapeur d'eau (R. Morel, communication orale).

## **4 Conclusions**

- Les moyennes par unités administratives d'indices de végétation NDVI permettent de fournir une description d'environ 2/3 de la variabilité spatiale des rendements en mil et sorgho à l'échelle sous-continentale de un à deux mois avant la récolte.

- À cette échelle géographique, le facteur explicatif de la variabilité des rendements est commun au domaine agricole et au domaine non agricole : il s'agit essentiellement de la pluviométrie.

- Les discordances entre valeurs observées et valeurs estimées sont à rechercher d'abord dans les limitations intrinsèques aux données utilisées dans l'expérimentation : NDVI moyen calculé sur de grandes unités administratives et statistiques agricoles de qualité variable et en tout cas limitée par le nombre d'observations. La variabilité des techniques agricoles peut sans doute aussi expliquer certains biais localisés.

- Si l'observation globale fournit déjà une bonne idée de la tendance générale des rendements, une meilleure estimation pourrait être obtenue par l'observation ciblée sur le domaine agricole de chacune des unités administratives.

## **5 Remerciements**

Cette étude constitue une partie de la contribution du Centre commun de recherche d'Ispra au projet du CILSS «Surveillance des ressources naturelles renouvelables». Je remercie Messieurs F. Ouattara et P. Delorme, respectivement coordinateur et expert de ce projet, pour l'aide apportée dans la collecte des données. Je remercie également P. Jacques du Laboratoire de télédétection de l'Université de Louvain-la-Neuve pour son aide dans le reformatage des données numériques.

## **6 Références**

- AGRHYMET, 1984. Synthèse régionale des situations agrométéorologiques de la saison des pluies 1984 dans les pays du CILSS. —Publication n° 184 du Centre AGRHYMET, Niamey, 101 p.
- AGRHYMET, 1986. Synthèse régionale des situations agrométéorologiques de la saison des pluies 1986 dans les pays du CILSS. —Publication n° 197 du Centre AGRHYMET, Niamey, 249 p.
- BARTHOLOMÉ, É., 1988a. Recherches sur la prévision précoce du rendement des cultures céréalières pluviales, résultats de la campagne de carrés de rendements Kaya 1987. —Note technique n° 1.88.82, Centre commun de recherche, Établissement d'Ispra, 22 p.

- BARTHOLOMÉ, É., 1988b. Radiometric measurements and crop yield forecasting : some observation over millet and sorghum experimental plots in Mali. —EARSEL symposium European remote sensing needs in the 1990<sup>e</sup>, Noordwijkerhout, NL, 4-8 may 1987, International Journal of Remote Sensing, special issue n° 9/10-11, p. 1539-1552.
- BARTHOLOMÉ, É., 1989. Contribution aux méthodes de suivi par télédétection satellitaire des rendements régionaux des cultures céréalières pluviales en Afrique soudano-sahélienne. — Dissertation présentée pour l'obtention du grade de Docteur en sciences, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgique, Institut pour les applications de la télédétection, CCR-Ispra, Italie, 255 p.
- CHOUDHURY, B. J., 1987. Relationships between vegetation indices, radiation absorption, and net photosynthesis evaluated by a sensitivity analysis. —Remote Sensing of Environment, n° 22, p. 209-233.
- DAUGHTRY, C. S. T., K. P. GALLO et M. E. BAUER, 1983. Spectral estimates of solar radiation intercepted by corn canopies. —Agronomy Journal, n° 75, p. 527-531.
- DAUGHTRY, C. S. T., 1988. Estimating absorbed radiation and phytomass from multispectral reflectance of corn and soybeans. —Proceedings of IGARSS'88, Edinburgh, 13-16 septembre 1988, ESA Publication Division ESA SP-284, p. 821-824.
- DE WISPELAERE, G., 1983. Systèmes de production d'élevage au Sénégal, étude et cartographie de l'évolution de la végétation par télédétection aérospatiale. —Compte rendu de fin d'étude, Institut d'études en médecine vétérinaire tropicale, ISBN 2-85895-082-1, 141 p.
- DIAPER, 1987. Suivi de campagne et estimation des récoltes, présentation des dispositifs d'enquête existants dans les états-membres pour la collecte des statistiques agricoles courantes. — Publication n° D3/87, Projet FED-CILSS, Diagnostic permanent, Ouagadougou, 26 p.
- GALLO, K. P., C. S. T. DAUGHTRY et M. E., BAUER, 1985. Spectral estimation of absorbed photosynthetically active radiation in corn canopies. —Remote Sensing of Environment, n° 17, p. 221-232.
- HIERNAUX, P. et C. O. JUSTICE, 1986. Suivi du développement végétal au cours de l'été 1984 dans le Sahel malien. —International Journal of Remote Sensing, n° 7/11, p. 1515-1532.
- JOHNSON, G. E., A. VAN DIJK et C. M. SAKAMOTO, 1987. The use of AVHRR data in operational agricultural assessment in Africa. —Geocarto International, n° 1, p. 41-60.
- JUSTICE, C. O. et P. HIERNAUX, 1986. Monitoring the grasslands of the Sahel using NOAA AVHRR data : Niger 1983. —International Journal of Remote Sensing, n° 7/11, p. 1475-1498.
- MARKHAM, B., D. KIMES, C. TUCKER et J. MC MURTREY, 1981. Temporal spectral response of a corn canopy. —Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, n° 48/11, p. 1599-1605.
- MONTEITH, J. L., 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. —Journal of Applied Ecology, n° 9, p. 747-766.
- PINTER, P., R. JACKSON, S. IDSO et R. REGINATO, 1981. Multidate spectral reflectance as predictors of yield in water stressed wheat and barley. —International Journal of Remote Sensing, n° 2/1, p. 43-48.
- SELLERS, P. J., 1985. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. —International Journal of Remote Sensing, n° 6/8, p. 1335-1372.
- SELLERS, P. J., 1987. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. II. The role of biophysics in the linearity of their interdependence. —Remote Sensing of Environment, n° 21, p. 143-183.
- TUCKER, C. J., B. HOLBEN, J. ELGIN et J. MC MURTREY, 1980. Relationship of spectral data to grain yield variation. —Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, n° 46/5, p. 657-666.

- TUCKER, C. J., C. VANPRAET, E. BOERWINKER et A. GASTON, 1983. Satellite remote sensing, of total dry matter production in the senegalese Sahel. —Remote Sensing of Environment, n° 13, p. 461-474.
- TUCKER, C. J., C. JUSTICE et S. PRINCE, 1986. Monitoring the grasslands of the Sahel 1984-1985. —International Journal of Remote Sensing, n° 7/11, p. 1571-1582.
- WARREN-WILSON, J., 1967. Ecological data on dry matter production by plants and plant communities. —in Bradley et Denmead (réd.). The collection and processing of field data. John Wiley & Sons, Inc., New York, p. 77-123.
- WARREN-WILSON, J., 1969. Maximum yield potential. —Proceedings of the symposium on transition from extensive to intensive agriculture with fertilizers, International Potash Institute, Berne, p. 34-56.

## **7 Abréviations citées dans le texte**

Centre AGRHYMET : centre régional de formation et d'application en agrométéorologie et hydrologie opérationnelle, dépendant du CILSS et basé à Niamey (Niger).

AVHRR : Advanced Very High Resolution Radiometer : radiomètre imageur ayant 1,1 km de résolution au sol au nadir, et muni de 5 bandes spectrales dans le visible, le proche infrarouge, le moyen infrarouge et l'infrarouge thermique.

CILSS : Comité permanent inter-États de lutte contre la sécheresse au Sahel. Cet organisme regroupe neuf pays de l'Afrique occidentale soudano-sahélienne et a son siège à Ouagadougou (Burkina Faso).

DIAPER : Projet Diagnostic permanent, projet du CILSS financé par le Fonds européen de développement, ayant son siège à Ouagadougou et visant à l'amélioration des systèmes traditionnels d'enquête.

GAC : Global Area Coverage : données fournies par l'instrument AVHRR avec une résolution dégradée à environ quatre kilomètres au nadir.

NDVI : Normalised Difference Vegetation Index : indice de végétation de la différence normalisée, obtenu par la formule suivante :  $NDVI = (PIR - R) / (PIR + R)$ , où PIR et R sont respectivement les bandes spectrales d'AVHRR dans le proche infrarouge et le rouge.

NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration, administration des États-Unis d'Amérique pour la surveillance atmosphérique et océanographique.

USAID : United States Agency for International Development, administration des États-Unis d'Amérique pour le développement international.



# 3

## **Intégration de données multisources pour l'étude du système hydrographique du delta de la Médjerda et de la sebkhet er Riana**

MOHAMED RACHED BOUSSEMA

*École nationale d'ingénieurs de Tunis, B. P. 37, 1002 Tunis-Belvédère, Tunisie*

### **Résumé**

Ce texte décrit une méthode permettant d'étudier les ressources hydrographiques d'une région. Cette méthode s'appuie sur l'intégration de données multisources rassemblées dans une base de données géocodées. Les données multisources comprennent celles produites par numérisation de cartes existantes de la zone étudiée et celles obtenues par satellites de télédétection. La zone objet de notre investigation, située dans la région de Tunis, est délimitée par le système hydrographique du delta de la Médjerda et de la sebkhet er Riana. La méthode suivie consiste en la numérisation des cartes existantes, la visualisation, le nettoyage et la transformation des données numérisées et l'intégration de ces données à celles de SPOT. L'objectif est d'utiliser conjointement toutes ces données afin d'obtenir une cartographie de l'hydrographie étudiée.

### **1 Introduction**

Dans tout projet de lutte contre la sécheresse concernant une région, il est important d'évaluer les ressources hydrographiques de cette dernière. Aujourd'hui, la télédétection apporte une aide considérable dans la cartographie de ces ressources. Cependant, bien que de nombreux problèmes parfois très complexes aient été résolus avec succès par la télédétection, beaucoup d'autres ont montré ses limites quand elle est appliquée seule. Les chercheurs se sont tournés

alors vers les systèmes d'information géographique (SIG). Notre approche est de créer une base de données géocodées s'appuyant sur des données de télédétection. Celles-ci sont aujourd'hui diverses, enregistrées par des satellites et des capteurs différents et caractérisées par des résolutions spatiales, spectrales, radiométriques et temporelles très variées. Se pose alors le problème crucial de l'intégration des données de télédétection avec d'autres données acquises pour former un SIG. Ces dernières peuvent provenir de sources différentes telles que des documents cartographiques ou répertoires existants mais elles doivent être numériques (Boussema, 1987).

Après une brève description de la zone d'étude et des données utilisées, nous tenterons d'exposer la méthode adoptée et commenterons les résultats obtenus.

## 2 Données de l'étude

### 2.1 Localisation géographique

La zone choisie pour servir de cadre à cette étude est celle du système hydrographique du delta de la Médjerda et de la sebkhet er Riana (fig. 1). Elle est située dans la partie nord-est de la Tunisie, au nord de la capitale, Tunis, s'étendant entre 10°00' et 10°50' de longitude est et entre 36°50' et 37°10' de latitude nord. Cela englobe une partie du golfe de Tunis.

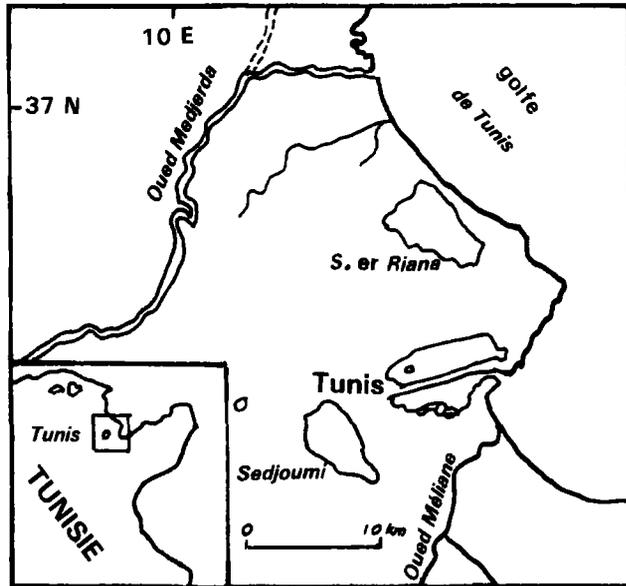


Figure 1. Situation géographique de la zone étudiée

### 2.2 Description générale

Lors d'une précédente étude n'utilisant que des données Landsat-MSS (Boussema *et al.*, 1988), outre le «lac» de Tunis et la sebkhet es Sedjoumi, nous avons constaté que la zone délimitée par la Médjerda au nord et la sebkhet er Riana au sud présente des caractéristiques

assez particulières et une hydrographie assez complexe qui en font un système hydrographique intéressant à étudier. La sebkhet er Riana est littorale, située vers 4-7 m d'altitude et séparée du golfe de Tunis par un mince cordon dunaire. La Médjerda, qui est le fleuve le plus important de la Tunisie, est pérenne, déverse d'importantes quantités de sédiments dans le golfe et présente une structure deltaïque à son embouchure. Entre les deux s'enclave une plaine d'aspect inondable et lagunaire.

La côte, en l'absence de marées significatives, semble être influencée par une dérive littorale nord-sud, par la Médjerda et par la sebkhet er Riana. Elle est de nature sableuse.

Toute la zone reçoit en moyenne entre 400 et 600 mm de pluies par an, de 60 à 100 jours pendant la période de septembre à mai.

## **2.3 Acquisition des données**

### **2.3.1 Données de télédétection**

Le système hydrographique a déjà été étudié (Boussema *et al.*, 1988) à l'aide d'images Landsat-MSS, l'une d'hiver (26/01/77) et l'autre d'été (19/07/81). La présente étude est basée sur l'image SPOT-XS, 65-276, d'angle de visée 2°, de niveau 1B, datée du 9 septembre 1987 (fig. coul. 3-2), soit plus de dix ans après la première image. Ce passage d'une résolution spatiale de 80 m environ à une résolution de 20 m a été d'un grand intérêt.

### **2.3.2 Données numérisées**

Dans le cadre d'un projet en cours de réalisation, toute la topographie, la géologie, la pédologie, l'occupation du sol et les limites administratives de la région de Tunis ont été numérisées (tableau I). Les données relatives à la zone d'étude ont été extraites de ces 19 fichiers.

Les données topographiques comprennent les courbes de niveau avec des équidistances de 5 m à l'échelle du 1:25 000 et de 10 m au 1:50 000, et les points cotés (fig. coul. 3-3).

Les données relatives à l'occupation du sol comprennent (fig. coul. 3-4) :

a) le réseau hydrographique : les oueds, les sebkhas, les dunes de sable, les limites de côte, les fossés et les aqueducs; en particulier pour la sebkhet er Riana, il y a eu numérisation des trois «anneaux», de l'étang, des îlots, du canal, des fossés et des stations d'épuration de l'Office national d'assainissement (ONAS);

b) la végétation : les bois, les broussailles, les vergers, les vignes et les oliverais;

c) les zones urbaines y compris les routes de bonne viabilité et les voies de chemin de fer.

Les données administratives relatives aux trois gouvernorats de la région (Tunis, Ariana et Ben-Arous) et à toutes leurs délégations, les données géologiques et pédologiques n'ont pas été utilisées dans cette étude.

## **3 Méthode**

### **3.1 Intégration des données**

Il a déjà été mentionné que la base de données géocodées était produite par la numérisation de produits cartographiques à différentes échelles, précisions et origines. Cette numérisation est caractérisée par :

**Tableau I.** Données numérisées

N°	Fichier	Octets	Nature	Document numérisé
1	GOULET.DIG	1 074 708	Topographie	La Goulette 1:50 000
2	TUNIS.DIG	2 529 549	Topographie	Tunis 1:50 000
3	ARSEC.DIG	889 785	Topographie	Ariana S-E 1:25 000
4	ARNEC.DIG	371 925	Topographie	Ariana N-E 1:25 000
5	MASOC.DIG	402 300	Topographie	La Marsa S-O 1:25 000
6	MANOC.DIG	51 300	Topographie	La Marsa N-O 1:25 000
7	MASOP.DIG	315 252	Occupation du sol	La Marsa S-O 1:25 000
8	MANOP.DIG	42 822	Occupation du sol	La Marsa N-O 1:25 000
9	ARNEP.DIG	119 988	Occupation du sol	Ariana N-E 1:25 000
10	ARSEP.DIG	677 106	Occupation du sol	Ariana S-E 1:25 000
11	TUNIP.DIG	305 024	Occupation du sol	Tunis 1:50 000
12	GEOLCB.DIG	42 624	Géologie	Cap Bon 1:200 000
13	GEOLGL.DIG	126 080	Géologie	La Goulette 1:200 000
14	GEOLBZ.DIG	80 768	Géologie	Bizerte 1:200 000
15	GEOLTN.DIG	52 736	Géologie	Tunis 1:200 000
16	ARGEOL.DIG	200 064	Géologie	Ariana 1:50 000
17	PEDOTN.DIG	145 792	Pédologie	Tunis 1:200 000
18	PEDOBZ.DIG	121 472	Pédologie	Bizerte 1:200 000
19	ADMIN.DIG	29 568	Limites admin.	Découpage administratif au 1:200 000

a) le fait que les données se réfèrent toutes à la même projection cartographique qui est le Lambert Nord Tunisie;

b) le fait que les données se trouvent toutes dans un format vecteur, sous forme de coordonnées X, Y et Z, où Z désigne tantôt l'altitude, tantôt une valeur thématique.

Par conséquent, ces données n'ont pas à être corrigées géométriquement mais ont à être transformées dans un format maillé (ou raster) afin qu'elles puissent être visualisées sous forme d'images.

Les images SPOT, au contraire, devaient subir seulement une correction géométrique afin qu'elles puissent se superposer aux cartes, donc aux données numérisées.

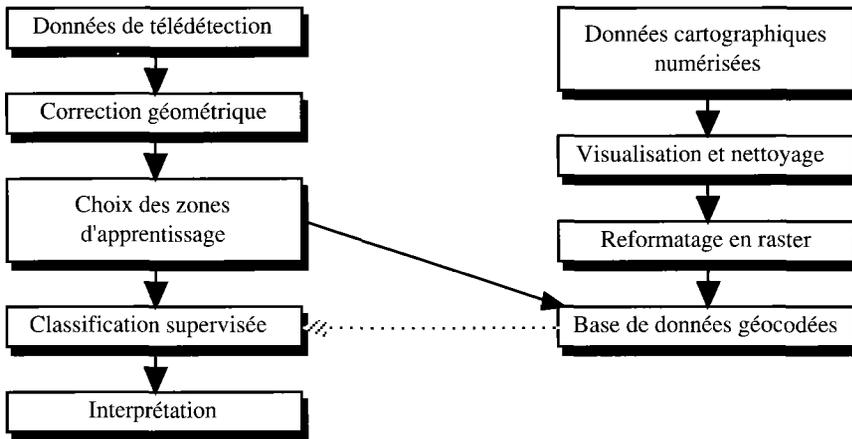
La base de données ainsi constituée comprend 679 lignes, 1000 pixels par ligne et 15 canaux (tableau II).

La démarche globale est présentée à la figure 5.

Le problème d'intégration se produit quand il y a un risque pour qu'il n'y ait pas de juxtaposition spatiale parfaite de la partie image ainsi placée dans la base de données et les polygones cartographiques voisins. La méthode utilisée pour effectuer cette intégration est celle de trouver d'abord la meilleure position convenable du polygone image sur la carte en s'aidant d'une correction géométrique avec un polynôme d'ordre 5, ensuite de le placer dans la base de données. Si nous avons à intégrer en plus des données Landsat MSS ou TM, l'idéal serait de formater les différents ensembles de données approximativement à la même dimension de pixels avant d'effectuer la registration (Chavez et Guptil, 1986).

**Tableau II.** Base de données images

Désignation	Nombre de canaux
Image SPOT	3
Topographie	1
Occupation du sol	1
Limites administratives	2
Composantes principales	6
Classifications	2



**Figure 5.** Démarche globale

### 3.2 Classifications

L'étape suivante a pour but de décrire et d'inventorier les structures hydrographiques à partir de la base de données géocodées. Cela nécessite d'effectuer quelques traitements d'images préalables. D'abord, la présence de données multisources impose leur mélange, ou combinaison, par l'analyse numérique ou visuelle. Dans une étude précédente (Boussema, 1983), nous préconisons l'utilisation des méthodes factorielles afin d'étudier les corrélations entre les différents types de données. Ici, nous nous sommes contentés d'une analyse en composantes principales qui a pour but à la fois de réduire la dimensionalité de l'image et d'améliorer cette dernière. À partir de la visualisation des composantes principales et des données numérisées, des zones d'apprentissage ont été sélectionnées afin de pouvoir effectuer une classification supervisée par la méthode du maximum de vraisemblance. L'interprétation des résultats de cette classification a conduit à l'établissement d'une légende spécifique à l'hydrographie de la région étudiée (fig. coul. 3-6).

### 3.3 Interprétations

Contrairement à l'utilisation des données multispectrales Landsat seules (Boussema *et al.*, 1988), l'apport des données SPOT-XS et des données numérisées a permis de dégager les constatations principales suivantes.

La flèche autrefois située à l'embouchure de la Médjerda a disparu et sa partie sud a été remblayée par des sédiments. Cette embouchure a subi plusieurs changements constatés par Paskoff (1978) à partir de la carte au 1:50 000 imprimée en 1891 et celle révisée en 1935, et à partir des photographies aériennes prises successivement en 1948, 1962 et 1974. Depuis, il y a eu notre apport à l'aide des images satellitaires Landsat et SPOT. L'image SPOT permet la visualisation d'un grand nombre de détails hydrographiques, parmi lesquels d'anciens méandres. Elle permet aussi la bonne description de la côte et en particulier des plages et des dunes de sable. Elle permet enfin une meilleure description des «anneaux» et des îlots se trouvant dans la sebkhet er Riana ainsi que du canal d'évacuation de la station d'épuration de l'ONAS et de celui reliant la sebkha à la mer.

## 4 Conclusion

Bien que la région étudiée ne soit pas particulièrement menacée par la sécheresse, il est évident que la méthode présentée pourrait être appliquée dans d'autres cas. Elle a pour mérite de disposer d'une information quantitative et d'une base de données géocodées qui permettraient en particulier de suivre le phénomène de la sécheresse afin de pouvoir mieux le maîtriser. Un autre mérite est que toute la procédure a été réalisée sur un système à base de micro-ordinateur.

## 5 Remerciements

Mes remerciements s'adressent au professeur Fernand Verger, directeur du laboratoire IMAGEO, à Jean-Marie Dubois du CARTEL et à l'AUPELF-UREF pour m'avoir aidé à réaliser ce travail et à le présenter.

## 6 Références

- BOUSSEMA, M. R., 1983. Factorial Analysis of Correspondences applied to Landsat Data. —9th International Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data, Purdue University, USA.
- BOUSSEMA, M. R., 1987. Système d'analyse multidimensionnelle d'images multisources. —Premier colloque maghrébin sur les modèles numériques de l'ingénieur, Alger, 22-24 novembre 1987.
- BOUSSEMA, M. R., B. ROUI et J. L. BALLAIS, 1988. Analyse par télédétection de l'hydrographie de la région de Tunis (Tunisie). —Photo-interprétation, n° 88-6, p. 11-18.
- CHAVEZ, P. S. et S. C. GUPTIL, 1986. Satellite Image Mapping, Achievement and Prospects. — Séminaire Euro-Carto V, Paris.
- PASKOFF, R., 1978. Évolution de l'embouchure de la Médjerda (Tunisie). —Photo-interprétation, n° 78-5, p. 23-31.

## 4

# **L'approche du Centre de recherches pour le développement international dans la lutte contre la désertification en Afrique et l'apport de son programme en cartographie et télédétection**

ALIOUNE B. CAMARA\*, GILLES CLICHE\*\* et ROBERT VALANTIN\*\*

\*CRDI, B. P. 11 007, CD Annexe, Dakar, Sénégal

\*\*CRDI, B. P. 8 500, Ottawa, Ontario, Canada K1G 3H9

### **Résumé**

La dégradation de l'environnement et ses nombreuses implications sociales constituent un des axes prioritaires des projets financés par les différentes divisions du Centre de recherches pour le développement international (CRDI) en Afrique sahélo-saharienne. Dans le souci d'une approche intégrée et plus efficiente de ces actions, le Bureau régional pour l'Afrique centrale et occidentale du CRDI (BRACO) travaille à la mise en oeuvre d'un programme multidisciplinaire. Ce programme vise à encourager une recherche participative répondant aux besoins de populations cibles bien identifiées et circonscrite dans des localités représentatives des trois zones sahélo-saharienne, sahélo-soudanienne et soudanienne. Cet article présente l'expérience propre du CRDI ainsi que le plan d'action envisagé pour la mise en oeuvre du programme régional sur la désertification en fonction des apports respectifs de ses différentes divisions. La participation et les activités de sa Division des sciences de l'information et, en particulier, celles de son programme en cartographie et télédétection sont décrites dans une deuxième partie.

## **1 Introduction**

Les conséquences des années successives de sécheresse qui ont frappé de nombreux pays africains particulièrement au Sahel ainsi que la dégradation continue de l'environnement et les répercussions des activités humaines sur les ressources naturelles de ces pays ont constitué, au cours de ces deux dernières décennies, une part importante des préoccupations de recherche présentes dans de nombreux projets auxquels le Centre de recherches pour le développement international (CRDI) a apporté sa contribution financière et technique dans cette région de l'Afrique de l'Ouest.

Créé en 1970 par le Parlement canadien en réponse à la prise de conscience de l'absence de capacités scientifiques nationales dans la majorité des pays en développement et au besoin aigu d'application des sciences et de la technologie aux problèmes de développement particuliers de ces pays, le CRDI a pour mandat d'appuyer et de stimuler la recherche entreprise par ces pays pour leur bénéfice propre (CRDI, 1989). Les domaines d'application de l'assistance du CRDI sont regroupés en sept grandes catégories représentées chacune par une division de programme : sciences de l'agriculture, de l'alimentation et de la nutrition; sciences de la santé; sciences de l'information; sciences sociales; sciences de la Terre et du génie; bourses et communications. En plus de son siège social établi à Ottawa, au Canada, le CRDI compte six bureaux régionaux répartis entre l'Afrique, l'Amérique Latine et l'Asie. En Afrique, les bureaux sont situés respectivement à Dakar pour les pays d'Afrique occidentale et centrale, à Nairobi pour ceux d'Afrique orientale et australe, et au Caire pour l'Afrique du Nord et le Moyen-Orient.

Les bureaux régionaux jouent un rôle essentiel dans le processus de planification et de programmation du CRDI dans la mesure où ils élaborent les stratégies devant aider à déterminer les programmes du CRDI dans ces régions. Ainsi, ces bureaux sont encouragés à développer des programmes régionaux permettant une approche cohérente à la solution des problèmes communs à une région géographique ou à un aspect particulier du développement. C'est dans ce cadre que le Bureau régional pour l'Afrique centrale et occidentale (BRACO) a pris l'initiative de promouvoir un programme interdivisionnel sur la désertification au Sahel qui appuiera des projets de recherche à être exécutés par des structures nationales et régionales, gouvernementales ou non gouvernementales, actives dans la lutte contre ce phénomène dans le Sahel.

La première partie de notre communication explique l'approche proposée dans ce programme régional au regard des expériences passées en matière de gestion de ressources naturelles au Sahel. Elle sera complétée par une deuxième partie portant sur la participation et les activités de la Division des sciences de l'information et, en particulier, celles de son programme en cartographie et télédétection.

## **2 Le programme régional du CRDI sur la désertification au Sahel**

### **2.1 Bref aperçu sur la désertification au Sahel**

Depuis deux décennies, le Sahel a connu des calamités naturelles qui ont mis en péril à plusieurs reprises son potentiel de développement. Présentement, les pays de la région se trouvent confrontés à des déficits alimentaires quasi chroniques. Les systèmes traditionnels de production alimentaire, ayant évolué avec le temps, se prêtent bien aux caractéristiques physiques et aux ressources limitées de la région mais ils ne sont plus adaptés à la croissance

rapide des populations et à la détérioration de l'environnement. Dans moins de 60 ans (en l'an 2050), au rythme actuel de croissance, la population de la région aura quadruplé pour atteindre 136 millions d'habitants (FAO, 1985).

Les perturbations climatiques enregistrées au Sahel au cours de ces deux décennies et leurs répercussions sur l'environnement perceptibles à travers le processus continu de désertification ne constituent pas une nouveauté dans la longue histoire de cette région. De nombreux rapports des administrateurs coloniaux décrivent avec force détails le processus de dégradation de l'environnement intervenu au début du siècle, notamment lors de la sévère période de sécheresse en 1910-1918 (Freudenberger, 1989a).

Ces situations apparues au Sahel ont particulièrement retenu l'attention des spécialistes qui ont consacré une documentation abondante à la désertification dont on trouve de remarquables synthèses (Kotschi *et al.*, 1986; United Nations, 1977).

La désertification peut être définie comme un «processus de dégradation de l'environnement à l'intérieur et autour des terres arides, résultant soit d'activités humaines, de variations climatiques, ou d'une combinaison des deux» (Glantz, 1980). Par Sahel, nous entendons ici la région géographique comprise entre les isohyètes 200 et 600 mm de pluie. Cette définition large de la région du Sahel recouvre plusieurs situations climatiques si l'on considère les définitions plus précises des zones saharienne (100 à 200 mm), sahélo-saharienne (200 à 300 mm), sahélienne au sens strict (300 à 500 mm) et sahélo-soudanienne (500 à 800 mm) (Freudenberger, 1989a).

## **2.2 Les expériences de lutte contre la désertification au Sahel et les leçons à tirer pour le programme régional du CRDI**

Depuis la période coloniale, les autorités ont été amenées à conduire des actions de lutte contre la désertification au Sahel. Les pratiques contemporaines tirent pour une large part leur origine de cette période coloniale en ce sens qu'il y a une remarquable continuité dans les approches passées et celles en cours (Freudenberger, 1989a). Cette continuité se retrouve dans le fait que les actions entreprises ont été conçues par les gouvernements et ont rarement impliqué les populations rurales. Aussi, celles-ci ont-elles rarement appliqué les techniques dont certaines leur étaient imposées durant la période coloniale. Un observateur notait déjà que «toutes les initiatives ne pourront porter véritablement leurs fruits qu'avec l'adhésion de la masse paysanne, ce qui pose le problème de son éducation» (Pehaut, 1961).

Au vu des résultats et des expériences antérieures, la leçon majeure à tirer est que les actions de lutte contre la désertification ne doivent pas être isolées, et que les quelques succès obtenus l'ont été grâce à la collaboration entre des agents extérieurs et les populations locales (Freudenberger, 1989a). L'aspect humain de l'introduction et de l'adoption des technologies est également un point crucial car il a des dimensions économiques, institutionnelles et politiques souvent négligées (Energy/Development International, 1988).

Actuellement, les stratégies antérieures sont largement dépassées. L'État n'est plus l'acteur central dans l'implantation des programmes et projets pour répondre à la dégradation de l'environnement du Sahel (Freudenberger, 1989a). D'autres acteurs (organisations non gouvernementales, associations villageoises) ont également un rôle important à jouer. Des organismes comme le Comité permanent inter-États de lutte contre la sécheresse au Sahel (CILSS) considèrent aujourd'hui que «l'engagement volontaire et total des populations est l'axe central autour duquel doit s'organiser la lutte contre la désertification» (Bonfils, 1987).

Les leçons tirées des échecs du passé et de succès limités doivent servir pour les actions futures (Freudenberger, 1989a). Ces expériences ont été prises en compte dans l'approche proposée dans ce programme du CRDI.

### 2.3 L'approche proposée dans le programme régional du CRDI

Au cours de près de deux décennies d'intervention dans le Sahel, le CRDI a collaboré avec différentes institutions nationales, régionales et internationales dans des programmes de recherche, de formation, ou d'information orientés vers la solution des problèmes posés par la désertification au Sahel dans leurs dimensions sociales ou écologiques.

Ainsi, plus de 9,8 millions de dollars canadiens ont été consacrés à des projets relatifs à la réhabilitation de l'environnement et à la production agricole dans les régions semi-arides de l'Afrique de l'Ouest, ce qui correspond à un pourcentage d'au moins 65% des fonds alloués par le CRDI aux projets de recherche dans les pays sahéliens suivants : Burkina Faso, Cap Vert, Gambie, Mali, Mauritanie, Niger, Sénégal, Tchad (Freudenberger, 1989a). D'autres fonds non moins importants ont été consacrés aux recherches socio-économiques avec des projets sur les migrations et études de la population en général, sur les politiques de santé publique ou sur l'évaluation de la situation nutritionnelle dans les régions semi-arides.

L'adoption d'un programme régional sur la désertification au Sahel ne constitue donc pas pour le CRDI une nouvelle orientation, mais plutôt la concrétisation de l'importance accordée aux problèmes de dégradation de l'environnement au Sahel. Elle devrait se traduire par une plus grande intégration des activités pluridisciplinaires, qui tiennent compte à la fois des dimensions sociales et écologiques de la désertification dans cette région. Dans ce contexte, une attention plus grande devrait être accordée au contexte social qui détermine l'adoption ou le rejet technologique par les populations rurales et urbaines (Freudenberger, 1989a).

Ce programme régional devrait permettre l'introduction de la recherche-action par un processus de forte participation populaire dans la planification, la gestion et l'implantation de la recherche sur les problèmes spécifiques de développement. Cette approche devrait se concrétiser par le choix de zones précises de concentration et de groupes cibles bien identifiés.

Les lignes directrices adoptées par le CRDI pour le développement et l'implantation de ce programme régional mettent l'accent sur :

- la compréhension du phénomène de la désertification, ses causes et ses conséquences, en portant une plus grande attention au contexte social;
- l'identification des options politiques gouvernementales de nature à faciliter les réponses au niveau local à la problématique de la désertification;
- la promotion à travers les organisations de recherche gouvernementales et académiques de technologies qui répondent mieux aux besoins des populations rurales et urbaines; et
- le développement des capacités de recherche des organisations non-gouvernementales actives dans le développement urbain et rural.

Comme indiqué ci-dessus, l'approche proposée dans le futur programme régional vise à promouvoir un modèle de recherche appliquée interdisciplinaire sur la désertification dans des localités spécifiques à savoir des micro-territoires situés dans les zones biogéographiques du Sahel suivantes : saharo-sahélienne, sahélo-soudanienne et soudanienne. Le choix de ces trois zones permet de prendre en compte des niveaux différents de changement environnemental et de mieux comprendre, au-delà de certains traits communs à ces zones, la variété des comportements et des systèmes développés par les populations en fonction des particularités des zones considérées (Freudenberger, 1989b).

Cette approche de concentration sur des micro-territoires correspond à une pratique aujourd'hui courante au Sahel où l'accent est davantage mis sur la promotion des initiatives de développement rural dans des micro-régions socio-écologiques bien définies (Bonfils, 1987; Chaumié, 1985). Un organisme régional comme le Comité permanent inter-États de lutte contre la sécheresse au Sahel (CILSS) préconise de plus en plus une telle approche dans ses programmes à travers des projets visant à favoriser une plus grande collaboration avec

les populations rurales en vue de mieux identifier les besoins de développement et de planifier les actions d'accompagnement (CILSS/Club du Sahel, 1984).

C'est sur la base des lignes directrices décrites ci-dessus que les différentes divisions du CRDI vont collaborer avec les institutions de la région dans l'implantation de ce programme régional. Compte tenu de l'importance que revêt la compréhension du phénomène de la désertification dans ce programme, il est prévu d'accorder une large place à la collecte et à la manipulation des données et d'informations à référence spatiale sur les micro-territoires identifiés dans les différentes zones biogéographiques du Sahel. C'est dans ce cadre qu'interviendra le programme de cartographie et de télédétection de la Division des sciences de l'information.

### **3 La Division des sciences de l'information et son programme de cartographie et télédétection**

Dès sa création en 1970, le CRDI a souligné l'importance des sciences de l'information dans le cadre de ses activités d'appui à la recherche scientifique et technique par les pays en développement.

Outre la mise sur pied par sa Division des sciences de l'information de programmes sur les services et systèmes d'information pour les secteurs socio-économique et scientifique et technique, sur la conception et la diffusion d'un progiciel de gestion de bases de données (MINISIS) et sur le fonctionnement de la bibliothèque du CRDI, cette division opère un programme pour appuyer la recherche et l'expérimentation avec des technologies, des outils et des méthodes d'information différents dans les domaines de l'informatique, de la télématique et de la cartographie et la télédétection. Ce dernier programme, récemment rebaptisé «programme en géomatique», a pour but d'aider les pays en développement à acquérir, gérer, adapter, mettre au point et expérimenter des outils et des méthodes appropriés de manipulation de données et d'informations à référence spatiale. Il s'intéresse plus particulièrement au renforcement de capacités locales de recherche en géomatique par l'appui à des projets visant la maîtrise et le développement d'applications originales à partir de techniques de télédétection, de cartographie automatisée et de système d'information géographique sur des thèmes prioritaires de développement.

Le programme en géomatique a connu une évolution qui s'efforce de suivre, d'une part, les tendances des développements en cartographie et en télédétection et, d'autre part, les efforts de concentration sur des thèmes particuliers d'applications définis par les bureaux régionaux du CRDI, dont le BRACO. Ainsi, de ses activités initiales sur la cartographie thématique traditionnelle, le programme se concentre de plus en plus sur l'appui à des travaux de recherche appliquée en télédétection et système d'information géographique reliée, en Afrique, au thème de la désertification. De concert avec la stratégie mise en oeuvre au BRACO, l'intérêt principal du programme portera sur une participation à des projets multidisciplinaires définis par des institutions locales et faisant appel à une collaboration interdivisionnelle au CRDI. De ces projets devraient émaner des activités visant à généraliser et à regrouper des expériences avec des méthodes et des outils de géomatique de manière que les institutions et pays récipiendaires de notre aide puissent décider de façon plus éclairée si ces techniques peuvent répondre à leurs besoins et, par conséquent, utiliser le mieux possible les maigres ressources à leur disposition.

En Afrique, bien que des efforts se poursuivent pour que plusieurs pays se dotent d'infrastructure adéquate pour utiliser pleinement le potentiel de la géomatique pour leurs

développements, peu d'institutions locales sont habilitées pour entreprendre des travaux de recherche en télédétection et système d'information géographique. Le CRDI n'est pas et ne sera probablement jamais amené à devenir une source de financement importante pour améliorer, de façon significative, l'infrastructure en télédétection d'un pays. Ses moyens financiers et son mandat ne se prêtent pas à de telles entreprises. Ainsi, d'ici à ce que des structures nationales soient solidement en place, le programme en géomatique poursuivra vraisemblablement un appui à des projets exécutés conjointement par des institutions locales et canadiennes. Ce mécanisme d'exécution de projet s'est révélé très dynamique pour le programme en géomatique en Afrique du Nord et de l'Ouest. Il est souhaité que ce mécanisme évoluera vers la collaboration entre institutions de pays voisins à mesure que des structures nationales émergent. Le CRDI se veut un promoteur de la coopération de type Sud-Sud. La modalité de financement privilégiée par le CRDI demeure l'appui à des projets entièrement exécutés par une ou des institutions de pays en développement.

#### **4 Quelques faits saillants du programme en géomatique en Afrique**

Les participants aux Deuxièmes journées scientifiques du réseau thématique de télédétection de l'UREF ont eu l'occasion de se familiariser avec deux projets financés par le programme au Mali et au Maroc. Dans un premier cas, le CRDI apporte un financement à la Direction du génie rural du Mali pour qu'elle exécute, conjointement avec l'Université Laval au Québec (Canada), un projet visant à évaluer la performance d'images SPOT, Landsat-TM et NOAA pour le suivi de l'étalement du fleuve Niger afin d'éventuellement identifier des sites où des aménagements hydro-agricoles pourraient être implantés. Au Maroc, un projet exécuté par l'Institut agronomique et vétérinaire Hassan II de Rabat et le CARTEL de l'Université de Sherbrooke au Québec (Canada) concerne le choix et la calibration de méthodes de télédétection utilisant des données Landsat-TM pour la cartographie pédologique en milieu semi-aride. Ce projet devrait évoluer vers des applications de la télédétection et d'éléments de système d'information géographique dans le domaine de la conservation des sols.

Récemment, le programme en géomatique s'est joint à la Division des sciences de la Terre et du génie du CRDI pour le financement d'un projet de recherche exécuté par l'Université nationale de Côte d'Ivoire à Abidjan et le CARTEL de l'Université de Sherbrooke. Ce projet a pour objectif principal l'évaluation des ressources en eau potable des aquifères discontinus du socle cristallin du bassin versant de la Marahoué en Côte d'Ivoire. En plus de l'utilisation des méthodes classiques d'investigation géologique et hydrogéologique, les techniques de recherche envisagées seront enrichies par l'utilisation de données Landsat-TM et le montage d'une base de données à référence spatiale dans un système d'information géographique. Ce système devrait faciliter la manipulation et l'analyse des données et la présentation des résultats de la recherche.

Un important programme de formation et des éléments de transfert de technologie en télédétection et système d'information géographique sont inclus dans le cadre du projet. En plus des applications pratiques qui découleront du projet en Côte d'Ivoire, sa méthodologie devrait offrir des possibilités d'applications pour d'autres recherches hydrogéologiques dans toute la région du socle cristallin de l'Ouest africain.

Au Nigéria, pour donner suite à un premier projet en télédétection sur la cartographie des ressources du bassin de la Sokoto-Rima (Cliche et Valantin, 1988), les universités de Lagos (Nigéria) et Waterloo (Canada) ont entrepris de poursuivre leur coopération dans la veine des efforts du gouvernement nigérian en ce qui a trait au développement rural intégré. Leur

nouveau projet, financé par le programme en géomatique, se veut très innovateur puisqu'il cherche à générer une méthode pour la production de cartes de capacité au sol à grande échelle à partir de données SPOT, d'informations sur la connaissance locale des paysans et leur perception de l'environnement et de ses problèmes, et sur des mécanismes institutionnels locaux de gestion de l'eau et des terres. Une analyse de ces éléments s'effectuera à l'aide d'un système d'information géographique qui sera également l'outil central du projet pour la production des cartes et résultats finaux. En plus d'une assistance directe au gouvernement local de Sokoto où le projet se déroule, les chercheurs démontreront l'efficacité de leur méthodologie basée sur la géomatique comme point de départ pour assembler une information pertinente en vue de futurs projets intégrés de développement rural. La mise sur pied d'une telle entreprise fait suite à des travaux et des expériences de recherche menés pendant plus de quatre ans par les partenaires du projet dans l'État de Sokoto au Nigéria.

## **5 Conclusion**

Cet aperçu du développement par le BRACO d'une stratégie d'intervention pour stimuler la recherche et la quête de solutions aux problèmes de désertification en Afrique montre jusqu'à quel point le CRDI planifie sa participation aux processus de développement des pays les moins nantis. Cette définition d'un thème de concentration par le CRDI ne remplace cependant en rien la nécessité qu'ont les chercheurs et institutions locales de définir leurs propres priorités et intérêts de recherche. C'est en réponse à des demandes spécifiques de ces institutions que le CRDI intervient par l'entremise d'un financement à des projets de recherche. Certes, la concentration sur un ou des thèmes spécifiques augmente notre habilité à mieux coordonner nos activités et ainsi leur assurer un impact accru. De par sa nature et sa complexité, le thème de la désertification en Afrique requiert des efforts de spécialistes de domaines les plus variés et les plus complémentaires les uns des autres. Ceux du domaine de la géomatique y ont un rôle évident à jouer et le CRDI continuera à stimuler leur pleine participation par un appui à des projets de recherche sur les différentes facettes de ses applications.

## **6 Références**

- BONFILS, M., 1987. Halte à la désertification. —Éditions Karthala, Paris.
- CHAUMIÉ, I., 1985. La gestion de l'environnement dans un pays sahélien. —Les Cahiers de la Recherche-Développement, n° 8, p. 17-24.
- CLICHE, G. et R. VALANTIN, 1988. Remote Sensing Research for Development at IDRC. — Proceedings of the 22nd International Symposium on Remote Sensing of the Environment, ERIM, Abidjan, 20-26 October 1988, p. 369-375.
- CILSS/CLUB DU SAHEL, 1984. Summary report of the regional seminar on Desertification. — Nouakchott, 29 October - 4 November, Sahel CR (85).
- CRDI, 1989. Documentation sur le Centre de recherches pour le développement international. —CRDI, Ottawa.
- ENERGY/DEVELOPMENT INTERNATIONAL, 1988. Opportunities for sustained development : successfull natural ressources management for the Sahel. —USAID, Washington.

- FAO, 1985. Rapport d'une mission de formulation du programme quinquennal de l'Institut du Sahel. —FAO, Rome.
- FREUDENBERGER, M. S., 1989a. Part I : State-of-the-art on desertification. Part II : Plan of action for West Africa Regional Office thrust on desertification. —IDRC/WARO, Dakar.
- FREUDENBERGER, M. S., 1989b. Summary of concept paper : Interdivisional project in the three biogeographical zones. —IDRC/WARO, Dakar.
- GLANTZ, M., 1980. Man, State and the Environment : an inquiry into whether solutions to desertification in the West African Sahel are known but not applied. —Canadian Journal of Development Studies, 19, p. 75-97.
- KOTSCHI, J. *et al.*, 1986. Towards control of desertification in african drylands. —West Germany : sanderpublikation, CEC, BMZ, GTZ, n° 168.
- PEHAUT, Y., 1961. L'arachide au Sénégal. —Les Cahiers d'Outre-Mer, n° 53, p. 5-25.
- UNITED NATIONS, 1977. Secretariat of the Conference on Desertification, Desertification : its causes and consequences. —Pergamon Press, New York.