

5

Estimation de l'évaporation sur sol nu à partir de mesures hyperfréquences

ANDRÉ CHANZY et LAURENT BRUCKLER

Institut national de la recherche agronomique, Station de science du sol, Domaine St-Paul, B. P. 91, 84140 Montfavet, France

Résumé

Nous avons étudié un modèle simple d'estimation de l'évaporation dont les données d'entrée sont l'humidité volumique moyenne de la couche 0-5 cm (θ_s) et la contrainte évaporative : évaporation/évaporation potentielle = $f(\theta_s)$.

Pour déterminer la forme analytique du modèle, nous avons exploité des jeux de données expérimentaux obtenus *in situ* sur des sols argileux, argilo-limoneux et limono-sableux et nous avons généré des jeux de données supplémentaires avec un modèle mécaniste de transfert couplé d'eau et de chaleur nous permettant ainsi d'élargir notre étude à des séquences climatiques et à des profils hydriques initiaux différents. Le modèle est sensible à la nature du sol et en particulier à sa texture. Sur la parcelle argilo-limoneuse, nous avons effectué, simultanément aux mesures *in situ*, des mesures des coefficients de rétrodiffusion des hyperfréquences (σ_0). Après avoir établi la relation $\theta_s = f(\sigma_0)$, nous avons introduit les estimations de teneur en eau obtenues par télédétection comme donnée d'entrée du modèle d'estimation de l'évaporation. Une analyse de sensibilité aux erreurs de mesure sur θ_s a été faite afin d'évaluer les performances d'une telle approche.

1 Introduction

Depuis une décennie environ, les recherches sur l'intérêt de la télédétection hyperfréquences pour le suivi des surfaces agricoles se sont considérablement développées (Ulaby *et al.*, 1978

et 1979; Prévot *et al.*, 1984; Jackson et Schmugge, 1989; Le Toan et Pausader, 1981) et ceci est lié à deux types de raisons : d'une part, sur le plan technologique, les systèmes de mesures hyperfréquences sont des systèmes «tous temps» qui restent opérationnels même en présence d'une couverture nuageuse. D'autre part, les mesures hyperfréquences permettent d'accéder à des variables agronomiques tout à fait pertinentes, qu'il s'agisse de caractéristiques de la biomasse (cas des sols couverts), ou de la teneur en eau de surface (cas des sols nus).

Dans le cas des sols nus, la connaissance de l'humidité de surface des premiers centimètres du sol peut avoir un intérêt direct pour estimer la trafficabilité d'une parcelle agricole par exemple. Mais on peut aussi chercher à savoir dans quelle mesure la connaissance de cette variable d'état (humidité du sol) permet d'accéder à l'estimation des flux de surface, en particulier l'évaporation qui est l'un des termes essentiels et difficile à connaître du bilan hydrique. Une telle information, régulièrement acquise, apparaît être particulièrement intéressante lorsqu'on veut suivre la saison des pluies en milieu tropical ou sub-tropical sur des zones peu couvertes par un réseau d'observations au sol. Pour atteindre cet objectif, deux approches sont alors possibles.

La première consiste à utiliser les estimations de teneur en eau de surface provenant de mesures hyperfréquences comme des conditions aux limites à la surface du sol dans des modèles de transferts sol-atmosphère. Cette approche est réalisable mais en général peu opérationnelle (Witono et Bruckler, 1990). En effet, les modèles de transferts hydriques sol-atmosphère, lorsqu'ils ont une base physique mécaniste, nécessitent souvent la connaissance préliminaire de nombreux paramètres.

La seconde consiste à tenir compte du fait que l'évaporation d'un sol nu est en grande partie régulée par la teneur en eau des couches de surface. Lorsque le sol s'assèche, ces couches forment un écran qui limite l'évaporation (phénomène couramment appelé effet mulch). Un certain nombre d'auteurs (Perrier, 1975; Menenti, 1984) introduisent dans leur modélisation du bilan d'énergie de l'interface sol-atmosphère un terme de résistance du sol pour caractériser cette limitation de l'évaporation. La teneur en eau des premiers centimètres apparaît donc comme une variable particulièrement importante pour l'évaporation d'un sol nu. Il semble donc intéressant d'utiliser directement les teneurs en eau de surface comme des estimateurs de l'évaporation au moyen de modèles plus ou moins simplifiés mais reliant directement un état de surface (teneur en eau) et une demande climatique à un flux.

Ce travail se propose de présenter cette deuxième approche. Nous présenterons la mise au point théorique et expérimentale d'un modèle simplifié de la forme :

$$ETR_j/ETP_j = f(\theta_s) \quad (\text{équation 1})$$

(ETR_j : évaporation réelle journalière, ETP_j : évaporation potentielle journalière) et l'étude de ses performances lorsqu'il est couplé avec des mesures de θ_s obtenues par télédétection hyperfréquences.

2 Matériels et méthodes

2.1 Description des mesures hyperfréquences

Les mesures hyperfréquences ont été effectuées sur un sol limono-argileux par le radar multifréquences et multipolarisations RAMSES IV conçu par le CNES (Centre national d'études spatiales). Le radar était fixé sur une platine couplée au chariot d'une grue de 20 m

de haut. Les surfaces accessibles à la mesure d'un tel dispositif sont de l'ordre de quelques dizaines de mètres carrés.

Plusieurs types de configurations de mesure (fréquence, incidence, polarisation) ont été testés. Nous avons retenu la configuration qui se rapproche le plus des mesures que pourra fournir le futur satellite radar ERS-1 (5,3 GHz, polarisation VV, incidence 23°). Cette configuration est proche de celle optimale pour la mesure de l'humidité (Ulaby *et al.*, 1978).

La confrontation des mesures radar (section efficace de rétrodiffusion, σ_0) et des mesures d'humidité volumique moyenne sur la couche 0-5 cm (θ_s) obtenues au sol fait apparaître une relation linéaire entre ces deux grandeurs (fig. 1). Le radar présente une forte sensibilité à θ_s et le coefficient de corrélation r^2 de la droite de régression $\theta_s = f(\sigma_0)$ est égal à 0,97. Le calcul de l'intervalle de confiance à 95% sur l'estimation de θ_s donne la précision de la mesure de l'humidité volumique égale à $\pm 0,035 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

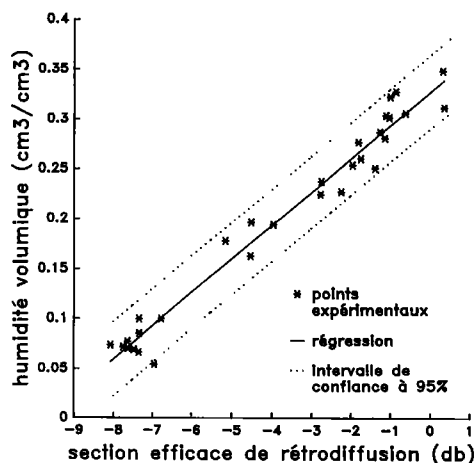


Figure 1. Relation section efficace de rétrodiffusion, humidité volumique de surface moyenne sur la couche 0-5 cm mesurée *in situ*

2.2 Obtention des jeux de données pour la mise au point du modèle simplifié

Pour pouvoir mettre au point le modèle simplifié (équation 1), nous devons obtenir des jeux de données contenant toutes les variables soit ETR_j , ETP_j et θ_s . Nous pouvons accéder à ces grandeurs expérimentalement mais la lourdeur des manipulations que cela nécessite ne nous limiterait qu'à un nombre très réduit de situations. Par conséquent, nous avons choisi de travailler en trois phases :

- une phase expérimentale destinée à fournir des données pour caler un modèle mécaniste de transfert couplé d'eau et de chaleur;
- une phase de génération de données en utilisant le modèle précédemment calé;
- une phase de validation avec un jeu de données expérimental indépendant des précédents.

2.2.1 Obtention des jeux de données de référence *in situ*

Des expérimentations ont été conduites durant vingt jours environ sur trois types de sols variant essentiellement par leur teneur en argile (sol argileux, limon argileux, limon sableux) durant la période allant de juillet à septembre 1988 à Montfavet (France). Pour chaque type de sol, nous avons mesuré les bilans hydriques journaliers par mesures neutroniques et

tensiométriques, l'évolution au cours du temps de l'humidité des premiers centimètres de sol par mesures gravimétriques et des profils de température. Sur l'un des sols (limon argileux), nous avons mesuré le coefficient de rétrodiffusion radar sur une parcelle de 0,1 ha.

Les trois jeux de données obtenus, correspondant aux trois types de sol, ont été utilisés pour le calage d'un modèle mécaniste de transferts couplés d'eau et de chaleur entre le sol et l'atmosphère, en prenant simultanément en compte les transferts en phase liquide et en phase gazeuse (Passerat de Silans *et al.*, 1989). Le calage porte uniquement sur la conductivité hydraulique en milieu non saturé, grandeur très difficilement accessible par la mesure.

Le modèle de transfert couplé d'eau et de chaleur a été calé sur une période de cinq jours puis ensuite validé sur les quinze jours restants.

2.2.2 Génération de données pour la mise au point de modèles simplifiés

Pour chaque type de sol, nous avons simulé, en utilisant le modèle mécaniste préalablement calé et validé (*cf.* 2.2.1), l'évolution complète du bilan hydrique et du bilan d'énergie ainsi que l'évolution des teneurs en eau et des températures dans 60 situations de quinze jours (3 sols, 4 situations initiales d'humidité du sol, 5 climats). Pour chaque situation, le modèle nous donne :

- l'évolution du bilan hydrique (évaporation, variations de stocks, flux en profondeur);
- l'évolution du bilan énergétique (rayonnement net, flux de chaleur sensible et latente, flux de chaleur dans le sol, évaporation potentielle);
- l'évolution des caractéristiques d'état du sol (humidités volumique et massique, potentiels matriciel et total, température);
- l'évolution des caractéristiques climatiques élémentaires (vitesse du vent, température de l'air, pression partielle de vapeur d'eau de l'air).

2.2.3 Validation des modèles simplifiés

Pour tester et valider les modèles simplifiés mis au point dans la partie précédente, une expérimentation spécifique a été réalisée en 1989 sur l'un des types de sol (limon argileux). Sur une parcelle expérimentale de 0,1 ha, et sur une période de quelques jours, nous avons mesuré le bilan hydrique journalier par suivi tensiométrique et neutronique, ainsi que les humidités de surface dans les premiers centimètres du sol et le coefficient de rétrodiffusion hyperfréquences.

3 Résultats

3.1 Qualité du modèle mécaniste générateur de données

Les performances du calage du modèle mécaniste ont été évaluées en comparant les humidités volumiques estimées à différents niveaux et celles obtenues expérimentalement. Nous avons porté dans le tableau I les caractéristiques des droites de régression reliant les valeurs d'humidité expérimentales aux valeurs calculées par le modèle. Pour les trois sols, nous obtenons des pentes comprises entre 0,91 et 0,94. Cela s'explique par un léger biais systématique sur l'estimation de l'humidité à certaines profondeurs. Toutefois, pour chacun des sols, nous n'observons aucune dérive du modèle qui restitue bien la dynamique d'évolution de l'humidité à chaque profondeur (*fig.* 2). Nous estimons, à travers ces résultats, que les valeurs fournies par le modèle mécaniste sont satisfaisantes, ce qui nous permet de

Tableau I. Caractéristiques de la régression entre les valeurs d'humidité calculées par le modèle mécaniste et observées

Sol	Pente	Ordonnée à l'origine	r^2
Limon sableux	0,91	0,013	0,92
Limon argileux	0,94	0,014	0,97
Argile	0,92	0,018	0,97

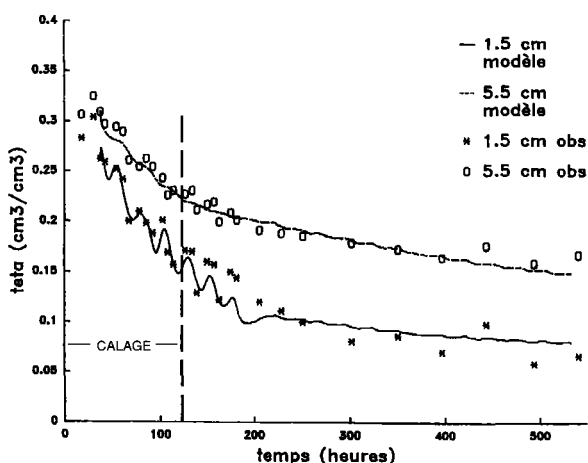


Figure 2. Comparaisons de l'évolution de l'humidité volumique à 1,5 cm et 5,5 cm de profondeur obtenu sur sol limono-argileux

l'utiliser comme générateur de données pour une étude plus systématique du modèle simplifié (équation 1).

3.2 Étude du modèle simplifié

Le modèle mécaniste nous fournit les valeurs d' ETR_j et θ_s . L' ETP_j a été calculée par la formule de Penman en prenant le rayonnement net, le flux de chaleur dans le sol et les coefficients d'échange des flux de chaleur latente et sensible égaux à ceux utilisés pour le calcul de l' ETR_j . Nous avons préféré ce calcul de l'évaporation potentielle à celui de l'évaporation d'une surface de référence saturée (aussi appelée ETP_{0j}). Ce dernier calcul nécessite en effet de faire un certain nombre d'hypothèses sur le flux de chaleur dans le sol qui peut fortement influencer les calculs d'évaporation, surtout pour les faibles demandes climatiques.

Nous avons représenté sur les figures 3, 4 et 5 les rapports journaliers $\text{ETR}_j/\text{ETP}_j$ obtenus pour chaque sol en fonction de l'humidité moyenne de la couche de surface 0-5 cm θ_s au midi solaire.

On constate que les nuages de points correspondant à chaque sols se distinguent les uns des autres. Les sols peu argileux, fortement conducteurs pour les transferts d'eau, satisfont la demande climatique jusqu'à des valeurs de θ_s relativement faibles (0,1-0,15 cm^3/cm^3). Par contre, pour les sols argileux, faiblement conducteurs, on a une nette limitation de l'évaporation par rapport à la demande climatique en dessous de 0,25 cm^3/cm^3 .

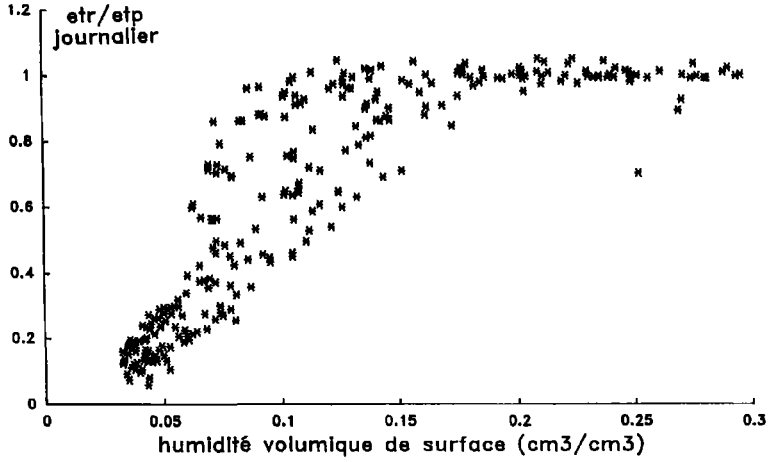


Figure 3. ETR_j/ETP_j en fonction de l'humidité moyenne de la couche 0-5 cm d'un sol limono-sableux

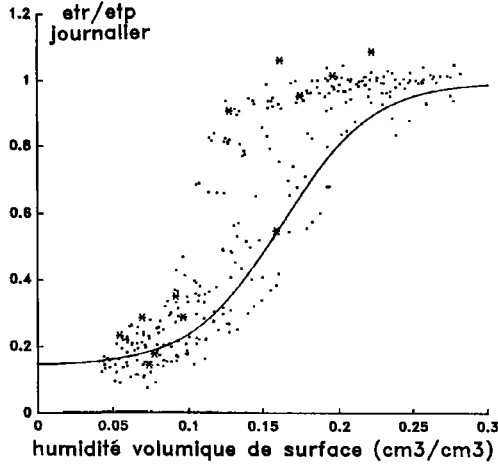


Figure 4. ETR_j/ETP_j en fonction de l'humidité moyenne de la couche 0-5 cm d'un sol limono-argileux (· points générés par le modèle mécaniste, * points expérimentaux, — modèle)

La dispersion des nuages est d'autant plus forte que le taux d'argile est important. La forme des nuages nous suggère d'ajuster le modèle simplifié $ETR_j/ETP_j = f(\theta)$ à une courbe logistique. Nous proposons donc la forme suivante :

$$\frac{ETR_j}{ETP_j} = \frac{\exp(a \cdot \theta_s + b)}{1 + \exp(a \cdot \theta_s + b)} \cdot c + (1 - c) \quad (\text{équation 2})$$

Les coefficients a , b et c ont été ajustés par la méthode du maximum de vraisemblance pour chacun des sols (tableau II) en minimisant les écarts sur l' ETR_j .

Si on analyse de plus près la répartition des points dans les nuages de chaque sol, on remarque qu'un classement se fait en fonction de la demande évaporative (fig. 6). Pour une

Tableau II. Valeurs des paramètres a , b , c du modèle simplifié (équation 2)

Sol	a	b	c
Limon sableux	30,35	-2,918	0,990
Limon argileux	33,36	-5,439	0,855
Argile	29,35	-7,270	0,920

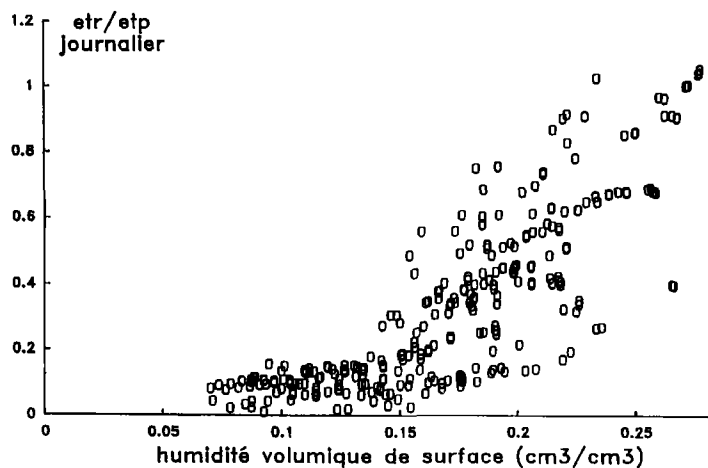


Figure 5. ETR/ETP_j en fonction de l'humidité moyenne de la couche 0-5 cm d'un sol argileux

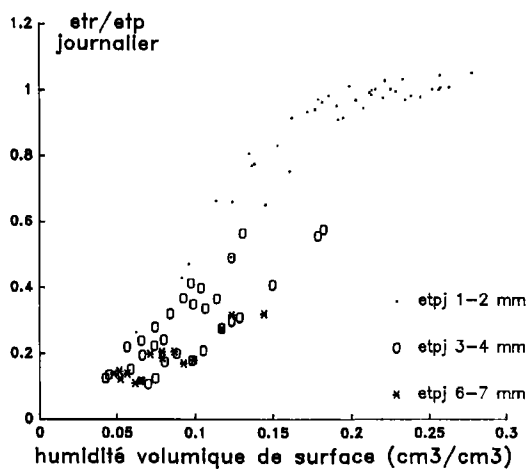


Figure 6. ETR/ETP_j en fonction de l'humidité moyenne de la couche 0-5 cm d'un sol limono-argileux, répartition des points en fonction de la demande climatique

humidité donnée θ_s , le rapport ETR_j/ETP_j décroît lorsque la demande climatique augmente. Ceci s'explique par la vitesse de réalimentation hydrique des couches de surface qui permet de compenser les pertes d'eau dues à l'évaporation lorsque la demande est faible. Par contre, lorsque l' ETP_j est forte, seule une part de la demande est satisfaite.

3.3 Validation expérimentale du modèle

Afin de valider le modèle simplifié, nous avons refait une série de mesures sur le limon argileux au cours d'une séquence climatique présentant une ETP_j variant entre 2 et 3 mm. Les points expérimentaux sont portés sur la figure 4. Ceux-ci se retrouvent dans le nuage de points générés par le modèle mécaniste. Les points expérimentaux se trouvent dans la partie supérieure du nuage ce qui est conforme aux données générées par le modèle mécaniste pour des ETP_j équivalentes.

3.4 Performances du modèle simplifié

Les qualités prédictives du modèle ont, dans un premier temps, été évaluées sur le sol limono-argileux en calculant l'intervalle de confiance à 95% de la régression entre les valeurs d' ETR_j estimées par le modèle simplifié et les valeurs issues du générateur de données. Lorsqu'on fait un ajustement sur l'ensemble des points obtenus sur le sol de Poirson, on obtient l' ETR_j avec une précision de $\pm 0,6$ mm (fig. 7). Cependant, nous ne prenons en compte dans cette démarche que les erreurs liées à la simplicité du modèle, ce qui revient à négliger les erreurs de mesures.

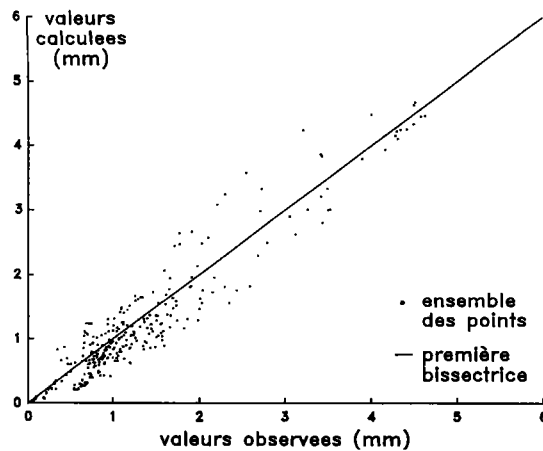


Figure 7. Comparaison de l' ETR_j générée par le modèle mécaniste (valeurs observées) et celle estimée par le modèle simplifié sur le sol limono-argileux

Pour nous mettre dans une situation plus réaliste, nous nous proposons d'étudier la propagation d'une erreur faite sur θ_s , telle qu'on peut l'avoir quand on la mesure par télédétection hyperfréquences, sur l'estimation de l' ETR_j .

Pour cela, nous avons pris une séquence d'évaporation de quinze jours, générée par le modèle mécaniste, obtenue sur un sol limono-argileux. Nous avons supposé que l'erreur de mesure sur l'humidité de surface suit une loi de distribution gaussienne d'espérance θ_s donnée par le modèle mécaniste et d'écart type $0,017 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (valeur de l'écart type obtenu avec la régression $\theta_s = f(\sigma_0)$, cf. fig. 1). Nous avons ensuite effectué 50 tirages aléatoires, selon la loi gaussienne définie précédemment, des 15 valeurs correspondant à la séquence d'évaporation, puis recalculé les ETR_j avec le modèle (équation 2).

Les résultats sont représentés sur les figures 8a et 8b. Nous remarquons qu'en absence d'erreur de mesure, les résultats sont légèrement biaisés. Ceci s'explique par la remarque faite en 3.2 (cf. fig. 6) sur l'organisation du nuage de points en fonction de la contrainte évaporative. La demande climatique moyenne que prend en compte le modèle (équation 2) ne reflète pas exactement celle qui a été retenue pour notre séquence évaporative de quinze jours.

L'incidence des erreurs de mesures sur l'estimation de l' ETR_j varie en fonction du niveau d'humidité. Pour les humidités fortes ($\theta_s > 0,2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) ou faibles ($\theta_s < 0,12 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$), la part d'erreur liée aux erreurs de mesure sur θ_s sur l'estimation de l' ETR_j est d'environ $\pm 0,3-0,4 \text{ mm/j}$. Par contre, celle-ci peut devenir très importante pour les humidités intermédiaires ($\pm 1 \text{ mm/j}$).

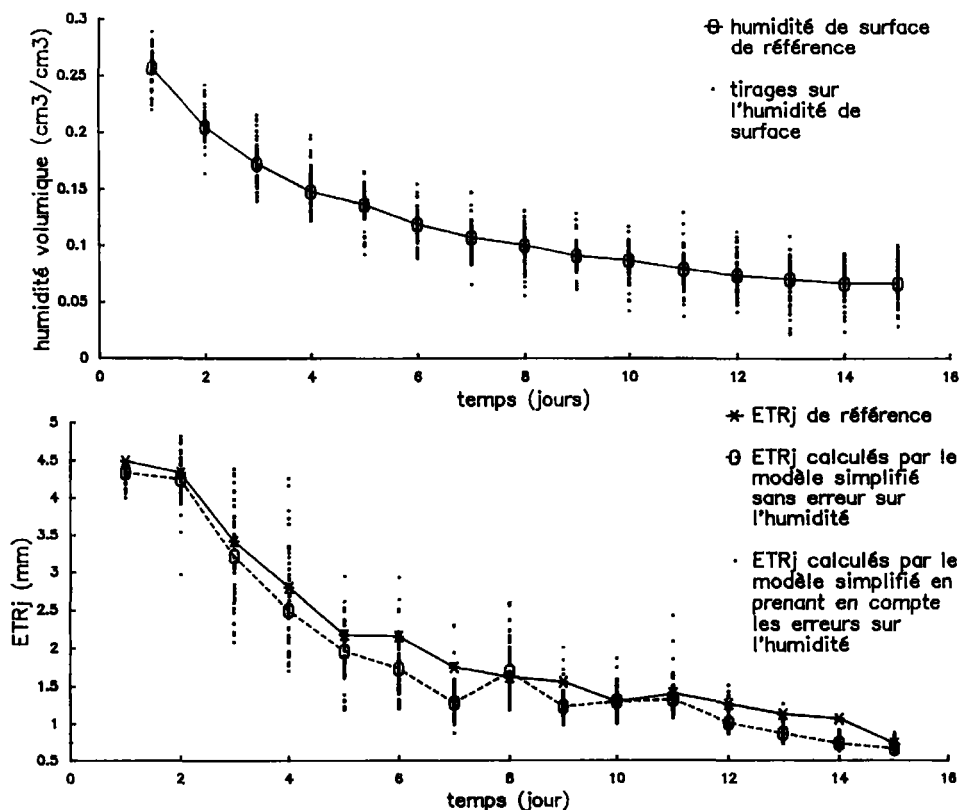


Figure 8. Analyse de la propagation des erreurs de mesure de θ_s sur l'estimation de l' ETR_j

4 Conclusions

Ce travail nous montre à travers une étude théorique (en partie validée) qu'un modèle de la forme $ETR_j = f(\theta_s, \text{sol, climat})$, couplé avec des mesures obtenues par télédétection, permet d'accéder à l'estimation quantitative de l'évaporation lorsqu'on a des informations *a priori* sur la nature du sol.

Dans ce cas, l'erreur sur l'estimation de ETR_j par le modèle se décompose en deux termes : un terme lié à la simplicité du modèle et un terme lié aux erreurs de mesure sur ETP_j et θ_s . Le premier terme d'erreur peut être amélioré par une meilleure prise en compte de la demande évaporative dans l'estimation des paramètres a , b et c du modèle (cf. équation 2). Par contre, le terme lié aux erreurs de mesure ne peut être réduit que par une amélioration de leur précision. Dans l'état actuel des choses, celle-ci nous paraît illusoire. Nous estimons que la relation $\theta_s = f(\sigma_0)$ présentée dans ce travail constitue un optimum, car établie en condition très contrôlée, qui devrait se dégrader avec des systèmes plus opérationnels.

Pour des applications comme le suivi de la saison des pluies dans les zones tropicales ou sub-tropicales une telle méthode semble très adaptée. Celle-ci donne des informations quantitatives sur un pas de temps beaucoup plus court que les méthodes utilisant la radiométrie visible ou infrarouge fortement perturbée par la couverture nuageuse.

Nous sommes toutefois conscients que la méthode nécessite une validation sur des surfaces hétérogènes plus vastes avec des capteurs embarqués.

5 Références

- JACKSON, T. J. et T. J. SCHMUGGE, 1989. Passive microwave remote sensing system for soil moisture : some supporting research. —IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 27, n° 2.
- LE TOAN, T. et M. PAUSADER, 1981. Active microwaves signatures of soil and vegetation covered surfaces. Results and measurements programs. —Colloque international sur les signatures spectrales en télédétection, Avignon, p. 303-313.
- MENENTI, M., 1984. Physical aspects and determination of evaporation in deserts applying remote sensing techniques. —Report 10 (special issue), Institute for Land and Water Management Research (ICW), Wageningen, The Netherlands, 202 p.
- PASSERAT DE SILANS, A., L. BRUCKLER, J. L. THONY et M. VAUCLIN, 1989. Numerical model of coupled heat and water flows during drying in a stratified bare soil. Comparisons with field observations. —Journal of Hydrology, 105, p. 109-138.
- PERRIER, A., 1975. Étude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. III-Évapotranspiration réelle et potentielle des couverts végétaux. —Annales agronomiques, 26 (3), p. 229-243.
- PRÉVOT, L., R. BERNARD, O. TACONET et D. VIDAL MADJAR, 1984. Evaporation from a bare soil evaluated using a bare soil water transfer model and remotely sensed surface soil moisture. —Water Resources Research, 20 (2), p. 311-316.
- ULABY, F. T., P. P. BATLISLAVA et M. C. DOBSON, 1978. Microwave dependance on surface roughness, soil moisture and soil texture, 1: bare soil. —IEEE transactions on Geoscience and Electronics, GE 16, p. 286-295.

- ULABY, F. T., G. A. BRADLEY et M. C. DOBSON, 1979. Microwave dependance on surface roughness, soil moisture and soil texture, 1: vegetation covered soil. —IEEE transactions on Geoscience and Electronics, GE 17 , p. 33-40.
- WITONO, H. et L. BRUCKLER, 1990. Use of remotely sensed soil moisture content as boundary conditions in soil-atmosphere water transport modeling, 1: Field validation of a water flow model. —Water Resources Research, sous presse.

6

Étude intégrée des écosystèmes pastoraux du Sahel malien

FRANÇOIS CUQ et IBTISSEM TOUNSI

Laboratoires IMAGEO-UPR 30 et GDR 103, CNRS, 191, rue Saint-Jacques, 75005 Paris, France, téléphone : 33-1-43-29-31-99, télécopieur : 33-1-43-29-63-83

Résumé

Cet article présente les méthodes et les premiers résultats d'un projet de recherche entrepris par six laboratoires et instituts, français et africains, sur l'étude du fonctionnement des écosystèmes de la savane herbacée sahélienne du Mali. Trois orientations de recherche sont présentées ici : l'analyse du bilan hydrique, la spatialisation des modèles agrométéorologiques et la modélisation fonctionnelle de la production primaire. Ce projet s'inscrit dans une étude à long terme des écosystèmes de savanes dans le cadre du programme international géosphère-biosphère (IGBP).

1 Introduction

Cette étude fait l'objet d'un programme international de collaboration scientifique (PICS) établi en 1988 entre le Comité permanent inter-États de lutte contre la sécheresse au Sahel (CILSS) et le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) français. Ce projet regroupe six laboratoires et instituts de recherche français et africains : l'Institut du Sahel (CILSS), le Groupe de recherche sur les applications de la télédétection (GDR 103/CNRS), l'International Livestock Center for Africa/Centre international pour l'élevage en Afrique (ILCA/CIPEA), le Laboratoire d'étude et de recherche en télédétection satellitaire (LERTS), unité mixte du Centre national d'études spatiales (CNES) et du CNRS, le Laboratoire d'écologie de l'École normale supérieure, et l'antenne ORSTOM du Centre de météorologie spatiale de Lannion.

Cette étude, fondée sur l'analyse du fonctionnement des écosystèmes de savane herbacée, a trois objectifs : l'estimation de la production primaire herbacée en fin de saison des pluies, l'analyse des évolutions saisonnières et interannuelles du couvert végétal et la mise au point d'une chaîne de traitement d'images satellitaires sur les pâturages, implantable dans un centre africain de réception d'images.

Il existe déjà des méthodes d'estimation de biomasse appliquées aux pâturages sahéliens, fondées sur l'établissement d'une relation linéaire entre l'intégration de l'indice de végétation durant la saison des pluies et des mesures de biomasses sèches relevées sur le terrain. Ces méthodes ont l'avantage d'être relativement simples à mettre en oeuvre et présentent donc un aspect opérationnel non négligeable. Cependant, les relations mesurées n'expliquent qu'une part insuffisante des variations constatées, probablement en raison des données mises en relation : en effet, l'indice de végétation fournit une indication sur la réponse de la couverture végétale aux conditions physiques de son environnement et non sur le poids sec de biomasse à l'hectare.

Partant de cette constatation, l'étude que nous avons entreprise est fondée sur l'analyse et la modélisation du fonctionnement des écosystèmes plutôt que sur le calcul d'une relation uniquement statistique. Dans cette perspective, nous avons entrepris la constitution d'un système d'information géographique (SIG) intégrant des données cartographiques, des images satellitaires et des mesures de terrain. À l'aide de ces informations intégrées dans le SIG, nous développons trois démarches complémentaires : l'estimation des paramètres du bilan hydrique, la spatialisation de modèles agrométéorologiques et la modélisation de la production primaire par intégration de l'efficacité de l'interception du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) par la végétation.

2 La constitution du système d'information géographique

Le SIG que nous développons a pour fonction de gérer des bases de données relationnelles, géocodées ou non, de les analyser et de fournir une exploitation cartographique des résultats obtenus.

Le schéma conceptuel décrivant l'organisation du système est fondé sur le modèle individuel de Tardieu (Tardieu *et al.*, 1980). Ce modèle possède deux éléments structurants, l'individu et la relation.

Le SIG est piloté par le logiciel GEOSIG, développé au laboratoire IMAGEO; nous prévoyons prochainement l'implantation du logiciel ARC/INFO pour des raisons de compatibilité et de portabilité. Les modules GEOSIG seront intégrés à ce logiciel.

L'intégration des informations dans le système est réalisée à l'aide d'une phase initiale de prétraitements : chaque type de données (cartographiques, satellitaires, mesures de terrain) nécessite l'emploi d'une chaîne de prétraitements spécifique.

2.1 Le prétraitement des données cartographiques

Deux principaux types de données cartographiques sont intégrés au SIG : des données planimétriques (limites, réseaux et à-plats thématiques) et des données tridimensionnelles (hypsométrie). Ces données sont généralement saisies à partir d'une table à numériser sous forme de points et de contours et vérifiées à l'aide d'un programme d'édition interactive. Les fichiers géocodés sont constitués à l'aide d'utilitaires de passage du mode vectoriel au mode maillé, la continuité des informations géocodées étant obtenue par remplissage de polygones,

interpolation bidimensionnelle ou calcul d'une surface de tendance. Les fichiers thématiques intégrés au SIG sont les suivants :

- fichier des limites administratives;
- fichier du réseau routier;
- zonation agro-écologique du Gourma malien, constitué à partir du document réalisé par l'équipe du CIPEA de Bamako;
- modèle numérique de terrain (MNT) de l'hypsométrie du Sahel malien, interpolé à partir des courbes de niveau et points cotés relevés sur la couverture IGN au 1:200 000.

2.2 Le prétraitement des données satellitaires

Cette étude est fondée sur l'utilisation des données des satellites NOAA et METEOSAT. Les images sont prétraitées à Paris (IMAGEO), à Toulouse (CNES) et à Lannion (ORSTOM) à l'aide de chaînes logicielles normalisées et étalonnées. Les fichiers thématiques extraits de ces images sont les suivants :

1) Estimation des champs de précipitations décennales (Pe), calculés à partir de deux variables extraites des données thermiques de METEOSAT, la fréquence d'occurrence décennale des nuages à sommets froids (FOC) et le maximum décennal de température de brillance (T_{max}), et une variable supplémentaire, la latitude (Lat), destinée à corriger les effets de surestimation et de sous-estimation au nord et au sud de l'isohyète moyen 400 mm (Carn *et al.*, 1989). L'algorithme utilisé est de la forme suivante :

$$Pe = a_0 + a_1 FOC + a_2 T_{max} + a_3 Lat$$

2) Estimation du rayonnement global (RG) décennal, calculé à partir des données METEOSAT. Le RG est estimé à partir d'un modèle de transfert radiatif appliqué sur le canal visible. Une erreur rms de 15 W/m² a été observée entre ces estimations d'irradiance et celles mesurées au sol à l'aide de pyranomètres (Dedieu *et al.*, 1987).

3) Indice de végétation normalisé (NDVI) décennal, calculé à partir des bandes AVHRR 1 et 2 du satellite NOAA (Cuq, 1988).

2.3 Le prétraitement des données de terrain

Les données de terrain, collectées par l'équipe du CIPEA de Bamako, sont publiées sous forme de rapports annuels et concernent 32 sites répartis dans la région du Gourma, au Mali. Ces données sont saisies sous forme numérique et organisées en bases de données documentaires (logiciel dBase III+). La localisation des sites de mesure est réalisée au moyen de systèmes de navigation par satellite (systèmes TRANSIT et GPS) lors de missions de terrain. À cet ensemble de données écologiques est adjoint une banque de signatures spectrales aux longueurs d'ondes des bandes du capteur HRV de SPOT et des bandes AVHRR 1 et 2 de NOAA. Ces signatures spectrales sont acquises sous forme de points de mesure à diverses incidences ou sous forme de profils. Elles concernent à la fois des étendues végétales caractéristiques, l'arrière-plan sol et des étendues sombres (généralement des glaciés) utilisées comme amers radiométriques. Enfin, des mesures photométriques, permettant l'estimation de l'épaisseur optique au-dessus de la zone de mesure, sont collectées quotidiennement afin de permettre la correction des effets liés aux aérosols sur les images NOAA.

3 L'estimation des paramètres du bilan hydrique

L'estimation des paramètres du bilan hydrique a pour objectif d'analyser le fonctionnement et les modalités de l'écoulement de l'eau en fonction de deux variables principales : le relief et la nature des dépôts de surface. La mise au point du modèle est fondée sur l'analyse du MNT de la topographie et sur la constitution d'un fichier des dépôts de surface.

3.1 L'analyse du MNT de la topographie et le calcul de variables géomorphométriques

L'analyse du MNT est fondée sur une hypothèse de modélisation du terrain à l'aide d'un développement polynomial de Taylor à l'ordre 3 (Dupéret, 1989). À partir de ce modèle, on calcule les dérivées premières et secondes par rapport à x et y :

$$a = H'x, b = H'y, c = H''xx, d = H''xy, e = H''yy.$$

À partir de ces cinq coefficients, on peut calculer les variables morphométriques suivantes :

- la pente :

$$p = \arctg \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{a^2 + b^2}}$$

- l'orientation :

$$o = \arccos \frac{-a}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad \text{si } b < 0$$

$$o = -\arccos \frac{-a}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad \text{si } b > 0$$

- la courbure horizontale des lignes de niveau :

$$T_n = \frac{2ab d - c b^2 - e a^2}{(a^2 + b^2)^{\frac{3}{2}}}$$

Ces variables sont utilisées pour décrire la déformation topographique de la surface.

Une méthode d'amincissement en trois dimensions appliquée sur le MNT après suppression des cuvettes parasites permet d'extraire le réseau des interfluves et le réseau des thalwegs. Cette méthode est fondée sur l'emploi d'une séquence de squelettisation et d'ébarbulage réitérée jusqu'à idempotence. À partir du réseau d'interfluves, on peut segmenter le MNT en «mésobassins versants» et installer dans ces bassins le réseau d'écoulement.

3.2 La constitution du fichier des dépôts superficiels

L'écoulement de l'eau sur sol nu est non seulement lié à la topographie mais aussi à la nature des dépôts de surface sur lesquels il s'exerce. Partant de la zonation agro-écologique du Gourma malien, réalisée par le CIPEA de Bamako, nous avons traité par classification des images NOAA acquises durant la saison sèche (février-mars 1987) pour constituer un fichier thématique des dépôts de surface. Les résultats des classifications fournissent une distinction précise des dépôts sableux, principale information utile à l'analyse de l'écoulement. La présence des massifs dunaires n'étant pas prise en compte dans le calcul du MNT, il est en

effet nécessaire de prendre en compte leur présence qui explique en particulier la localisation de la plupart des mares sahéliennes.

3.3 La mise au point du modèle d'écoulement

Le modèle est appliqué sur chaque bassin versant afin d'établir un bilan d'écoulement par zone géomorphologique homogène. En utilisant les champs de précipitations calculés sur les images METEOSAT, on estime en tout point un coefficient d'écoulement-concentration de l'eau en fonction des variables morphométriques associées. L'étalonnage de ce modèle est réalisé à partir des mesures effectuées sur le terrain par l'équipe du CIPEA.

4 Spatialisation des modèles agrométéorologiques

Le but de la modélisation agrométéorologique et statistique de la production primaire est d'estimer une production potentielle fournissant un indicateur des modifications du fonctionnement du système écologique. Deux modèles sont en cours de spatialisation : un modèle fondé sur l'estimation des interactions eau-plantes, dérivé des méthodes agrométéorologiques classiques, et un modèle basé sur l'analyse de la distribution temporelle des précipitations au cours de la saison des pluies (Hierneaux, 1984).

4.1 L'estimation des interactions eau-plantes

La spatialisation des paramètres agrométéorologiques classiques, évapotranspiration potentielle (ETP), évapotranspiration réelle (ETR), évapotranspiration maximale (ETM), indice de satisfaction des besoins en eau (ISBE) et leur mise en relation avec la production primaire relevée sur le terrain, est fondée sur l'emploi de deux types de fichiers : le fichier de l'eau utile à la production, obtenu par l'emploi du modèle d'écoulement décrit plus haut, et le fichier des indices de végétation (NDVI) décennaux NOAA utilisés pour décrire les cycles de végétation intégrés. À partir de profils saisonniers, on peut extraire trois stades principaux : un stade d'installation de la végétation, un stade de croissance et un stade de floraison-fructification.

L'analyse de la répartition temporelle de la production primaire peut être abordée d'une façon similaire en étudiant la répartition spatiale des moments des profils d'indices de végétation intégrés. On peut ainsi analyser la répartition des cumuls d'indices au cours de la saison des pluies.

Une classification réalisée sur quatre moments du cumul des indices de végétation permet d'établir un bilan de la saison des pluies 1986 dans le Gourma (fig. 1). On distingue cinq principaux types décrivant successivement : une saison des pluies marquée par un indice de végétation positif pendant au moins 6 décades (type 1), une saison marquée par un indice de végétation positif pendant 4 à 6 décades (type 2), un type à indice de végétation positif pendant 2 à 4 décades en début de saison des pluies (type 3), un type à indice de végétation positif pendant 2 à 4 décades en fin de saison des pluies (type 4), et enfin un type de saison à indice de végétation positif pendant une seule décade (type 5).

Cette classification met bien en évidence l'hétérogénéité saisonnière du couvert végétal, directement liée à l'extrême variabilité spatiale et temporelle des précipitations.

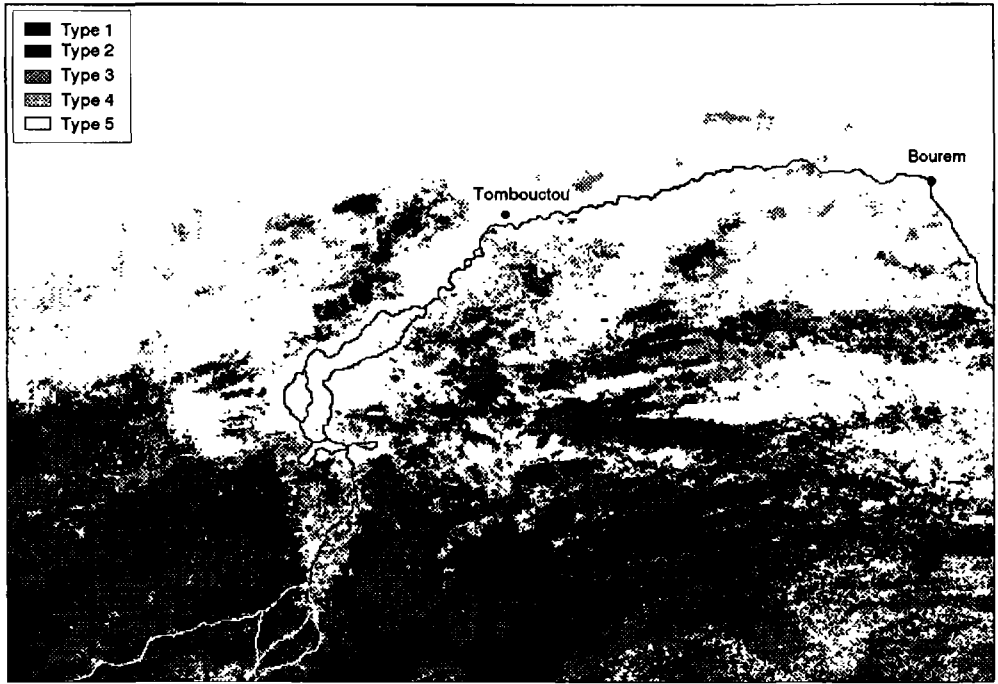


Figure 1. Bilan de la saison des pluies 1986 dans le Gourma malien

4.2 La distribution temporelle des précipitations

L'analyse de la distribution temporelle des précipitations constitue une approche empirique du fonctionnement du système de production. Cette approche est basée sur le repérage d'événements et de périodes pluviométriques durant la saison des pluies (début des pluies, fin des pluies, interruptions, période de pluies régulières, période de pluies non limitantes). La principale difficulté rencontrée pour la spatialisation de ce modèle est l'adaptation au pas de temps décadaire des estimations de précipitations par METEOSAT. En particulier, l'étalonnage des coefficients de production liés au type de début des pluies et à la durée des périodes de pluies régulières ou non limitantes provoque une perte de précision des résultats obtenus.

5 Modélisation fonctionnelle de la production primaire

Le modèle développé est fondé sur l'estimation de l'interception du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) par la végétation et de la production associée à cette interception (Monteith *et al.*, 1977).

La méthode employée pour estimer la production de matière sèche (MS) s'appuie sur la conversion du rayonnement global (RG) en trois coefficients décrivant la proportion de

PAR (e_s) contenu dans le RG, l'efficacité de la photosynthèse (e_b) et l'efficacité de l'interception du PAR (e_i) par la végétation :

$$dMS/dt = RG \cdot e_s \cdot e_b \cdot e_i$$

Le terme e_i peut être ramené à une relation linéaire utilisant l'indice de végétation :

$$e_i = a + b \cdot NDVI$$

L'étalonnage des paramètres a et b est réalisé à partir de mesures réalisées sur le terrain (Loudjani *et al.*, 1990).

6 Résultats et discussion

Les premiers résultats obtenus constituent un étalonnage préliminaire des modèles développés. Ils ont été appliqués, pour la spatialisation des modèles agrométéorologiques, aux mesures effectuées en 1986 et 1987 sur les 32 sites répartis dans le Gourma malien et entretenus par le CIPEA et, pour la modélisation fonctionnelle de la production primaire, sur 143 couples de données «biomasse maximale-pluviométrie annuelle» relevés entre 1958 et 1986 en Afrique de l'Ouest. Les relations obtenues ont donc pour l'instant plus une valeur de test localisé, la prochaine étape de l'étude consistant justement à valider et généraliser les relations mesurées.

En première analyse, les résultats obtenus montrent la cohérence de la démarche employée : la modélisation de la production primaire fondée sur l'interception du PAR et utilisant l'indice de végétation comme indicateur de l'efficacité de cette interception par la végétation doit être confrontée à une analyse des paramètres du bilan hydrique en raison de la forte corrélation entre le NDVI et l'humidité du sol; une estimation précise de la production primaire n'est utile à la compréhension du fonctionnement des écosystèmes que si elle est confrontée à la production potentielle du milieu, afin de tenter de mesurer les changements interannuels.

7 Conclusion

L'étude des écosystèmes pastoraux du Sahel malien représente une approche intégrée pluridisciplinaire. Les méthodes développées et les modes d'interaction entre les équipes de recherche montrent l'intérêt d'un SIG comme interface entre les méthodes physiques, naturalistes et spatiales.

Cette étude, qui doit s'achever en 1992, fournira un outil méthodologique d'analyse du fonctionnement des savanes herbacées, analyse qui doit être poursuivie sur une période suffisamment longue pour étudier les réponses de ces écosystèmes aux perturbations d'origine naturelle et anthropique.

Cette analyse à long terme sera effectuée dans le cadre d'un projet de recherche sur l'analyse de la dynamique des changements de paysages des savanes d'Afrique de l'Ouest, recherche proposée dans le cadre du projet «Changements globaux» - IGBP.

8 Références

- CARN, M., B. DAGORNE, B. GUILLOT et J.-P. LAHUEC, 1989. Estimation des pluies par satellite en temps réel en Afrique sahélo-soudanienne. — *Veille climatique satellitaire*, n° 28, p. 47-54.
- CUQ, F., 1988. Suivi de la production pastorale du Sahel malien par télédétection. — ISLSCP symposium, Niamey.
- DEDIEU, C., P.-Y. DESCHAMPS et Y. KERR, 1987. Satellite estimation of solar irradiance at the surface of the Earth and of surface albedo using a physical model applied to Meteosat data. — *Journal of Climate and Applied Methodology*, vol. 26, n° 1.
- DUPÉRET, A., 1989. Contribution des MNT à la géomorphométrie. — ENSG/IGN et IMAGEO/CNRS, Paris.
- HIERNEAUX, P., 1984. Distribution des pluies et production herbacée au Sahel : une méthode empirique pour caractériser la distribution des précipitations journalières et ses effets sur la production herbacée, premiers résultats acquis sur le Sahel malien. — Document de programme ILCA/CIPEA, n° AZ98, Bamako.
- LOUDJANI, P., J.-C. MENAUT, et A. PODAIRE, 1990. Estimation of above ground primary production over West Africa using AVHRR data. — *Remote Sensing of Environment*, accepté pour publication.
- MONTEITH, J. L. et R. A. KUMAR, 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. — *Phil. Trans. R. Soc., Londres*, B281, p. 277-284.
- TARDIEU, H., D. NANJI et D. PASCOT, 1980. Conception d'un système d'information-construction de la base de données. — Les éditions d'organisation, Paris.

7

Méthode d'évaluation quantitative de la végétation ligneuse en région soudano-sahélienne à partir de données Landsat TM (Burkina Faso)

PIERRE DEFOURNY

*Laboratoire de télédétection, Université catholique de Louvain, place Louis-Pasteur, 3,
1348 Louvain-la-Neuve, Belgique*

Résumé

L'objectif de cette étude est de développer une méthode d'estimation des ressources ligneuses en région tropicale sèche. L'expérience a été menée dans la région de Bobo-Dioulasso au Burkina Faso. La démarche comporte trois étapes. À chaque étape correspond un niveau de perception qui définit l'échelle d'observation et un niveau d'abstraction déterminé par la résolution. La première étape met en relation la surface terrière d'un arbre et la surface de sa couronne. La surface terrière est mesurée au sol et la surface de la couronne est mesurée sur des photographies aériennes à basse altitude. La deuxième étape envisage le passage de l'individu au peuplement. Une méthode numérique d'estimation de recouvrement est mise au point à partir des photographies aériennes numérisées par scanner. Enfin, la dernière étape étudie les relations entre le recouvrement d'une formation et l'information enregistrée au niveau du satellite. Douze indices de télédétection calculés à partir de données du Thematic Mapper sont analysés en détail sur base d'un échantillon de 50 sites de 8 par 8 pixels. L'expérience menée semble démontrer que les données satellitaires peuvent fournir une information quantitative sur la biomasse ligneuse. Une forte corrélation a été observée entre la surface de la couronne d'un arbre et sa surface terrière toutes espèces confondues. Des relations très étroites ont été mises en évidence entre des indices de végétation et le recouvrement chlorophyllien d'une formation naturelle.

1 Introduction

L'évolution accélérée des paysages végétaux naturels en région tropicale menace l'équilibre de nombreux écosystèmes. Tout particulièrement la strate arborée est soumise à une pression croissante liée à la demande en bois de feu, à l'extension des surfaces cultivées, au surpâturage et aux brûlis.

Dans les systèmes traditionnels d'exploitation agricole, les enjeux de la conservation du patrimoine forestier dépassent largement le cadre de la crise énergétique liée aux ressources ligneuses. La dégradation des formations ligneuses se traduit en outre en termes de dégradation des sols, d'accélération du cycle de l'eau et de modifications sensibles des microclimats. Au niveau agricole, cette évolution correspond à une détérioration des conditions de production.

En région soudano-sahélienne, la convergence de plusieurs facteurs de dégradation confère à ce processus une dynamique qui échappe aux méthodes conventionnelles de collecte et de traitement de données (Devineau, 1986; Defourny, 1989). Les méthodes conventionnelles de suivi de végétation ne sont pas à la mesure de l'échelle spatiale du phénomène et leur temps de réponse est peu compatible avec la vitesse d'évolution. Les développements de la technologie spatiale et du traitement d'images permettent d'envisager une évaluation plus opérationnelle de ces phénomènes.

L'objectif de ce travail est de développer une méthode d'estimation des ressources ligneuses en région tropicale sèche. Il ne s'agit pas de remplacer les méthodes d'inventaires forestiers classiques mais de répondre à un besoin d'information indispensable à la gestion rationnelle des ressources renouvelables. L'information forestière opérationnelle sera de nature cartographique présentée de manière intégrée sous forme d'un système d'information géographique rassemblant notamment des données pédologiques, climatiques et démographiques et pourra être mise à jour régulièrement avec un temps de réponse relativement court.

Le niveau d'agrégation de l'information définira l'utilisation qui en sera faite. Les phénomènes de dégradation observés se situent à différents niveaux d'analyse qui vont de la crise locale au processus régional. L'exploitation des données de plusieurs plates-formes satellitaires peut fournir une réponse à des niveaux d'abstraction différents. Pour le Burkina Faso, trois échelles opérationnelles peuvent d'emblée être définies :

- Une information d'action (entre 1:10 000 et 1:50 000): à l'intention de l'agent forestier, ces données doivent être précises et détaillées. Ce document doit permettre une intervention directe sur le paysage.

- Une information de sensibilisation (1:500 000) : à l'intention des responsables nationaux et des bailleurs de fonds, ce document doit être synthétique et représentatif. Il ne fournira que des ordres de grandeur nécessaires à la planification.

- Une information de suivi (1:1 000 000 et plus) : à l'échelle régionale ou subcontinentale; elle a pour but l'étude des changements plus globaux et à plus long terme.

2 Problématique

L'inventaire et la cartographie des formations ligneuses en zone tropicale sèche restent un exercice particulièrement difficile même pour les techniques classiques de dendrométrie et d'inventaire forestier.

La grande diversité des espèces (100 espèces courantes pour le Burkina Faso) et une distribution floristique peu liée au zonage écologique compliquent sensiblement les analyses. À cette importante hétérogénéité interspécifique se combine une variabilité intraspécifique inhabituelle due à l'action de l'homme, aux passages répétés du feu et à l'irrégularité des conditions hydriques.

Le paysage végétal se présente en outre sous forme d'un véritable continuum entre les différentes formations. L'inventaire forestier se heurte également à une imbrication non négligeable du thème ligneux dans plusieurs taxons d'occupation du sol, notamment au niveau des champs plus ou moins arborés.

Face à ces difficultés, la télédétection aéroportée et spatiale présente un certain nombre d'atouts. Elle peut répondre à cette importante hétérogénéité par une forte densité d'échantillonnage. L'abstraction liée à la résolution des capteurs peut réduire les difficultés de classification.

3 Cadre géographique de l'étude

L'expérience a été menée dans la région de Bobo-Dioulasso au Burkina Faso. La zone d'étude centrée sur la forêt classée de Dindéresso se situe à 11° de latitude N et à 4°30' de longitude O (fig. 1).

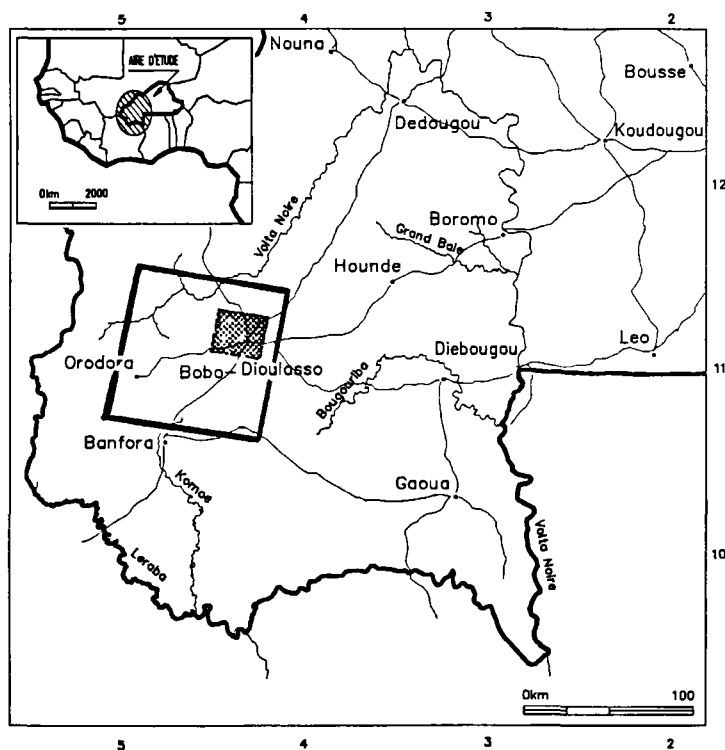


Figure 1. Aire d'étude de Bobo-Dioulasso (Burkina Faso), image Landsat-TM 197-52 du 19 novembre 1987

D'après les subdivisions bioclimatiques d'Aubréville reprises par Guinko (1984), la région est soumise à un climat soudano-guinéen caractérisé par une pluviométrie annuelle moyenne d'environ 1100 mm.

D'une manière générale, la végétation naturelle de la région est une mosaïque de formations ligneuses hautes plus ou moins denses à *Butyrospermum parkii*, *Parkia biglobosa* et *Isoberlinia doka* et de savanes comportant tous les sous-types depuis la savane boisée à la savane herbeuse.

La démarche du travail procède en trois étapes qui vont de l'arbre au peuplement. À chaque étape correspond un niveau de perception qui définit l'échelle d'observation et un niveau d'abstraction déterminé par la résolution. Une hypothèse fondatrice de la méthode est formulée pour chaque étape. Ces hypothèses seront successivement testées à partir des données fournies par différentes plates-formes de télédétection. L'arbre sera appréhendé par la photographie à basse altitude, la placette par la photographie aérienne classique et la formation par les données satellitaires (fig. 2).

La progression pas à pas est sous-tendue par des observations empiriques qui réclament la plus grande rigueur d'observation. Deux missions d'investigation détaillée du terrain servent de référence à la démarche.

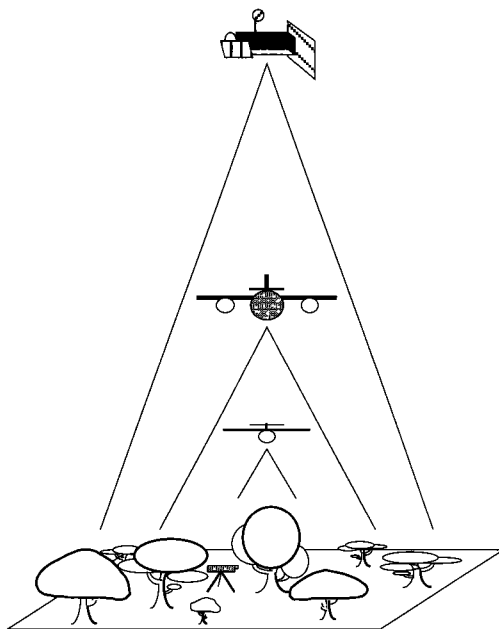


Figure 2. Acquisition des données à partir de plusieurs plates-formes : investigation au sol, vol à basse altitude (1:1 000), couverture aérienne (1:20 000) et enregistrement satellitaire

4 Traitement des données

4.1 Hypothèse scientifique

La première hypothèse constitue une condition nécessaire à toute approche quantitative de la biomasse ligneuse par télédétection. Elle peut se formuler comme suit : «Il existe une

relation biologique non liée à l'espèce entre la biomasse ligneuse aérienne d'un arbre et la surface de sa couronne.»

La biomasse ligneuse aérienne d'un arbre est mesurée par le volume de bois situé au-dessus de la surface du sol. Pour l'estimer, les forestiers procèdent par équations dendrométriques fournissant des tarifs de cubage qui mettent en relation un ou plusieurs paramètres facilement mesurables (diamètre à hauteur d'homme, hauteur, etc.) et le volume mesuré par méthode destructrice. Au Burkina Faso, les tarifs de cubage construits dans le cadre de l'inventaire de la FAO (Cameratti, 1983) font intervenir soit uniquement le diamètre à 1,30 m, soit le diamètre associé à la hauteur totale.

Dans le cadre de ce travail, la biomasse ligneuse aérienne peut donc être estimée à partir de la mesure de la circonférence à 1,30 m transformée en surface terrière. Cette dernière est définie par la projection verticale de la section du tronc à 1,30 m et constitue une variable intéressante à la fois au niveau de l'individu et au niveau du peuplement.

La surface de la couronne définie comme la projection verticale de la couronne de l'arbre est difficilement mesurable avec précision au sol. La photographie aérienne à basse altitude permet d'en faire une estimation tout à fait satisfaisante (Spencer et Hall, 1988; Warren et Dunford, 1986; Epp *et al.*, 1983). La photographie aérienne présente également le grand avantage de pouvoir procéder à un échantillonnage important en rapport avec la diversité des espèces et l'hétérogénéité intraspécifique.

L'ensemble des données ont été collectées au début de novembre 1988, c'est-à-dire en phase de pleine feuillaison pour la strate ligneuse. Un plan d'échantillonnage en grappe a été établi pour rencontrer un maximum d'espèces dans différentes stations, celles les plus représentatives de la région. Sept placettes de 150 m par 150 m réparties en cinq stations écologiques différentes ont été investiguées.

Un vol à basse altitude a fourni une couverture aérienne verticale stéréoscopique (1:1 000). Les prises de vue ont été réalisées à l'aide d'un appareil Nikon FG 20 avec un objectif de 70 mm embarqué dans un Cessna FR 172. L'échelle de prise de vue de chaque placette est calibrée par rapport à un vol photogrammétrique au 1:20 000 (IGB n° 87079-B, 1987). La mesure de la couronne foliaire de chaque individu est effectuée par numérisation sur tablette à numériser sous stéréoscope à miroir Bausch & Lomb.

L'investigation au sol a été réalisée deux jours après la couverture aérienne. Chaque placette a été délimitée avec précision sur les clichés et les arbres numérotés. Pour chaque arbre, on procédait à la localisation exacte au sol, à la mesure de la circonférence à 1,30 m, à l'identification de l'espèce et à l'indication de l'état sanitaire.

Sur les 159 arbres mesurés au sol, 7 individus n'ont pu être identifiés au niveau de l'espèce et 8 couronnes n'ont pu être délimitées à partir des photographies à basse altitude.

L'échantillon complet comprend 151 individus répartis en 27 espèces différentes. La figure 3 présente la distribution de la population de l'échantillon répartis par classe de diamètre.

À partir des 151 individus, une régression linéaire calculée entre la surface terrière et la surface de la couronne par la méthode des moindres carrés fournit un coefficient de détermination de $R^2 = 0,815$. Cependant, l'examen des résidus (ϵ_i , $i = 1, 2, \dots, n$) ne permet pas de vérifier la condition d'homoscédasticité ($V(\epsilon_i) = s^2$). Le non-respect de cette condition limite la valeur prédictive de l'équation particulièrement au niveau des gros diamètres.

Afin d'ajuster une courbe de régression au nuage de points observés, une double transformation logarithmique a été effectuée sur les données. L'adéquation de ce type de régression aux données traduit ce qu'on appelle en biologie, une relation d'allométrie entre la surface terrière et la surface de la couronne.

Les équations des courbes d'ajustement sont du type :

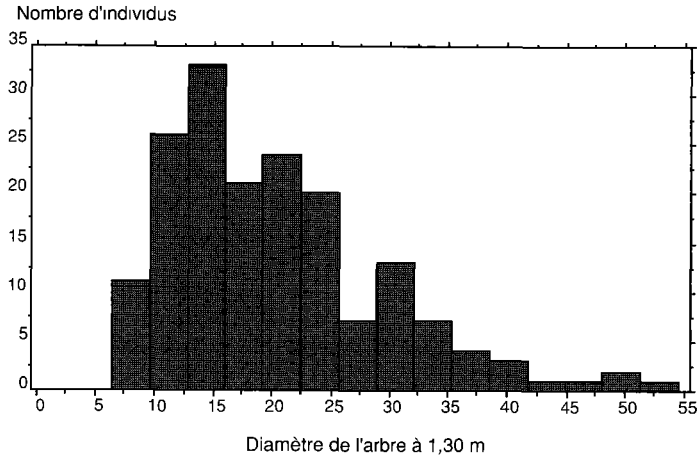


Figure 3. Distribution de la population échantillon répartie par classes de diamètre (en cm)

$$C = x S^y \text{ ou } \log(C) = x' + y \log(S)$$

C : surface de la couronne

S : surface terrière.

Un calcul de régression a été mené par la méthode des moindres carrés pour chaque station, pour chaque type de sol, pour chaque espèce et pour toutes stations et espèces confondues. À chaque niveau, les régressions sont toutes très significatives et fournissent des droites d'équations assez similaires.

La figure 4 présente les résultats des régressions calculées toutes espèces et stations confondues. Les résultats de cette analyse témoignent d'une forte corrélation entre la surface terrière et la surface de la couronne indépendamment de l'espèce. Le coefficient de détermination obtenu s'élève à 0,819 ($R = 0,905$).

Les conditions d'homoscédasticité ($V(\varepsilon_i) = s^2$) et de normalité ($\varepsilon_i \sim N(0, s^2)$) de la distribution des résidus sont bien vérifiées. L'erreur-standard de l'estimation de la régression se limite à 0,161 et n'entame pas la valeur prédictive de cette relation.

L'hypothèse formulée *a priori* au départ de cette expérience est bien vérifiée. Les résultats obtenus montrent que la surface de la couronne d'un arbre rend compte de 81,9% de la surface terrière. On peut donc conclure qu'il est possible d'estimer la biomasse ligneuse aérienne à partir de la mesure de la couronne dans la région de Bobo-Dioulasso.

En régions plus arides, d'autres études étaient arrivées à des conclusions similaires à partir d'échantillons beaucoup plus restreints tant au niveau du nombre d'individus qu'au niveau des espèces représentées (Poupon, 1980; Epp *et al.*, 1983; Hellden, 1987).

4.2 Conditions d'application

L'étape suivante consiste à vérifier les conditions qui permettent de passer de l'individu au peuplement :

1) «Pour une formation donnée, la somme des surfaces des couronnes est égale à la surface de recouvrement du peuplement arboré.»

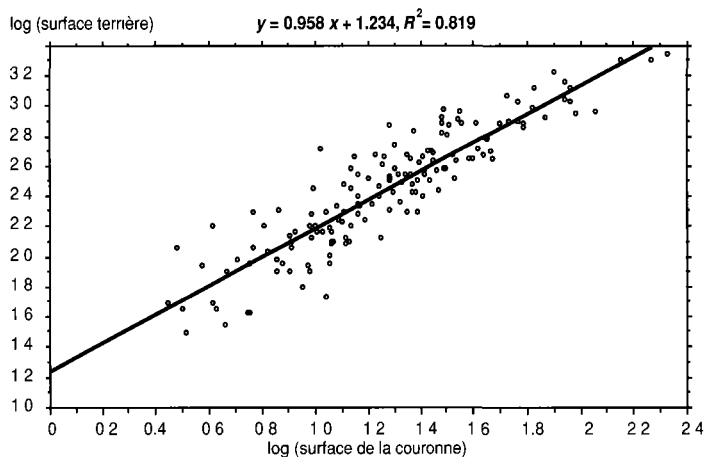


Figure 4. Droite de régression entre la surface terre et la surface de la couronne toutes espèces confondues, après double transformation logarithmique de données

2) «L'estimation de la surface de recouvrement d'une formation peut être répétée sur de nombreux échantillons de manière objective et précise.»

Au niveau de la formation naturelle, la surface de recouvrement est définie par la proportion de sol cachée par la végétation chlorophyllienne et est exprimée en pourcentage.

Les observations au sol et l'examen systématique des photographies aériennes à basse altitude permettent de négliger l'influence de la superposition des couronnes de même que les effets de pente. Il apparaît dès lors raisonnable de considérer un simple modèle additif à la fois pour passer de la surface terre individuelle à la surface terre du peuplement et de la surface de la couronne à la surface de recouvrement.

Au sol, l'estimation de la surface de recouvrement d'une formation est relativement subjective. Une méthode rapide et objective de mesure numérique par traitement d'images a été développée à partir des photographies aériennes classiques. Elle remplace la mesure visuelle fastidieuse utilisant un binoculaire muni d'une trame. Elle procède par numérisation par scanner de la photographie en 256 niveaux de gris (résolution de 12 points/mm) suivie d'une binarisation interactive de l'image en arbre/non-arbre pour finalement effectuer un comptage automatique de la surface de recouvrement.

La validation de la méthode a été réalisée sur 45 sites qui ont fait l'objet d'une estimation visuelle par comptage au binoculaire et d'une mesure numérique après numérisation.

Calculé sur l'ensemble des mesures, le coefficient de corrélation ($R = 0,983$) traduit sans équivoque l'équivalence des deux méthodes. Trois placettes n'ont toutefois pu être mesurées par scanner en raison de la couleur très foncée du substrat qui se confond avec la couverture végétale.

4.3 Hypothèse technologique

La dernière étape du travail consiste à vérifier l'hypothèse suivante : «Il existe une relation étroite entre la surface de recouvrement et l'information enregistrée par les satellites à haute résolution.»

L'expérimentation de cette hypothèse sera menée à l'aide des données Landsat TM du 19 novembre 1987. La date d'acquisition correspond à un moment où toute la strate herbacée

est sénescence et la strate ligneuse en pleine feuillaison. L'objectif de la démarche est de trouver l'indice télédétection ou la combinaison de canaux le mieux corrélé aux mesures de recouvrement.

Outre les six canaux bruts du TM, les techniques de télédétection proposent un grand nombre d'indices particulièrement adaptés à l'étude de la végétation (Perry *et al.*, 1984; Bariou *et al.*, 1985; Bartholomé, 1987). La plupart de ces indices de végétation reposent sur le fait que la végétation a une absorption maximum pour les longueurs d'ondes entre 0,45 et 0,65 μm à l'usage de la photosynthèse et qu'elle réfléchit une importante quantité d'énergie dans la partie proche infrarouge du spectre. Ils sont répartis en deux grandes catégories : les indices orthogonaux et les indices du type ratio.

Pour mettre en évidence une éventuelle relation entre recouvrement et réduction de la réflectance d'un sol, les indices de sol et de brillance ont également été envisagés. Les indices retenus pour notre analyse sont présentés au tableau I et exprimés selon les bandes spectrales TM.

Tableau I. Indices de télédétection retenus pour cette étude (exprimés en termes de bandes spectrales TM)

Nom	Sigle	Équation
Normalized Difference Vegetation Index	NDVI	$(\text{TM4} - \text{TM3})/(\text{TM4} + \text{TM3})$
Ratio Vegetation Index 4/3	RVI 4/3	$\text{TM4}/\text{TM3}$
Ratio Vegetation Index 3/4	RVI 3/4	$\text{TM3}/\text{TM4}$
Transformed Vegetation Index	TVI	$\sqrt{\frac{\text{TM4} - \text{TM3}}{\text{TM4} + \text{TM3}}} + 0,5$
Soil-Adjusted Vegetation Index (Huete, 1988)	SAVI	$\frac{\text{TM4} - \text{TM3}}{\text{TM4} + \text{TM3} + L} \cdot (1 + L)$
Difference Vegetation Index	DVI	$2,4 \text{ TM4} - \text{TM3}$
Perpendicular Vegetation Index	PVI	indice calculé après transformation des axes ajustés à la droite des sols calculée
Soil Line Index (Richardson et Wiegand, 1977)	SLI	indice calculé après transformation des axes ajustés à la droite des sols calculée
Greenness Index (Tasseled Cap Transformation, Crist et Ciccone, 1984)	GI	$-0,2848 \text{ TM1} - 0,2435 \text{ TM2} - 0,5436 \text{ TM3} + 0,7243 \text{ TM4} + 0,0840 \text{ TM5} - 0,1800 \text{ TM7}$
Wetness Index (Tasseled Cap Transformation, Crist et Ciccone, 1984)	WI	$0,1509 \text{ TM1} + 0,1973 \text{ TM2} + 0,3279 \text{ TM3} + 0,3406 \text{ TM4} - 0,7112 \text{ TM5} - 0,4572 \text{ TM7}$
Brightness Index (Tasseled Cap Transformation, Crist et Ciccone, 1984)	BI	$0,3037 \text{ TM1} + 0,2793 \text{ TM2} + 0,4743 \text{ TM3} + 0,5585 \text{ TM4} + 0,5082 \text{ TM5} + 0,1863 \text{ TM7}$
Brightness	B	$\sqrt{\text{TM3}^2 + \text{TM4}^2}$

Pour le «Perpendicular Vegetation Index», une droite des sols a été construite par régression simple à partir de 125 points de sols nus localisés dans l'ensemble de la zone

d'étude ($y = 16,432 + 0,809 x$, avec $R^2 = 0,82$). Pour le «Soil-Adjusted Vegetation Index», la valeur de L est fixée à 0,5 comme le propose son auteur (Huete, 1988).

Le plan de sondage couvre l'ensemble de la zone (24 km par 24 km). Les sites échantillonnés mesurent 240 m par 240 m soit 8 par 8 pixels TM. L'ensemble de l'échantillon comporte 56 sites répartis dans la zone-test en fonction du type de formation végétale et du type de sol. Chaque site fait l'objet d'une mesure de recouvrement par méthode numérique à partir de photographies aériennes au 1:20 000 de juin 1987. Ils sont également précisément reportés sur la composition colorée TM afin d'en calculer la moyenne pour les six canaux TM (30 m de résolution) et les douze néo-canaux.

L'examen des diagrammes de dispersion correspondant aux 56 sites appelle d'emblée deux remarques :

- 5 sites de plantations forestières très couvrantes, tous de l'espèce exotique *Gmelina arborea* (Mélina), ont un comportement spectral particulier et présentent des valeurs d'indices anormalement basses;

- 1 site de végétation presque fermée situé dans un bas-fond assez humide se comporte également de manière anormale.

Ces deux types de sites (Mélina et bas-fond) sont tellement marginaux par rapport à l'ensemble de la zone qu'il semble raisonnable de ne pas les considérer dans un premier temps.

À partir des six canaux bruts du TM, la méthode de régression multiple pas à pas a permis de déterminer la combinaison linéaire des canaux qui est la mieux corrélée aux mesures de recouvrement. Deux canaux du proche et du moyen infrarouge ont été retenus pour fournir la droite de régression suivante ($R^2 = 0,819$) :

$$Y = 2,515 \text{ TM4} - 1,82 \text{ TM7} - 55,164$$

Les douze indices construits à partir des canaux bruts sont répartis en deux matrices de corrélation (tableaux II et III), l'une rassemblant les indices de végétation, l'autre les indices de sol et de brillance. Ces derniers apparaissent peu corrélés aux mesures de recouvrement.

Les indices de végétation sont fortement corrélés aux mesures de recouvrement, sauf le DVI. Les covariances entre indices de végétation sont particulièrement élevées et traduisent une véritable équivalence entre ces indices, excepté le DVI.

Tableau II. Matrice de corrélation des indices de végétation

	Re-couvr.	NDVI	TVI	SAVI	RVI 3/4	RVI 4/3	PVI	DVI	TCT GREE
Recouvr.	1,000								
NDVI	0,899	1,000							
TVI	0,891	0,999	1,000						
SAVI	0,899	1,000	0,999	1,000					
RVI 3/4	-0,877	-0,995	-0,999	-0,995	1,000				
RVI 4/3	0,917	0,989	0,982	0,989	-0,970	1,000			
PVI	0,880	0,993	0,993	0,993	-0,992	0,997	1,000		
DVI	0,627	0,697	0,684	0,698	-0,664	0,730	0,725	1,000	
TCTGREE	0,877	0,985	0,983	0,985	-0,978	0,976	0,989	0,758	1,000

Tableau III. Matrice de corrélation des indices de brillance

	Re-couvr.	BRIG HTN	TCT BRIG	TCT WET	SLI
Recouvr.	1,000				
BRIGHTN	-0,155	1,000			
TCTBRIGH	-0,543	0,880	1,000		
TCTWETN	0,742	-0,647	-0,929	1,000	
SLI	-0,330	0,980	0,951	-0,770	1,000

Le SAVI ne semble différer du NDVI que par une constante, mais on s'étonnera davantage de la très forte corrélation entre les indices basés sur un rapport d'une part, et le PVI et la composante «Greenness» de la «Tasseled Cap Transformation» d'autre part.

C'est le rapport proche infrarouge/rouge (RVI 4/3) qui rend le mieux compte des mesures de recouvrement ($R = 0,917$), précédant de peu les indices reposant sur la différence normalisée.

Pour chaque indice de végétation, une droite de régression est calculée à partir des sites échantillonnés ($n = 50$). Le tableau IV rassemble l'ensemble des coefficients de détermination obtenus.

Tableau IV. Coefficients de détermination des régressions calculées entre les indices de végétation et le recouvrement ($n = 50$)

Indices de végétation	Recouvrement	Log. du recouvrement
NDVI	0,809	0,847
TVI	0,793	0,860
SAVI	0,809	0,847
RVI 3/4	0,770	0,873
RVI 4/3	0,841	0,779
PVI	0,774	0,840
DVI	0,394	0,283
GI (TCT)	0,770	0,803

La relation calculée entre le RVI 4/3 et le recouvrement présente une légère hétéroscédasticité au niveau des résidus de la régression. Ce risque d'hétéroscédasticité et la forme de la distribution de la population échantillon au niveau du recouvrement conduisent à proposer une transformation logarithmique des données.

C'est l'indice RVI 3/4 qui fournit la meilleure relation avec un $R^2 = 0,87$ (fig. 5). L'hypothèse de départ reliant le recouvrement d'une formation et une mesure télédéteectée paraît clairement établie. Les indices de végétation du type ratio semblent légèrement plus performants.

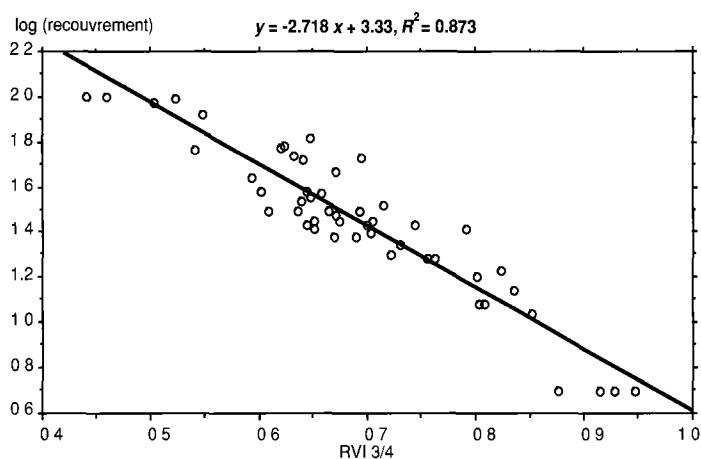


Figure 5. Droite de régression calculée à partir de l'indice de végétation RVI 3/4 et des mesures de recouvrement après transformation logarithmique

5 Conclusions

L'expérience menée semble démontrer que les données satellitaires peuvent fournir une information quantitative sur la biomasse ligneuse. Mené dans des conditions optimales d'acquisition et de traitement de données, ce travail a mis en évidence des relations très étroites.

Une forte corrélation a été observée entre la surface de la couronne d'un arbre et sa surface terrière toutes espèces confondues. Une méthode de mesure numérique a été ensuite mise au point pour estimer rapidement le recouvrement des couronnes d'un peuplement. Finalement, des relations très étroites ont été mises en évidence entre des indices de végétation et le recouvrement chlorophyllien d'une formation naturelle.

Les résultats acquis demandent néanmoins confirmation et analyse complémentaire. Il faut notamment approfondir l'influence de l'humidité sur les indices et la manière de réduire ces erreurs au niveau des bas-fonds.

Avant toute extrapolation de la méthode, il est indispensable de vérifier la stabilité des relations tant au niveau spatial qu'au niveau temporel.

Finalement, il serait intéressant d'identifier l'influence de la résolution spatiale des capteurs au niveau des résultats d'une telle expérience.

6 Remerciements

Cette étude est menée dans le cadre de la deuxième phase du projet «Caractérisation par les techniques de télédétection de la dynamique de la désertification à la périphérie du Sahara» financé par la Direction générale du développement de la Commission des communautés européennes.

7 Références

- BARIOU, R., D. LECAMUS et F. LE HENAFF, 1985. Indices de végétation. —Dossiers de télédétection, Centre régional de télédétection, Université de Rennes, 150 p.
- BARTHOLOMÉ, É., 1987. Comparaison des potentialités de différents indices de végétation pour la caractérisation des cultures en milieu sahélien. —Centre AGRHYMET, Niamey, 27 p.
- CAMERATTI, A., 1983. Inventaire forestier national : Haute-Volta. —FAO-PNUD, Rome, 173 p.
- CRIST, E. P. et R. C. CICONE, 1984. A physically-based transformation of TM data - the TM Tasseled Cap. —IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, vol. 22, n° 3, p. 256-263.
- DEFOURNY, P., 1989. Étude dynamique de la végétation ligneuse en région soudano-sahélienne à partir de données Landsat MSS. —Photo-interprétation, n° 89-2, fasc. 4.
- DEVINEAU, J. C., 1986. Impact écologique de la recolonisation des zones libérées par l'onchocercose des vallées burkinabés. —ORSTOM/OMS, 2 vol.
- EPP, H., D. PEDEN et D. HERLOCKER, 1983. The use of large scale aerial photography to determine wood biomass in the arid and semi-arid areas of Kenya. —Actes du symposium international de la commission VII de la Société internationale de photogrammétrie et télédétection, Toulouse, p. 415-422.
- GUINKO, S., 1984. Contribution à l'étude de la végétation et la flore du Burkina Faso. —Thèse de doctorat d'État, Bordeaux III, 394 p.
- HELLDEN, U., 1987. An assessment of woody biomass, community forests, land use and soil erosion in Ethiopia. —Lund Studies in Geography, 73 p.
- HUETE, A. R., 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). —Remote Sensing of Environment, vol. 25, p. 295-309.
- PERRY, C. R., J. R. LAUTENSCHLAGER et L. F. LAUTENSCHLAGER, 1984. Functional equivalence of spectral vegetation indices. —Remote Sensing of Environment, vol. 14, p. 169-182.
- POUPON, H., 1980. Structure et dynamique de la strate ligneuse d'une steppe sahélienne au nord du Sénégal. —Travaux et documents, ORSTOM, n° 115, 351 p.
- RICHARDSON, A. J. et C. L. WIEGAND, 1977. Distinguishing vegetation from soil and background information. —Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, n° 43/12, p. 1541-1552.
- SPENCER, R. D. et R. J. HALL, 1988. Canadian large-scale aerial photographic systems (LSP). — Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 54, n° 4, p. 475-482.
- WARREN, P. L. et C. DUNFORD, 1986. Sampling semiarid vegetation with large-scale aerial photography. —ITC Journal, 4, p. 273-279.

8

Le suivi intégré de l'environnement sénégalais

PETER FREDERIKSEN

Affiliation au moment des journées scientifiques : Centre de suivi écologique, Programme des Nations Unies pour le développement, B. P. 154, Dakar, Sénégal, téléphone : 221-32-54-94

Affiliation actuelle : 19.2, Roskilde Universitetscenter, Postbox 260, 4000 Roskilde, Danemark

Résumé

Au Sénégal, le Centre de suivi écologique a pour mandat le suivi des systèmes de production (agriculture, élevage, foresterie) dans un contexte de développement rural. Cela a entraîné la mise sur pied d'une structure de suivi intégré de l'environnement, laquelle est constituée d'une équipe multidisciplinaire composée d'écologistes, de socio-économistes, de géographes et d'informaticiens. La collecte de données est faite à plusieurs niveaux : satellite, avion, terrain. Leur traitement est entièrement informatisé : réseau local avec des PC et des périphériques.

La télédétection est donc une composante du suivi parmi d'autres, et ses produits sont interprétés dans un contexte global. Le Centre a surtout travaillé avec le suivi du taux de croissance de la végétation, la production végétale pendant l'hivernage, les feux de brousse, le décompte du bétail, la charge pastorale, la pluviométrie, les surfaces d'eau douce et des études socio-économiques.

1 Introduction

La sécheresse du Sahel limite le potentiel de production agricole et de l'élevage. La pluviométrie est souvent imprévisible et les producteurs sont obligés d'appliquer des stratégies de risque qui ne leur permettent pas de produire d'une manière optimale. Cette situation combinée avec une croissance élevée de la population a entraîné l'expansion de l'agriculture à

des terres marginales avec un potentiel de production plus bas. L'utilisation intense des terres peut diminuer leur potentiel et donc entraîner une baisse de la production à long terme. Cela posera des problèmes majeurs pour le Sénégal qui essaie d'atteindre l'autosuffisance alimentaire afin de diminuer le déficit de paiement. Actuellement, le gouvernement sénégalais ne dispose souvent pas de suffisamment d'information pour la formulation d'une politique de développement rural cohérent. Dans ce contexte, le Bureau des Nations Unies pour la région soudano-sahélienne a créé le Centre de suivi écologique (CSE) afin de suivre le développement spatio-temporel du milieu rural au Sénégal afin de pouvoir informer les institutions gouvernementales sur les systèmes de production et les ressources naturelles.

2 L'objectif et le fonctionnement

L'objectif principal de la première phase du projet était de développer des méthodes capables de cartographier et d'analyser le développement temporel des ressources naturelles renouvelables et les facteurs socio-économiques dans le nord du Sénégal, surtout au niveau de l'élevage.

La structure administrative, le personnel, le matériel et le logiciel mis en place ont rapidement démontré le potentiel du CSE à travailler à l'échelle nationale et sur différents systèmes de production. En conséquence, le mandat sera élargi à tout le pays dans la deuxième phase afin d'inclure trois systèmes de production : l'agriculture pluviale, l'agriculture irriguée et l'élevage.

Les activités du Centre sont principalement de type opérationnel. Pour que le travail du Centre soit utile, la plupart des produits sont préparés sur la base de protocoles d'accord avec des partenaires, car toute activité doit se justifier par son utilisation. Les partenaires nationaux sont la Direction de l'agriculture, la Direction des eaux, forêts et chasses, la Direction de l'élevage, le Service météorologique national et la Cellule après-barrages.

Le développement de nouveaux produits occupe une position moins importante, mais il est essentiel pour assurer le renouvellement du Centre. Le Centre collabore avec des centres de recherche : les universités de Copenhagen, Roskilde et Aarhus (Danemark), le centre Agrhymet (Niger), le Centre commun de recherche de la Commission des communautés européennes d'Ispira (Italie), la NASA (États-Unis), etc., pour tester la qualité de ses produits et pour assurer un transfert rapide des nouveaux concepts et des nouvelles méthodes.

Le personnel est organisé autour d'une direction, des conseillers techniques, des responsables des projets et des experts-ressources qui assurent les contacts avec les partenaires. Le travail a une forte composante interdisciplinaire à cause du thème principal du CSE : l'analyse spatiale des systèmes de production.

Les fonds proviennent entièrement du système des Nations Unies. Pour la deuxième phase, le CSE souhaite qu'une partie du financement provienne aussi des contrats avec l'État, avec des organismes internationaux et nationaux, mais il faut être réaliste : il est peu probable que le CSE sera en mesure de s'autofinancer.

3 Les méthodes

Le Centre utilise la télédétection, le vol systématique de reconnaissance à basse altitude et le travail de terrain pour la collecte des données. Une structure entièrement informatisée

assure l'analyse et l'interprétation des données, incluant un réseau local avec différents périphériques qui sont utilisés par un système d'information géographique, des systèmes de traitement d'images, des bases de données, etc.

Le Centre utilise actuellement des images Meteosat, NOAA-AVHRR et Landsat TM. Les images Meteosat proviennent de la station de réception de l'Université de Reading en Angleterre. Les commandes atteignent 24 images par jour pendant l'hivernage. Pendant toute l'année, quatre images NOAA-AVHRR sont reçues par décade de la station de réception à Mas Palomas (Iles Canaries). Les images Landsat TM sont acquises à partir d'EOSAT (États-Unis)(copies sur papier) ou de Mas Palomas (bandes magnétiques).

Le traitement des images numériques est entièrement assuré par le personnel en utilisant soit le logiciel CHIPS, développé par l'Université de Copenhague, soit le logiciel ERDAS. Le redressement est fait à partir des points de contrôle au sol pour rendre les images compatibles avec des cartes topographiques à coordonnées UTM.

L'enquête aérienne est effectuée avec un petit avion monomoteur ou bimoteur qui vole nord-sud en suivant des lignes de vol équidistantes de 5 km. L'équipe est constituée de quatre personnes : le pilote, le navigateur, qui utilise le système global de navigation (GNS), et deux observateurs qui font le décompte visuel du bétail en deux bandes d'observation, une de chaque côté de l'avion, et la photographie verticale automatique. Les photographies verticales sont utilisées pour estimer la couverture agricole, arborée, herbacée et les sols nus.

Les travaux de terrain sont fait pour calibrer les images satellitaires, pour conduire les vols systématiques de reconnaissance ou pour réaliser les enquêtes socio-économiques. En général, le personnel passe plusieurs mois en brousse chaque année.

Pour effectuer un suivi intégré de l'environnement, les données provenant des différentes sources doivent être compatibles dans l'espace et dans le temps. Il est en conséquence essentiel de réorganiser les données, par exemple par région socio-économique, écologique, administrative ou autre. Les données brutes dont le Centre dispose (des images satellitaires classifiées, les bandes d'observation, les photographies verticales, des cartes topographiques et thématiques, des statistiques, etc.) ne permettent souvent pas une telle intégration des données. On s'est donc attelé à attribuer des coordonnées UTM à toutes les données du Centre. On a développé des logiciels qui permettent l'agrégation des images satellitaires et des données des vols systématiques de reconnaissance selon un découpage donné (unité administrative, écologique, socio-économique, etc.). Cela permet de développer une base de données des ressources naturelles, de l'infrastructure, etc., et de les combiner selon les besoins des partenaires/utilisateurs. La superposition des cartes est assurée par un système d'information géographique vectoriel (ARC/INFO).

Le traitement des données est fait dans un environnement informatisé. Le Centre dispose actuellement de 18 ordinateurs PC (286 et 386) branchés à un réseau local en même temps que des périphériques : dérouleur de bande, écrans graphiques pour le traitement des images et pour le système d'information géographique, table à numériser, et des imprimantes à jet encre, matricielles et laser.

4 Les produits

Le Centre travaille sur quatre aspects principaux des systèmes de production : la végétation, le cheptel, le bilan hydrique et la socio-économie.

Les études de la végétation comprennent le taux de croissance et la production végétale pendant l'hivernage avec des images NOAA-AVHRR NDVI. Des cartes NDVI à l'échelle

nationale avec des informations topographiques sont distribuées de manière opérationnelle chaque décade à 80 institutions nationales. Les couvertures arborée, herbacée, de l'agriculture et de sol nu sont recensées en utilisant des vols systématiques de reconnaissance. La cartographie de la structure de la couverture arborée a été faite à partir d'une classification multispectrale et multitemporelle des images NOAA-AVHRR en utilisant les canaux 1 et 2 des images de la saison sèche.

La cartographie de feux de brousse a été réalisée en combinant des études radiométriques en brousse, la photographie aérienne et des images NOAA-AVHRR.

Les études radiométriques servaient à documenter le développement temporelle de la signature spectrale des zones brûlées, ce qui est essentiel pour savoir à quelle fréquence il faut acquérir les images NOAA-AVHRR. Les résultats montraient que les feux produisent une forte baisse de la réflexion dans les bandes qui correspondent aux canaux 1 et 2 du NOAA-AVHRR et dans le NDVI, et que les trois paramètres augmentaient dans le cours d'une dizaine de jours après les feux à des niveaux légèrement inférieurs à ceux d'avant les feux. Il faut donc acquérir plusieurs images NOAA-AVHRR par décade pour distinguer les aires brûlées des aires non brûlées.

La photographie aérienne a été utilisée afin de pouvoir déterminer le pourcentage des surfaces brûlées. Sur chaque photographie, 320 points ont été choisis au hasard et groupés comme brûlés/non brûlés. Les résultats indiquaient qu'une moyenne de 80% des aires classifiées comme touchées par les feux à partir de l'avion avaient brûlé tandis que le reste consistait en sol nu ou en végétation sèche. Ces résultats étaient valables pour la steppe avec très peu d'arbres et pour la savane avec 10-35% d'arbres. Si le pourcentage ne dépend pas de l'échelle d'observation, par exemple entre la photographie aérienne d'un hectare et le pixel NOAA-AVHRR d'un kilomètre carré, on peut donc multiplier la surface classifiée à partir des images NOAA-AVHRR avec un facteur 0,8, ce qui donnerait une approximation de la surface réelle brûlée.

Une classification par parallélipèdes supervisée a été effectuée en utilisant : 1) les canaux 1, 2 et 4 du NOAA-AVHRR de la période octobre 1988 à janvier 1989; 2) l'analyse interactive des contrastes sur l'écran graphique et des données statistiques des sites de contrôle au sol (pour identifier les seuils).

Les résultats sont à considérer comme préliminaires car on ne dispose pas d'une table de contingence pour les différentes zones écologiques du pays. Une telle table est compliquée à obtenir parce qu'il est très difficile de se localiser avec précision en brousse. Un autre problème est lié à la couverture arborée. Dans le nord du Sénégal, le contraste dans la signature spectrale est très marqué entre les zones brûlées et non-brûlées à cause de la faible couverture arborée et des sols sableux, surtout en ce qui concerne les canaux 1 et 2. Dans le centre et le sud du Sénégal, la couverture arborée est beaucoup plus élevée et les sols latéritiques plus sombre, ce qui se traduit par un contraste plus faible entre les deux types de surfaces. Il est donc probable que l'erreur de classification soit plus élevée dans la dernière zone.

La classification a couvert environ de 50 000 km². Si on suppose que 80% ont brûlé, cela correspond à 40 000 km² ou dix fois plus que la statistique officielle. En combinant ces données avec la carte de la production végétale pendant l'hivernage 1988, on peut estimer qu'environ 10 millions de tonnes de végétation ont brûlé. Lorsque l'hivernage se termine, les feux commencent plus tôt au nord et au centre du pays qu'au sud. Les feux touchent surtout les plateaux latéritiques du centre où la population locale tend à allumer des feux précoces afin d'éviter des feux plus désastreux plus tard dans la saison sèche. Au nord du pays, les éleveurs ne pratiquent pas les feux précoces pour conserver un maximum de végétation disponible pour le bétail. Des feux sont uniquement allumés pour combattre les criquets.

Le décompte de bétail inclut les bovins, les petits ruminants, les ânes, les chevaux et les dromadaires et il est combiné avec une analyse de la charge pastorale et de la pression animale dans l'élevage et dans l'agriculture pluviale. Le décompte est fait à partir d'un avion. Les informations sur la pression animale sont obtenues grâce à l'intégration des données satellitaires (production végétale) et des données des vols systématiques de reconnaissance (charge pastorale) dans le système d'information géographique. Ces données sont présentées par Prévost (1990).

Les composantes du bilan hydrique étudiées sont la pluviométrie, avec la méthode de nuages froids à partir des images Meteosat, et la surface du lac de Guiers à partir du canal 2 du NOAA-AVHRR.

Le lac de Guiers est le plus grand réservoir de surface d'eau douce du Sénégal. Un problème majeur est l'introduction des eaux salines provenant des plantations de canne à sucre au nord du lac, ce qui, de temps en temps, élève la salinité du lac à un niveau critique où les eaux ne peuvent plus être utilisées comme eau potable pour les Dakarais et pour les producteurs, leur cultures et leur bétail autour du lac. Les autorités essaient de modéliser l'hydrologie de lac en suivant le stockage et les entrées et sorties d'eau. Faute d'un modèle numérique du terrain, on méconnaît les variations de sa surface selon le niveau du lac. La connaissance de la surface est essentielle pour estimer l'évaporation. Le Centre a donc essayé d'estimer la surface en utilisant des images NOAA-AVHRR.

On a utilisé une méthode d'histogramme développée par Bakker (1975) et appliquée par Harris et Mason (1989) pour l'estimation de la surface d'un lac. Ils montraient que le canal 2 de jour et les canaux 4 et 5 de nuit du capteur AVHRR étaient les plus précis. Dans la présente étude, le canal 2 a été choisi à cause de la présence de ces images dans les archives du Centre. Les résultats ont été comparés avec une image Landsat TM qui a été planimétrée pour estimer l'erreur de classification, qui était 2%.

Les résultats sont donnés en km² dans le tableau I pour les cycles 1987-1988 et 1988-1989. La surface totale à partir du 27/9/1988 inclut les aires inondées dans une vallée au sud du lac. Les autorités du lac avaient ouvert le barrage qui sépare le lac de la vallée ce qui permettait l'entrée des eaux du lac.

La surface moyenne en 1987-1988 était de 251 km² et de 268 km² en 1988-1989. La surface variait de 182 km² en juillet 1987 à 316 km² en novembre 1988. La surface maximale apparaissait un mois après la fin de l'hivernage et le minimum un mois après le début de l'hivernage. L'augmentation de la surface pendant l'hivernage était deux à quatre fois plus rapide que la diminution de la surface pendant la saison sèche.

Les études socio-économiques sont limitées au système pastoral et incluent des études de l'organisation des producteurs, la pratique pastorale, l'économie de la production, etc. Les études se basent surtout sur des enquêtes effectuées en brousse.

L'impact de ces produits sur la formulation de la politique de développement rural est difficile à mesurer. Le Centre a été actif pendant 30 mois et il est devenu bien connu parmi les techniciens des institutions gouvernementales qui travaillent sur les différents aspects du développement rural, mais il reste beaucoup de travail de sensibilisation à faire au niveau des décideurs pour que les produits aient un impact plus profond.

5 Le futur

L'organisation du personnel changera vers le remplacement des expatriés par des experts nationaux des Nations Unies et avec un financement jusqu'en 1995. Au point de vue

Tableau I. Évolution de la surface du lac de Guiers pendant les années 1987-1988 et 1988-1989

1987/88		1988/89	
Date	Surface (km ²)	Date	Surface(km ²)
30/05/87	211	19/06/88	215
27/06/87	199	08/07/89	250
04/07/87	194	18/07/88	248
05/07/87	194	26/07/88	246
23/07/87	182	04/08/88	279
01/08/87	197	12/08/88	273
10/08/87	215	30/08/88	282
19/08/87	231	19/09/88	294
06/09/87	260	27/09/88	297 (13)
03/11/87	270	06/10/88	305 (30)
07/11/87	272	15/10/88	316 (41)
10/12/87	272	15/11/88	312 (47)
23/12/87	257	24/12/88	300 (40)
04/02/88	260	23/01/89	279 (28)
11/03/89	259	23/02/89	281 (25)
19/06/89	215	19/07/89	222 (4)

thématique, le Centre commencera à travailler avec la statistique agricole et la planification et l'aménagement du territoire en utilisant de plus en plus des images satellitaires à haute résolution.

6 Références

- BAKKER, J. L., 1975. Monitoring water quality from Landsat. —NASA Technical Memorandum TM X-71006, NASA, Goddard Space Flight Center, Maryland.
- HARRIS, A. R. et I. M. MASON, 1989. Lake area measurement using AVHRR, a case study. — International Journal of Remote Sensing, vol. 10, n^{os} 4-5, p. 885-895.
- PRÉVOST, Y., 1990. Analyse spatiale de la pression animale comme facteur de désertification dans le nord du Sénégal. —in P. Lafrance et J.-M. Dubois (éd.). Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse. Éditions AUPELF-UREF et John Libbey Eurotext, Paris, p. 241-251.

9

Suivi par télédétection des changements d'état de surface sur les bassins versants du Haut-Sénégal, de la Gambie et du Rio Corubal (novembre 1987–décembre 1988)

JEAN-MARIE GRÉGOIRE et GIOVANNI FERRARI

Institut des applications de la télédétection, Centre commun de recherche de la Commission des communautés européennes, Établissements d'Ispira, 21020 Ispira (Varese), Italie, téléphone : 39-332-78-92-15, télécopieur : 39-332-78-90-01, télex : 380042

Résumé

L'étude présentée tente de montrer comment les données des satellites météorologiques à basse résolution spatiale, comme celles fournies par le capteur AVHRR des satellites NOAA, peuvent être utilisées pour caractériser la dynamique spatio-temporelle des états de surface sur cinq bassins versants d'Afrique de l'Ouest. L'exploitation de dix images NOAA-HRPT permet d'analyser d'une part l'évolution générale pendant la saison sèche 1987-1988 et du début de la saison 1988-1989, d'autre part le comportement spécifique de chaque bassin.

Il est proposé de constituer une banque de données regroupant quelques éléments descriptifs des états de surface sur les bassins versants des principaux fleuves d'Afrique de l'Ouest. Cet ensemble de données viendrait en complément aux informations contenues dans les banques de données hydro-météorologiques existantes.

1 Introduction

Les modifications affectant la couverture végétale d'un territoire donné, qu'elles soient d'origine anthropique ou naturelle, ont une influence plus ou moins directe sur la relation existant entre les précipitations et les écoulements de surface. La nature du couvert intervient

en effet sur l'intensité de cinq processus fondamentaux dans le cycle de l'eau à la surface : interception, évaporation directe après interception, infiltration dans le sol, évapotranspiration et ruissellement de surface.

Pour un espace géographique donné, tel un bassin versant, les caractéristiques du couvert végétal déterminent en quelque sorte les ressources en eau réelles, c'est à dire l'eau stockée par le milieu, par opposition aux ressources en eau potentielles que sont les précipitations. Toute modification du couvert végétal aura ainsi des répercussions sur les ressources en eau utilisables par le milieu et les activités humaines, répercussions pouvant affecter profondément des écosystèmes naturels comme celui de la mangrove (Guillemyn, 1989).

En conditions de ressources en eau limitées, qui sont celles de l'Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne, il apparaît indispensable de développer des méthodes de surveillance du milieu sur les bassins des grands fleuves de la région de façon à : 1) collecter l'information demandée par les modèles d'écoulement; 2) évaluer les conséquences hydrologiques engendrées par les modifications du couvert végétal; 3) mettre en évidence les régions prioritaires pour les programmes d'aménagement. De nombreux auteurs (Rango *et al.*, 1983; Solomon *et al.*, 1988; Kite, 1989; Salomonson, 1989; Grégoire, 1989) ont cité la télédétection spatiale comme un des outils privilégiés pour effectuer cette surveillance.

Le travail présenté ici tente de montrer comment les données du capteur AVHRR, à bord des satellites NOAA, peuvent être utilisées pour effectuer un suivi des conditions du milieu sur une base régionale. Cinq bassins importants pour les ressources en eau de l'Afrique de l'Ouest ont été choisis : ceux de la Faleme, du Bafing, du Bakoye, de la Gambie et du Corubal.

Les trois premiers, affluents du fleuve Sénégal, sont situés en zone soudanienne; les formations végétales climaciques sont de type «forêt claire indifférenciée soudanienne» dans la légende de la Carte de végétation de l'Afrique publiée par l'UNESCO. Le couvert végétal actuel est composé d'une mosaïque de savanes arborée, arbustive et herbeuse.

La Gambie traverse la zone de contact entre domaine guinéo-soudanien et domaine soudanien; les types de végétation sont en partie la «forêt claire soudanienne» comme sur les affluents du Sénégal et une mosaïque de «forêt ombrophile et de formations herbeuses». Les faciès dégradés sont une savane arbustive à arborée avec des îlots de forêt claire.

Le bassin du Corubal est lui totalement situé en zone de transition guinéo-soudanienne.

L'ensemble de la zone d'étude est comprise entre les isohyètes 2000 mm, aux sources du Bafing et du Corubal dans le massif du Fouta Djallon, et 750 mm au confluent de la Faleme et du Sénégal.

2 Préparation des documents satellitaires et des fichiers graphiques de limite de bassin

Dix images NOAA-AVHRR-HRPT (Advanced Very High Resolution Radiometer-High Resolution Picture Transmission; tableau I) ont été sélectionnées pour caractériser l'évolution des états de surface entre les mois de novembre 1987 et décembre 1988. En fait, seules les périodes de saison sèche ont été retenues.

Pour chaque document satellitaire, le prétraitement a été le suivant :

- correction géométrique de type panoramique à partir des paramètres de navigation du satellite fournis avec le document;
- calcul de l'indice de végétation normalisé à partir des comptes numériques dans les bandes spectrales AVHRR-1 et 2;

Tableau I. Caractéristiques du satellite NOAA (9-11) et du capteur AVHRR

Cycle orbital	9 jours
Période orbitale	102 min
Altitude	805 km
Heure de passage équatoriale (temps universel)	
en mode ascendant	14 h 30 min
en mode descendant	2 h 30 min
Angle de balayage	± 56 degrés
Trace au sol	2 700 km
Résolution au sol	1,1 km au nadir à 3,5 km latéralement
Bandes spectrales	
canal 1	0,58—0,68 µm
canal 2	0,73—1,1 µm
canal 3	3,55—3,93 µm
canal 4	10,3—11,3 µm
canal 5	11,5—12,5 µm
Réception des données HRPT pour l'Afrique de l'Ouest	Station de Maspalomas (Iles Canaries)

- extraction de deux «fenêtres» de 512 par 512 pixels chacune (fig. 1) pour couvrir d'une part les bassins des trois affluents du fleuve Sénégal (Faleme, Bafing et Bakoye), d'autre part ceux de la Gambie et du Corubal.

Parallèlement à la préparation de la série d'images, les fichiers graphiques de limite de bassins versants (tableau II) ont été créés :

- numérisation des limites de bassin sur fond de carte au 1:1 000 000;
- correction géométrique des fichiers obtenus pour les rendre superposables aux images. La correction a été effectuée par la méthode des points de contrôle.

Ces fichiers graphiques permettent d'extraire, pour chacune des dates retenues, l'information radiométrique correspondante à un bassin déterminé. Cette étape du travail a été réalisée à l'aide du logiciel CHIPS (Rasmussen, 1989).

Tableau II. Caractéristiques des bassins étudiés

Bassin	Nombre pixels (1 pixel = 1 km ²)	Milieu	Pays concerné
Faleme	29 345	soudano-sahélien	Sénégal, Mali et Guinée
Bafing	38 404	soudano-sahélien	Guinée et Mali
Bakoye	14 764	soudano-sahélien	Guinée et Mali
Gambie	75 643	guinéo-soudanien	Gambie, Sénégal et Guinée
Corubal	37 639	guinéo-soudanien	Guinée Bissau et Guinée

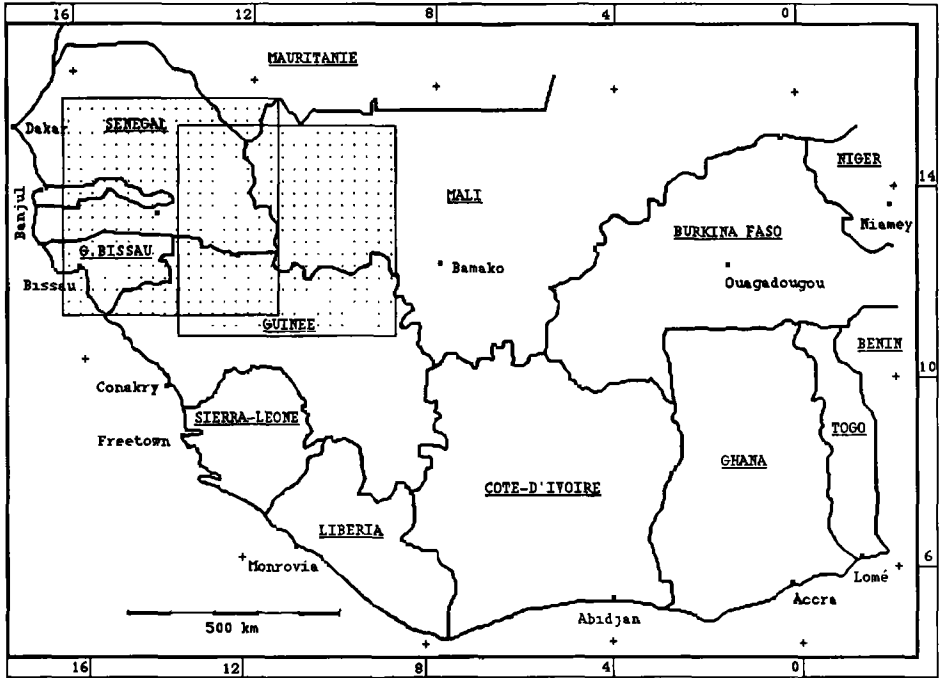


Figure 1. Position des deux fenêtres NOAA-HRPT (512 par 512 pixels) utilisées pour l'étude

3 Résultats et interprétation

À la fin de la phase de prétraitement des données, chaque bassin étudié a pu être défini sur la base des éléments suivants :

- le compte numérique, pixel par pixel, dans l'infrarouge thermique moyen (AVHRR-3);
- l'indice de végétation normalisé (NDVI) calculé pixel par pixel à partir des enregistrements dans le visible (AVHRR-1 et 2);
- les moyennes, écarts types et histogrammes de distribution, bassin par bassin, des deux termes précédents.

Aucune correction radiométrique n'a été appliquée aux données.

L'interprétation a été faite en essayant : 1) de dégager l'évolution générale des états de surface sur l'ensemble des bassins; 2) de discerner des évolutions spécifiques d'un bassin à l'autre.

3.1 Évolution générale entre novembre 1987 et décembre 1988

L'évolution générale des valeurs moyennes de l'indice de végétation et des enregistrements dans le canal AVHRR-3 (fig. 2) est très semblable pour les cinq bassins étudiés. Pendant la saison sèche 1987-1988, de novembre à mai, l'indice de végétation montre des fluctuations minimales autour d'une valeur très basse comprise entre 0,05 et 0,10. Après la saison des pluies, à partir de novembre 1988, on observe une remontée marquée de l'indice puis une chute après

le mois de décembre 1988. Les maximums, observés en décembre pour les cinq bassins, restent à des niveaux relativement bas de l'ordre de 0,20; valeurs qui correspondent à celles mentionnées par différentes recherches sur le même milieu (Justice, 1986). Ces fluctuations de l'indice indiquent les changements saisonniers de la densité du couvert végétal vivant. Les dix observations disponibles ne permettent pas d'aller au-delà de ce constat très général et qualitatif.

L'évolution des enregistrements dans l'infrarouge thermique (fig. 2) apporte plus d'information. Ces données permettent ainsi de discerner deux périodes bien distinctes pendant la saison sèche 1987-1988 : la première, de novembre 1987 à février 1988, montre des valeurs relativement stables (autour du niveau de quantification 160) très inférieures à celles observées pendant la deuxième phase de mars à mai 1988; l'écart moyen entre les deux périodes est de l'ordre de 75 unités de quantification soit 45% d'augmentation de février à mars, mois pour lequel on observe les valeurs les plus élevées. Avril et mai montrent une tendance à la baisse. Les valeurs les plus basses, pour l'ensemble de données disponible, s'observent en octobre 88 après la saison des pluies. Puis, il y a de nouveau tendance à la remontée en novembre et décembre.

La dynamique observée dans l'infrarouge thermique moyen (centré sur 3,7 μm) reflète le mode de réchauffement du milieu suite aux effets de la saison sèche : diminution de la densité du couvert végétal vivant, de l'évapotranspiration et de l'humidité de surface du sol; augmentation des superficies de sol nu. À ces modifications des états de surface s'ajoute la contribution des feux de brousse (cf. point 3.3) et la remontée des températures de l'air après le mois de janvier.

3.2 Différenciation entre bassins

Au-delà de la tendance générale présentée plus haut, on peut déceler des comportements spécifiques par le biais de l'hétérogénéité de l'état de surface. Les barrettes d'écart type, indiquées sur la figure 2, montrent que la dispersion, au sens statistique du terme, change beaucoup d'une date à l'autre pour un bassin donné. La figure 3 présente l'évolution temporelle de cette dispersion des valeurs radiométriques dans le canal AVHRR-3 entre novembre 1987 et mai 1988.

Le Bakoye et la Gambie ont des comportements très semblables :

- il y a une tendance à l'harmonisation des états de surface (baisse de la dispersion des valeurs) entre novembre 1987 et février 1988, suivie d'une remontée marquée pendant la deuxième moitié de la saison sèche (mars à mai 1988);

- la valeur minimale de dispersion s'observe après les pluies, en octobre 1988, ce qui dénote une forte homogénéité des états de surface à ce moment de l'année.

La Faleme se comporte plus ou moins comme les deux bassins précédents mais avec une tendance à l'harmonisation, en début de saison sèche, beaucoup plus marquée; en fait, cette différence d'intensité dans le processus est due à la forte hétérogénéité rencontrée au sein de la Faleme au tout début de la saison sèche, en novembre 1987, par rapport à celles montrées par le Bakoye et la Gambie.

Le bassin du Corubal montre un comportement inverse : il y a augmentation de la dispersion pendant la saison sèche 1987-1988 avec un maximum atteint vers le mois de mars 1988; le minimum de fin de saison des pluies, décalé vers le mois de novembre 1988, est suivi d'une brusque remontée entre novembre et décembre.

Le Bafing enfin ne présente pas de tendance bien nette pendant la saison sèche 1987-1988; le minimum de fin de saison des pluies, en octobre 1988, est suivi d'une forte remontée de la dispersion jusqu'au mois de décembre.

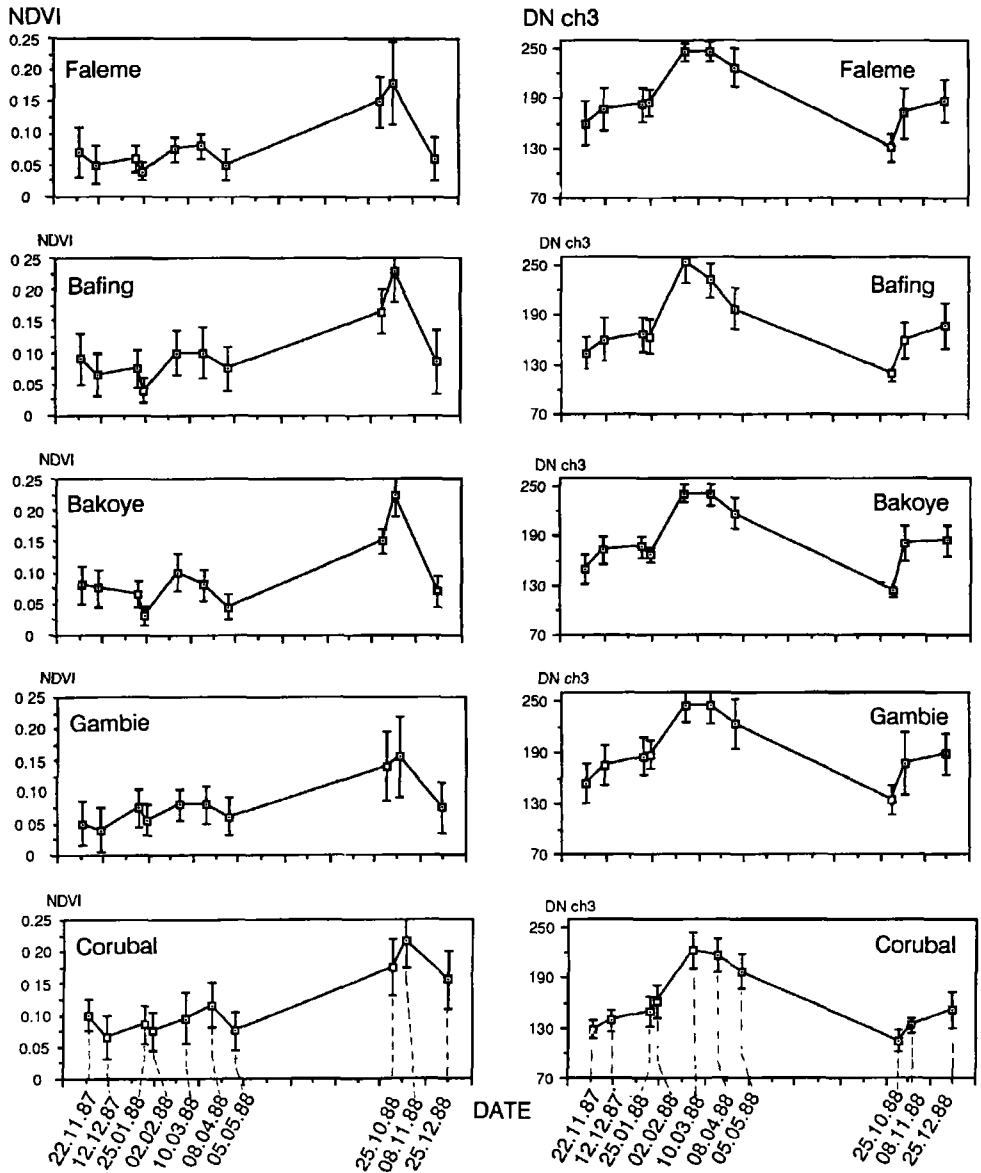


Figure 2. Évolution de l'indice de végétation normalisé (NDVI) et du signal dans le canal AVHRR-3 entre novembre 1987 et décembre 1988 (moyenne des valeurs de tous les pixels de chaque bassin)

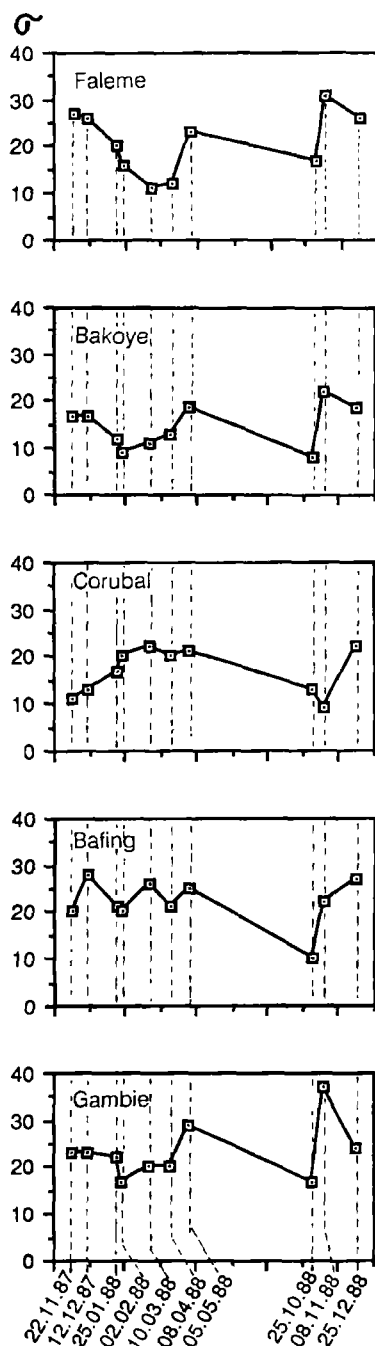


Figure 3. Évolution de l'écart type des comptes numériques dans le canal AVHRR-3

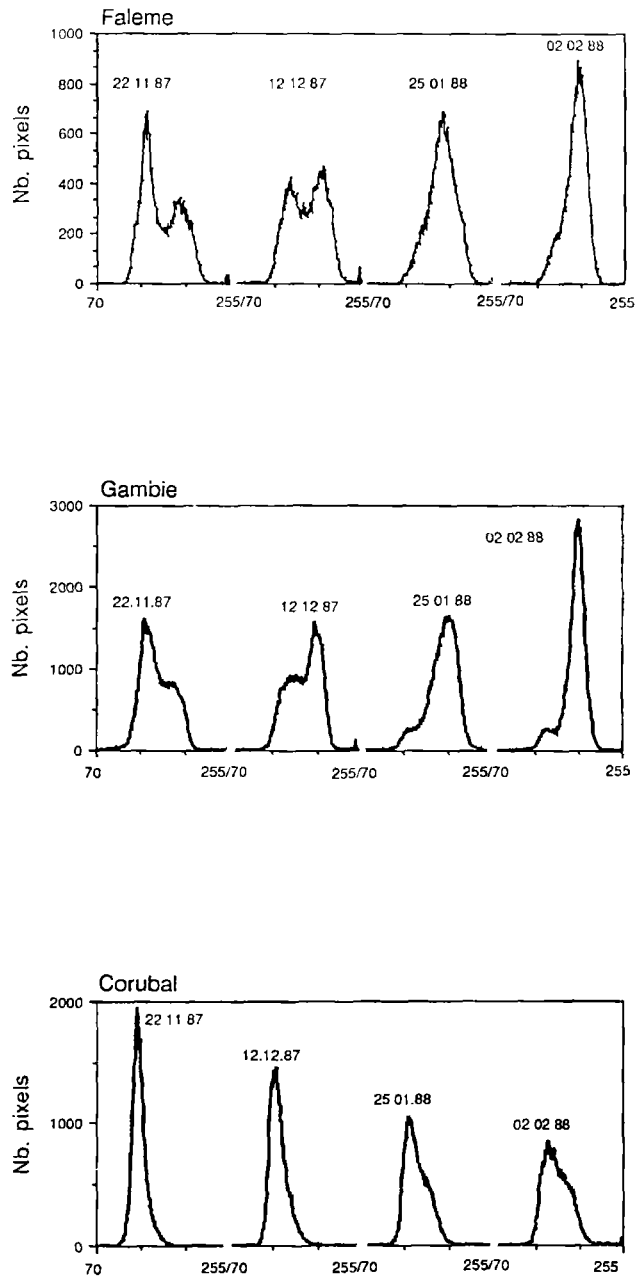


Figure 4. Histogrammes de distribution des valeurs dans le canal AVHRR-3 pour la Faleme, la Gambie et le Corubal entre novembre 1987 et février 1988

Les histogrammes de distribution des comptes numériques dans le canal 3 (fig. 4) permettent de bien visualiser les deux grandes tendances observées dans la première moitié de la saison sèche :

- uniformisation progressive (resserrement des histogrammes) sur les bassins de la Faleme et de la Gambie; il y a en quelque sorte simplification des états de surface;
- tendance inverse (étalement des histogrammes) sur le bassin du Corubal; il y a ici augmentation, dans le temps, de la complexité des états de surface.

Les variations temporelles de la dispersion semblent liées aux cycles saisonniers de la végétation et de l'humidité de surface des sols : les maximums, observés au début et à la fin de la saison sèche, reflètent très probablement l'effet que ces périodes de transition ont sur le couvert végétal; la différenciation entre types de végétation et entre strates, s'intensifie ce qui se traduit par une dispersion accrue des niveaux radiométriques observés sur le document satellitaire.

Les modalités de cette différenciation, et de la dispersion résultante, sont fortement dépendantes du type de milieu et pourraient de ce fait constituer un excellent paramètre de description quantitative des modifications intervenant au sein des bassins versants étudiés. Cette approche est complémentaire des travaux visant à mettre en relation l'organisation spatiale du couvert ligneux et l'état du milieu en zone sahélienne (Jacqueminet *et al.*, 1989) ou de ceux qui tendent à décrire l'hétérogénéité dans la distribution de la couverture végétale au moyen de paramètres statistiques (Aman *et al.*, 1989).

Après une période de calibration de ce paramètre par des observations au sol sur les bassins, on peut envisager de l'utiliser de façon systématique dans une optique de suivi opérationnel des changements d'états de surface.

3.3 Dynamique des feux de brousse

En tant qu'agent de modification des caractéristiques de surface, les feux de brousse doivent faire l'objet d'un suivi dans tout programme de surveillance opérationnel des bassins de cette partie de l'Afrique de l'Ouest. Parmi les instruments d'observation de la Terre actuellement disponibles, le capteur AVHRR occupe une place de choix pour le suivi de ce phénomène à cause d'une part de ses caractéristiques spectrales (trois bandes dans l'infrarouge thermique), d'autre part de sa répétitivité élevée.

De fait, de nombreux travaux de recherche s'attachent à intégrer l'information dérivée des images NOAA-AVHRR dans les méthodes de suivi des feux actifs (Matson *et al.*, 1984; Stephens et Matson, 1987; Grégoire *et al.*, 1988; Langaas et Muirhead, 1988; Belward et Lambin, 1989) ou de suivi des superficies affectées par le feu (Frederiksen *et al.*, 1989) et ce dans différentes régions de la ceinture intertropicale du globe (Sadowski et Westover, 1986; Malingreau et Tucker, 1988).

Le travail présenté ici s'appuie uniquement sur l'information fournie par le canal AVHRR-3, dans l'infrarouge moyen, pour dégager des intensités et des calendriers de feu. La figure 5 montre ainsi, pour chacun des cinq bassins entre novembre 1987 et décembre 1988, le nombre de pixels à saturation (niveau de quantification 255). Il ne s'agit pas là d'un comptage exact des feux actifs, et encore moins d'une estimation des zones brûlées. Ces données représentent par contre un très bon indicateur de l'intensité du phénomène et de son calendrier.

On distingue ainsi la période des feux dits précoces, en début de saison sèche (novembre et décembre sur le graphique), et celle des feux tardifs (mars, avril et mai sur le graphique). Pour ces trois derniers mois, il faut noter que le grand nombre de points à saturation est dû en partie à l'échauffement général du milieu et non directement aux feux : la part revenant à l'activité des feux de brousse ne peut malheureusement pas être quantifiée à partir du seul canal 3; pour

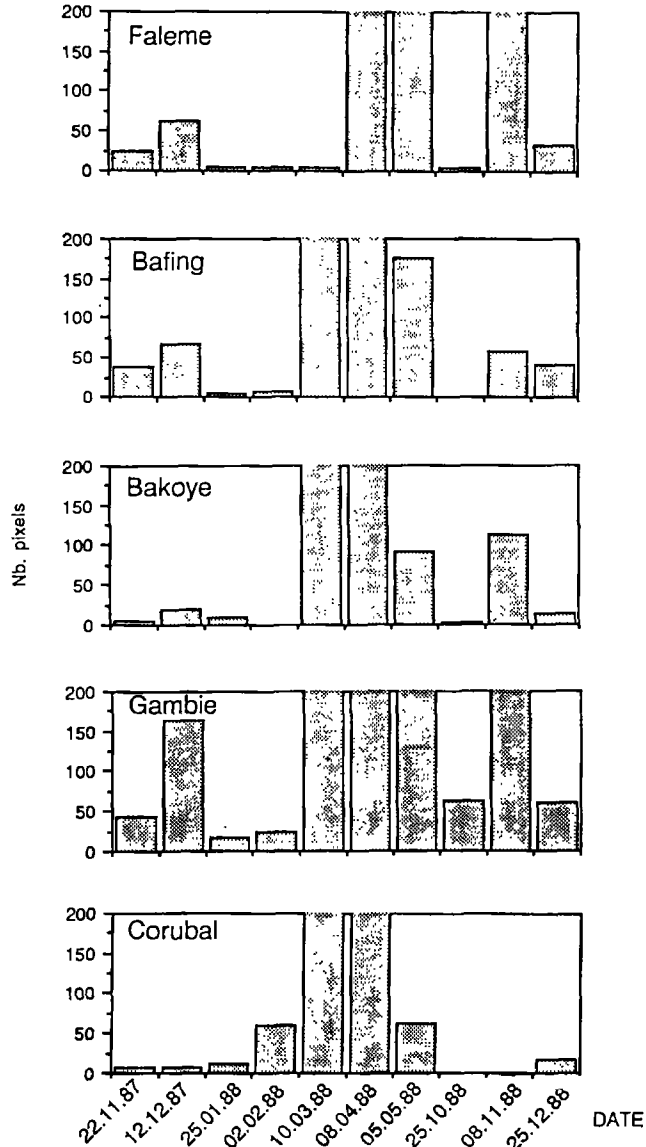


Figure 5. Nombre de pixels à saturation dans le canal AVHRR-3

cette période de l'année, il faudrait s'appuyer sur les données des canaux 4 et 5. Les travaux actuels s'orientent dans cette direction.

Il est néanmoins possible d'évaluer l'intensité respective des deux processus.

Ainsi, le Corubal montre essentiellement des feux de fin de saison sèche pour la saison 1987-1988 (novembre 1987 à mai 1988). Il en est de même pour le Bakoye. Bafing et Faleme montrent également un déséquilibre vers les feux tardifs, mais avec une intensité des feux précoces non négligeable par rapport à celle observée sur le Corubal et le Bakoye.

La situation la plus critique s'observe sur la Gambie où, aux feux tardifs de mars à mai 1988, s'ajoute un important épisode de feux en novembre 1987.

La figure 6 montre le bilan du phénomène feu pour la première moitié de la saison sèche, de novembre 1987 à février 1988 : étant pondérées par la surface des bassins concernés, ces données permettent de cerner l'impact réel du feu sur le milieu. Faleme, Bafing et Gambie montrent plus ou moins le même bilan. Le Bakoye suit un calendrier identique mais avec une intensité moindre. Le Corubal présente une situation moins critique en début de saison sèche mais a tendance à rejoindre les autres bassins à la fin de la période considérée.

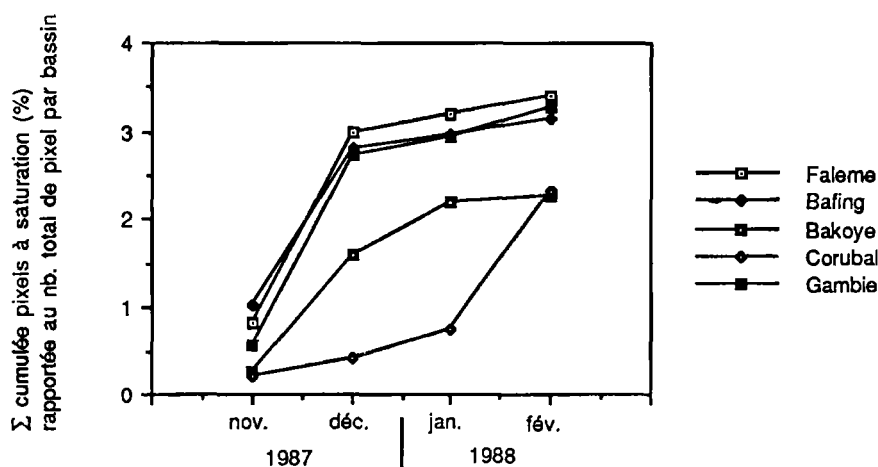


Figure 6. Évolution du nombre de pixels à saturation dans le canal AVHRR-3 entre novembre 1987 et février 1988 (somme cumulée pondérée par le nombre total de pixels de chaque bassin)

Au même titre que la variabilité des états de surface, mentionnée au point 3.2, un indice de feu cumulé peut constituer le second paramètre de suivi systématique des états de surface sur les grands bassins d'Afrique de l'Ouest.

Un autre élément intéressant de la figure 5 est le grand nombre de pixels dont le compte numérique est à saturation au mois de novembre 1988 sur les bassins de la Faleme, du Bakoye et de la Gambie. La différence par rapport à la situation de novembre 1987 est importante. Or ceci ne peut être entièrement dû à l'absence d'intercalibration entre les données fournies par NOAA 9 (jusqu'en octobre 1988) et celles de NOAA 11 (à partir de novembre 1988). En effet, les situations de décembre 1988 et décembre 1987 sont très comparables. Il y a donc bien eu des épisodes de feux précoces particulièrement importants sur ces bassins pour la saison sèche 1988-1989. Le suivi de la situation dans le deuxième tiers de la saison sèche 1988-1989 devrait permettre de dire si à ceci s'ajoute un accroissement des feux tardifs ou si au contraire il y a eu modifications des calendriers de feu au profit des feux précoces.

4 Conclusions et perspectives

Les données enregistrées par le capteur AVHRR ont montré les possibilités qu'elles offraient pour la caractérisation des changements saisonniers des états de surface pouvant avoir des répercussions sur les écoulements. Elles ont montré également leur capacité à fournir

l'information au niveau de perception requis dans le contexte de l'Afrique de l'Ouest qui ne peut être que régional.

Le travail réalisé sur les affluents du Haut Sénégal, sur la Gambie et le Corubal indique que, partant de ces enregistrements, des indices ou des paramètres descriptifs des changements d'état de surface peuvent être définis : en particulier les variations temporelles de l'hétérogénéité spatiale et l'indice de feu cumulé en fin de saison sèche.

Dans le cas spécifique de l'impact des feux de brousse, il est possible de vérifier l'importance relative des feux précoces et des feux tardifs.

Enfin, il apparaît qu'un suivi des conditions de milieu sur de grands bassins peut aider à définir les régions prioritaires pour les aménagements à fins hydrologiques.

Le travail actuel s'oriente vers la constitution d'une banque de données regroupant, pour quelques grands bassins d'Afrique de l'Ouest, cinq paramètres permettant de caractériser les états de surface : l'indice de végétation normalisé, l'albédo, la température de brillance, l'indice de feu cumulé et un paramètre descriptif des changements temporels de l'hétérogénéité spatiale.

Une telle banque de données, dont la référence géographique est le bassin versant, devrait venir en complément aux banques de données hydro-météorologiques existantes.

Sur le plan de la recherche, trois axes mériteraient d'être suivis : 1) la définition des niveaux de perception spatio-temporels les plus appropriés pour une intégration de la télédétection spatiale, comme source d'information, et des modèles hydrologiques d'écoulements ou de transports solides; 2) la recherche de critères permettant de quantifier la dégradation d'un milieu; 3) les apports possibles de ce type d'études dans les programmes traitant des changements planétaires.

5 Références

- AMAN, A., F. LAVENU, A. PODAIRE, G. SAINT, J.-C. MENAUT, J.-P. PUYRAVAUD, G. MERSADIER, G. SERPANTIE et L. TEZENAS DU MONTCEL, 1989. Étude de la production primaire de différentes savanes : apport des images à haute résolution SPOT XS et Landsat-TM. —Bulletin de la Société française de photogrammétrie et de télédétection, n° 114 (1989-2), p. 40-44.
- BELWARD A. S. et E. LAMBIN, 1989. Limitations to the identification of spatial structures from AVHRR data. —International Journal of Remote Sensing, sous presse.
- FREDERIKSEN, P., S. LANGAAS et M. MBAYE, 1989. NOAA-AVHRR and GIS-based monitoring of fire activity in Senegal, a provisional methodology and potential applications. —Third International Symposium on Fire Ecology, Freiburg University, p. 16-20.
- GRÉGOIRE, J.-M., S. FLASSE et J. P. MALINGREAU, 1988. Évaluation de l'action des feux de brousse, de novembre 1987 à février 1988, dans la région frontalière Guinée-Sierra Leone; Exploitation des images NOAA-AVHRR. —Publication n° SPI 88.39, Centre commun de recherche de la CCE, Ispra, Italie, 23 p.
- GRÉGOIRE, J.-M., 1989. Effect of the dry season on the vegetation canopy of some river basins of West Africa as deduced from NOAA-AVHRR data. —Hydrological Sciences Journal, sous presse.
- GUILLEMYN, D., 1989. Le dépérissement des mangroves en Gambie, vu par SPOT. —Bulletin de la Société française de photogrammétrie et de télédétection, n° 114 (1989-2), p. 56-58.
- JACQUEMINET, C., C. MERING, Y. PONCET et M.-F. COUREL, 1989. Étude quantitative des formes d'organisation spatiale du couvert ligneux en milieu sahélien à partir des images satellitaires SPOT. —Bulletin de la Société française de photogrammétrie et de télédétection, n° 114 (1989-2), p. 20-22.

- JUSTICE, C. O. (réd.), 1986. Monitoring the grasslands of semi-arid Africa using NOAA-AVHRR data. — *International Journal of Remote Sensing*, Special Issue, vol. 7, n° 11, p. 1383-1622.
- KITE, G., 1989. Using NOAA data for hydrologic modeling. — *IGARSS'89*, Vancouver, vol. 2, p. 553-557.
- LANGAAS, S. et K. MUIRHEAD, 1988. Monitoring bushfires in West Africa by weather satellites. — *22nd International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Abidjan, p. 253-266.
- MALINGREAU, J. P. et C. J. TUCKER, 1988. Large-scale deforestation in the southeastern Amazon Basin of Brazil. — *AMBIO*, vol. 17, n° 1, p. 49.
- MATSON, M., S. R. SCHNEIDER, B. ALDRIGE et B. SATCHELL, 1984. Fire detection using the NOAA series satellites. — *Technical Report NESDIS 7*, USDC-NOAA, NESDIS, Washington.
- RANGO, A., A. FELDMAN, T. S. GEORGE et R. M. RAGAN, 1983. Effective use of Landsat data in hydrologic models. — *Water Resources Bulletin*, vol. 19, n° 2, p. 165-174.
- RASMUSSEN, K., 1989. The CHIPS software package. — *CHIPS newsletter n° 1*, Institute of Geography, University of Copenhagen.
- SADOWSKI, F. G. et D. E. WESTOVER, 1986. Monitoring the fire-danger hazard of Nebraska rangelands with AVHRR data. — *Tenth Canadian Symposium on Remote Sensing*, Edmonton, vol. I, p. 355-363.
- SALOMONSON, V. V., 1989. Spaceborne technology contributions to hydrological studies in the context of global change. — *IGARSS'89*, Vancouver, vol. 2, p. 539-541.
- SOLOMON, S. I., A. PIETRONIRO, W. WISHART, S. PIEYNS, B. GUILLOT et M. CARN, 1988. Application de la télédétection à l'évaluation des ressources en eau du Sahel. — *Veille climatique satellitaire*, n° 24, p. 26-37.
- STEPHENS, G. et M. MATSON, 1987. Regional and global fire detection using AVHRR data. — *21st International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Ann Arbor, Michigan, p. 447-457.

10

L'expérience communautaire en matière d'utilisation de la télédétection dans la lutte contre la sécheresse et la désertification en Afrique de l'Ouest

ROBERT GRÉGOIRE

*Direction générale du développement, Commission des communautés européennes,
200, rue de la Loi, 1049 Bruxelles, Belgique, téléphone : 235-11-11, télécopieur : 236-27-25, télex : COMEU B 21877*

Résumé

Dans les régions soudanaises et sahéliennes de l'Afrique de l'Ouest, une longue saison sèche annuelle fait que l'eau est l'élément déterminant de l'écologie locale. De tout temps, l'homme a cherché à s'adapter à ce contexte peu favorable à la vie rurale, mais une sécheresse plus marquée, se superposant à l'explosion démographique, a ouvert aujourd'hui la route à la désertification. La lutte contre ce fléau est une des priorités de la politique communautaire menée en Afrique de l'Ouest en collaboration avec les États de la sous-région. Un gros effort est fait dans ce sens pour répondre à l'ampleur du problème depuis la Convention d'association Lomé III et s'amplifiera sous Lomé IV qui sera signée fin décembre 1989. Les techniques de télédétection y tiennent une place importante pour suivre, dans le temps et dans l'espace, l'évolution du phénomène pour mettre rapidement en évidence les secteurs sur lesquels il faut concentrer l'effort. À titre d'exemples, on peut citer les études menées par une dizaine d'instituts européens pour mieux cerner la dynamique des phénomènes de désertification au sud du Sahara afin de déboucher sur une carte de sensibilité à la désertification des principales entités écologiques et un projet d'aménagement de bassins versants en Guinée afin de limiter les risques d'érosion en vue d'une régulation des débits des grands fleuves de l'Afrique de l'Ouest. Mais reste posé le problème du transfert de technologie car la plupart des pays n'ont pas le personnel et surtout les équipements nécessaires pour une utilisation rationnelle des informations que fournit la télédétection.

1 Sécheresse et désertification en Afrique de l'Ouest

1.1 Définitions et principales caractéristiques dans l'espace et dans le temps

En Afrique de l'Ouest, la sécheresse, l'absence ou la diminution du volume d'eau tombé sous forme de pluie ou véhiculé par des fleuves venus de zones plus humides, a toujours été un des éléments déterminants des différentes strates climatiques à l'exception de la zone côtière. Celles-là se caractérisent annuellement par une plus ou moins longue saison sèche qui peut atteindre neuf mois au Sahel et, dans tous les cas, 6 à 7 mois dans les autres zones climatiques; l'autre saison, dite d'«hivernage», se caractérise par des pluies tombant en averses violentes, de répartition irrégulière dans le temps et l'espace, le volume global diminuant du sud au nord.

Telle qu'on la perçoit actuellement, la sécheresse n'est qu'une accentuation de ces phénomènes : la période pluvieuse se contracte dans le temps et surtout le volume d'eau tombé diminue tandis que la répartition des pluies, dans le temps et dans l'espace, devient encore plus irrégulière en allant du golfe du Bénin vers le rebord sud du Sahara.

Si globalement le volume des pluies semble diminuer quand on l'analyse sur des périodes de plusieurs siècles, voire de plusieurs millénaires, on peut remarquer des cycles de quelques dizaines d'années où une plus grande sécheresse succède à une période plus pluvieuse. C'est le cas depuis le début des années septante qui fait suite à la phase pluvieuse des années 50 et 60.

La désertification, dont nous donnerons la définition suivante : «évolution négative de la valeur agricole de la terre, qu'elle porte cultures, pâturages ou forêts», se caractérise par une série de phénomènes essentiellement évolutifs dans le temps et l'espace et qui, en Afrique de l'Ouest, porte sur des dizaines de millions d'hectares. La sécheresse n'en est pas la seule cause, même si elle en est la cause principale.

L'homme y joue un rôle important comme accélérateur de phénomènes par les feux de brousse, par le dessouchage des terrains de cultures, par la régression voire la disparition des jachères, par l'introduction de mauvaises techniques culturales qui facilitent l'érosion des sols, par la réalisation inconsidérée d'aménagements hydro-agricoles sans contrepartie pour les troupeaux transhumants, en favorisant la remontée du sel par un mauvais drainage, etc., pour ne citer que quelques causes bien connues.

Et cet homme est aussi bien le paysan ou le pasteur que le décideur national ou étranger, politique ou financier.

1.2 L'homme face à la sécheresse

De tout temps, l'homme a cherché à s'adapter à ce contexte peu favorable à la vie rurale par le nomadisme, les cultures de décrue et plus récemment les aménagements hydro-agricoles et l'utilisation de plantes à cycle court. Par ailleurs, par le parage des animaux et les longues jachères voire le découpage des champs en bocage, l'utilisation des arbres fourragers pour assurer le couvert des terrains de culture et l'étalement dans le temps des ressources fourragères, il essayait d'améliorer la structure physique du sol pour lui permettre de conserver le maximum d'eau à mettre à la disposition des cultures entre chaque pluie, tout en créant un microclimat luttant contre les longues périodes où souffle un vent sec et chaud, l'harmattan.

Une sécheresse plus marquée dans le temps et dans l'espace, une explosion démographique chez l'homme et le croît excessif de ses troupeaux, un certain contexte

économique ont fait sauter ces frêles barrières que l'homme essayait de dresser contre un climat où l'eau a toujours été la caractéristique prédominante.

Les conséquences graves pour l'homme de cette conjonction de faits, qui souvent n'avaient pas à l'origine de rapport entre eux, ont été largement mises en évidence par les médias donnant ainsi l'impression qu'il s'agissait d'une situation nouvelle alors que l'on peut retrouver des périodes de plus grande sécheresse pendant les deux guerres mondiales (1914-1918 et 1939-1945) et à la fin du XIX^e siècle pour ne citer que des exemples récents.

La période de sécheresse actuelle a été en outre marquée par deux phénomènes qui, eux, sont nouveaux : l'exode rural vers les villes, villes nullement préparées à recevoir une telle masse d'hommes ruraux et dans tous les cas étant incapables de créer des emplois en nombre suffisant. Cette concentration excessive des hommes a eu des conséquences très graves sur l'écologie péri-urbaine, notamment par le déboisement qu'elle a entraîné pour satisfaire les besoins énergétiques familiaux et artisanaux brutalement croissants.

Le deuxième phénomène est l'émigration sauvage de nombreux pasteurs et paysans soudano-sahéliens, habitants du plateau Mossi par exemple, vers les zones plus arrosées, situées à la limite nord de la forêt subhumide, où ils s'installent à demeure détruisant une région à écologie fragile mais qui, jusqu'alors, protégeait les zones vraiment humides bordant le golfe de Guinée. Située autour des isohyètes 1 000 à 1 500 mm et à cheval sur le dixième parallèle nord, cette zone a été ouverte aux hommes et à leurs animaux par l'éradication de l'onchocercose et, dans une moindre mesure, de la maladie du sommeil. Il est urgent d'y intervenir massivement, si l'on veut s'en servir comme d'une vraie zone d'accueil des hommes et des animaux fuyant la sécheresse sans que ceci n'entraîne la destruction, comme c'est le cas actuellement, de cette ultime barrière de protection contre «l'avancée du désert».

Enfin, il faut noter que l'on assiste, depuis qu'une amélioration relative du climat s'est faite jour vers la fin de la décade 80, à une certaine remontée des nomades vers le Sahel steppique, tandis que les gouvernements locaux, appelés à traiter de problèmes urgents à court terme, risquent de se démobiliser en partie et donc de ne pas utiliser cette situation relativement favorable sous le plan climatique pour lutter plus efficacement contre les effets de la sécheresse notamment par des plantations d'arbres sur les champs de cultures et par une meilleure gestion de la forêt naturelle. Dans la négative, on risque de se retrouver, lors de la prochaine période sèche, dans une situation encore plus dramatique que celle que nous avons connue récemment.

2 La politique communautaire en matière de lutte contre la désertification

De la communication de la Commission au Conseil européen en octobre 1981 «Pour un plan d'action contre la faim dans le monde», à celle au Conseil de Luxembourg d'avril 1986 «Protection des ressources naturelles et lutte contre la désertification en Afrique», en passant par le conseil des Chefs d'État de Milan en juin 1985, la participation aux trois réunions du COMIDES à Dakar et Alger en septembre 1984, novembre 1985 et juin 1988, à Silva, à Paris en janvier 1986, aux conférences africaines sur l'environnement du Caire en décembre 1985 et de Nairobi, la Communauté européenne a montré, à chacune de ces occasions, l'intérêt qu'elle portait à ces graves questions intimement liées : lutte contre la faim et défense des facteurs naturels de production (Commission des communautés européennes, 1986).

Mais il faut noter aussi, le glissement d'une priorité à court terme, lutter contre la faim au début des années 80, à celle à plus long terme à partir de l'année 1986 qui, tout en gardant

cet objectif, cherche à protéger les facteurs naturels de production que sont l'eau, le sol et le microclimat.

Après avoir lutté contre les conséquences immédiates de la désertification, on concentre donc l'effort sur ce qui apparaît comme étant un moyen privilégié de lutte contre ce phénomène.

Tout ceci se retrouve dans la mise en oeuvre de la politique communautaire :

- le court terme : le plan d'urgence (1983 et 1984);

- le moyen terme : le programme de relance et de réhabilitation (1985-1986);

- le long terme : le plan d'action européen à long terme contre la sécheresse et la désertification en Afrique.

Dans le cadre de la Convention de Lomé III, les programmes indicatifs nationaux et régionaux des pays de l'Afrique de l'Ouest, ainsi que les réunions des Ordonnateurs nationaux du Fonds européen de développement à Praia (Ile du Cap Vert) en octobre 1986 et à Cotonou (Bénin) en mars 1987, ont permis de concrétiser, pour la sous-région de l'Afrique de l'Ouest, la volonté exprimée dans le plan d'action en donnant les moyens financiers indispensables.

La future convention Lomé IV, dont la négociation entre États ACP et CEE se termine, donnera elle aussi - parmi ses objectifs prioritaires - une place importante à la lutte contre la désertification et la sécheresse; mais celle-ci sera un élément d'un objectif plus vaste celui de la «Défense de l'environnement et de protection des facteurs naturels de production». L'expérience a en effet montré que les zones urbaines et industrielles et les zones rurales humides sont elles aussi gravement confrontées au problème de la dégradation de leur environnement.

3 La lutte contre la sécheresse et la désertification

3.1 Que peut-on faire contre la sécheresse en tant que phénomène climatique?

Nous nous trouvons largement désarmés quand il s'agit d'enrayer la sécheresse en tant que phénomène climatique car ses causes connues et donc leurs modifications éventuelles - au moins pour le présent et le proche avenir - dépassent les capacités techniques humaines. Pourtant, il nous est en principe possible de peser partiellement sur le volume d'eau tombé dans les régions soudano-sahéliennes. Il est en effet actuellement admis que la forêt humide constituant une épaisse ceinture autour du golfe de Guinée rejette dans l'atmosphère une partie des précipitations importantes qu'elle reçoit et que cette vapeur d'eau constituerait jusqu'à 30% du volume d'eau tombé sur les zones plus sèches situées au nord, entre le 12° et le 16° parallèles, dans la mesure où le front intertropical remonte suffisamment haut en latitude. Il s'agirait donc de préserver cette forêt dont la superficie s'amenuise rapidement sous les coups de buttoir de l'homme qui ne la gère pas d'une manière satisfaisante se contentant dans la plupart des cas de l'exploiter sans souci du futur.

En outre, sur son front nord, cette forêt humide se prolonge par une forêt tropicale sèche ou humide de transition qui lui fait un écran protecteur vis-à-vis de l'agressivité du climat soudano-sahélien.

Depuis la dernière sécheresse, cette bande de terrain à dominante forestière, qui s'étend de chaque côté du 10° parallèle nord, est en train d'être largement entamée par l'homme et son bétail fuyant la sécheresse et par les feux sauvages qu'il allume. Ce phénomène de migration spontanée a été favorisé par l'éradication de l'onchocercose le long des nombreux fleuves et rivières qui la traversent.

Il devient extrêmement urgent de mettre sur pied un véritable plan d'aménagement de ce double espace forestier si l'on veut sauver ce qui est encore sauvable et ainsi notamment assurer le maintien des précipitations sur les régions plus au nord. La tâche est immense dans le temps et dans l'espace mais il est nécessaire de s'atteler à sa mise en oeuvre.

À l'autre extrémité de l'échelle des superficies, il faut s'efforcer de maintenir ou de reconstituer des microclimats par la mise en oeuvre ou la revitalisation de toute une série de techniques qui protègent les plantes cultivées contre les vents chauds et secs (brise-vent, cultures alternées, bocages) ou plus simplement la terre arable contre le soleil, par un couvert arboré plus ou moins dense en saison sèche mais qui ne gêne pas les cultures en saison des pluies comme par exemple, en utilisant le *Faidherbia albida* là où ses exigences de sol et d'eau le permettent.

Ces microclimats, qui ne sont souvent que la conséquence d'une bonne gestion par l'homme de la terre, de l'eau et de la végétation naturelle dont il dispose, sont généralement à dimension humaine et, à ce titre, sont un des éléments constitutifs du terroir villageois ou pastoral.

3.2 Que peut-on faire et surtout comment doit-on agir contre les processus de désertification?

S'il est difficile de lutter contre la sécheresse en tant que telle, il est par contre plus aisé - sous certaines conditions - de lutter contre ses effets négatifs sur l'agriculture ou plus largement sur la vie rurale.

La plupart des thèmes techniques à mettre en oeuvre sont bien connus et ont été suffisamment expérimentés sur le terrain pour que l'on puisse en affirmer le bien-fondé et pourtant le désert «avance» toujours car les actions énoncées ne sont pas à la «démesure» dans le temps et dans l'espace des processus de désertification, pour lesquels on doit parler en millions d'hectares, alors que l'impact géographique des actions menées se compte en milliers voire tout au plus et, très récemment, en dizaines de milliers d'hectares.

Compte tenu des moyens humains et financiers limités, il faudra concentrer géographiquement les interventions sur les zones écologiquement bien délimitées où le potentiel agricole reste réel, humainement mobilisable et où l'effet d'entraînement sur les régions voisines sera le plus grand pour se rapprocher le plus possible de l'échelle à laquelle se joue l'impact sécheresse. Il est nécessaire en effet d'atteindre une certaine «masse critique», en deçà de laquelle, la pesanteur de l'homme et des facteurs écologiques défavorables finira par faire disparaître l'action réalisée. Cette masse critique devrait selon le cas, dépasser les dizaines de milliers d'hectares, voire les centaines de milliers et ce, le plus rapidement possible afin de gagner de vitesse l'extension des phénomènes de désertification dont le processus est heureusement assez lent. Ceci postule que les interventions soient maintenues pendant des dizaines d'années. Notons que la prodigieuse capacité de récupération des groupements végétaux en zone soudano-sahélienne, dès que les conditions écologiques s'améliorent, montre que la lutte peut ne pas être vaine.

Si l'homme au sens très large du terme, c'est-à-dire aussi bien le paysan que le décideur politique ou financier, est un des éléments les plus actifs du processus de désertification, il est seul capable de le ralentir, voire de le stopper. Pour ce faire, il faut qu'il s'engage, volontairement et en toute connaissance de cause, dans la lutte à mener et ce, pour de longues années. Ce n'est qu'à ces conditions que la participation de la population, véritable préalable au succès dans la lutte à mener, deviendra réalité.

Sur le terrain, ceci postule d'asseoir les actions à mener sur la notion de «terroir villageois» ou de «terroir pastoral», comme la plus petite zone d'intervention géographique pour l'aménagement de l'espace.

L'excellente connaissance des éléments constitutifs de cette aire géographique à dimension humaine et notamment, de tous les problèmes qu'elle lui pose, doit permettre au groupe d'humains concerné de bâtir avec des appuis extérieurs un nouvel équilibre écologique, qui bloquera les processus de désertification et les conséquences néfastes de la sécheresse.

Il importe que ce nouvel équilibre écologique touche rapidement un très grand nombre de terroirs qui, s'épaulant mutuellement, devraient permettre d'atteindre la masse critique dont il est question plus haut.

4 La place des techniques de télédétection

Il importe de préciser avant tout développement sur cette question qu'il s'agit du point de vue de l'utilisation du client de ces techniques.

4.1 Caractéristiques principales de ces techniques

L'importance du facteur superficie, celle du suivi dans le temps et dans l'espace de phénomènes essentiellement dynamiques, l'urgence qu'il y a à intervenir, la difficulté à obtenir des séries d'informations fiables privilégient les techniques de télédétection dans l'éventail des instruments dont on dispose.

Et ce d'autant plus que, malgré une prise de conscience maintenant assez générale des problèmes que pose la désertification, l'homme est encore perdant dans la course dramatique qui se joue entre l'extension de ces phénomènes et la lutte menée pour les freiner, ou même pour les arrêter.

Les techniques de télédétection satellitaire permettent en effet une vue d'ensemble de certains phénomènes terrestres ainsi que de ses ressources naturelles.

En outre, la répétitivité de ces informations donnent une vision dynamique des phénomènes observés.

4.2 Leur champ d'application possible au titre de la lutte contre la sécheresse et sa première conséquence : la désertification

Au titre de la connaissance du milieu naturel et des ressources renouvelables ou non pour :

- hydrologie des rivières et fleuves, suivi des crues;
- inventaire et suivi des mares pérennes ou non en zone steppique;
- inventaire et évolution des superficies boisées, en pâturage, cultivée ou en jachère pour une écologie donnée;
- suivi et contrôle des feux de brousse;
- analyse dynamique de la phytomasse et charge en bétail pour les pâtures sahéliennes et soudaniennes;
- identification et suivi des zones à haut risque d'érosion.

Au titre de la connaissance des phénomènes météorologiques dans leur relation avec une bonne gestion du milieu dans :

- la prévision des disponibilités en eau de crue des fleuves;
- le bilan hydrique par zone écologique aussi homogène que possible;
- Pour la cartographie :
 - mise à jour rapide et économique des documents cartographiques face au déplacement de l'habitat humain ou de l'occupation des sols par exemple;
 - établissement de documents thématiques : pâturages, etc.;
- Pour la démographie :
 - migration, nomadisme, amorce de la sédentarisation, etc.

4.3 Condition d'utilisation pratique de la télédétection : les limites d'emploi

Il est très vite apparu que si l'on veut pouvoir exploiter toutes les potentialités de la télédétection, il importe :

1) de bénéficier d'un éventail de capteurs ayant des caractéristiques diverses notamment dans les domaines de la résolution au sol et de la résolution spectrale;

2) de recevoir le plus rapidement possible les informations satellitaires.

Ce sont ces raisons qui ont amené la Communauté, à l'aide du budget Commission, à financer la mise à hauteur de la station de Mas Palomas aux îles Canaries pour lui permettre de recevoir, en direct, les satellites Landsat, NOAA-AVHRR et SPOT, et ce, pour la quasi-totalité de l'Afrique de l'Ouest.

En outre, cette station a reçu, depuis 1987, les équipements nécessaires pour assurer les prétraitements des données et la fourniture des «quick-looks».

Grâce à ces équipements complémentaires, un grand progrès a été fait au point de vue rapidité de transmission des informations satellitaires vers les laboratoires européens de traitement des images (de 2 à 3 mois à 10 jours). Mais c'est encore trop lent pour pouvoir intervenir en temps utile, c'est-à-dire presque réel dans certains domaines tels que : la prévision des crues, le suivi des cultures, superficies notamment, en vue d'une estimation de la production, etc.

La situation est encore plus préoccupante pour l'utilisation par les bénéficiaires finaux des informations résultant du traitement des images. On peut dire qu'actuellement, à quelques exceptions près, l'information reste presque intra-européenne malgré les programmes de formation de spécialistes nationaux, exécutés au CRTO (Centre régional de télédétection de Ouagadougou, Burkina Faso) par exemple, ou en Europe. Car les structures nationales spécialisées dans le domaine des techniques de télédétection et qui devraient servir d'interface avec l'utilisateur final sont quasi inexistantes ou dotées de moyens encore insuffisants, si l'on fait exception du Sénégal.

Ceci a une première conséquence : les utilisateurs thématiques qui sont le dernier maillon de la chaîne et qui, souvent, ont reçu une bonne formation perdent rapidement leur connaissances techniques, faute de les mettre en pratique.

Une deuxième conséquence, complémentaire de la première, est le manque d'informations sur ces techniques qui sont incomprises ou mal comprises par les décideurs politiques et techniques du développement, soit qu'ils les considèrent comme un luxe ou les jugent trop sophistiquées pour les pays en voie de développement, soit qu'ils y voient une solution miracle à tous les maux, ce qui n'est pas mieux.

Un autre point important est la distorsion croissante entre la masse énorme d'informations fournies par les satellites, après traitement des données, les moyens importants qu'il faut mettre en oeuvre pour accéder aux satellites, pour traiter et transmettre les informations, et l'usage - pour l'instant très limité - qui en est fait concrètement sur le terrain ou plus simplement au niveau des projets où ces techniques interviennent.

On a le sentiment d'être en présence d'une chaîne dont les premiers maillons sont particulièrement solides et bien attachés les uns aux autres ou sont au moins en voie de l'être, tandis que les autres maillons sont extrêmement légers et peu soudés les uns aux autres.

Si nous ne renforçons pas cette deuxième partie de la chaîne, l'emploi de la télédétection, pourtant si nécessaire dans la lutte contre la désertification, restera marginal : on est en droit de se demander, par exemple, si ce bel outil si riche en potentialité qu'est la station de Mas Palomas ne doit pas être complété d'urgence par un réseau de structures nationales spécialisées dans ce domaine et servant d'interface active à l'utilisateur final pour :

- transmission des questions et demandes de la base;
- diffusion et adaptation à la situation locale des informations reçues de l'extérieur;
- coordination à l'échelon national des programmes de télédétection;
- valorisation de la formation des spécialistes formés ailleurs en les insérant dans une structure où leur capacité technique trouve à s'employer voire à se développer.

Il va sans dire que la prise en charge financière de ces structures devra être le fait, pour encore de nombreuses années, de l'aide extérieure, comme cela est le cas pour Mas Palomas et les relais régionaux du CRTO ou d'AGRHYMET qui eux aussi souffrent de la faiblesse du maillon national (Grégoire, 1984).

5 Quelques exemples de projets financés par la Communauté économique européenne et mettant en oeuvre des techniques de télédétection

5.1 Études «Caractérisation par les techniques de télédétection de la dynamique de la désertification à la périphérie sud du Sahara»

Si la dégradation des facteurs de production a été particulièrement remarquée pendant la phase de forte sécheresse de la période 1973-1984, cette dégradation est malheureusement un élément permanent auquel sont confrontés les pays de la périphérie du Sahara en Afrique de l'Ouest.

C'est donc une des composantes fondamentales sur lesquelles les gouvernements concernés doivent asseoir leurs réflexions en matière de développement rural et bâtir leur stratégie d'intervention.

Pour aider ces gouvernements dans leur lutte contre la désertification, la Commission des Communautés européennes finance depuis 1984 sur son budget propre un programme régional d'études destiné à mieux appréhender la dynamique des principaux phénomènes qui caractérisent la désertification.

L'ampleur de la zone géographique concernée, le caractère évolutif des phénomènes à étudier, l'insuffisance d'informations chiffrées fiables en matière de dégradation de l'environnement, ont tout naturellement poussé à utiliser largement les techniques de télédétection, en étudiant les possibilités réelles pratiques et les procédures optimales de transfert de cette technologie en Afrique soudano-sahélienne.

D'une manière plus spécifique, ce programme a pour objectif de développer, tester et démontrer la contribution de la télédétection à l'étude de la désertification et de déterminer les procédures optimales pour transférer la technologie en Afrique.

Le groupe d'étude constitué par les instituts de recherches de sept pays membres de la Communauté (Italie, Belgique, France, Danemark, République fédérale d'Allemagne, Royaume-Uni et Irlande) travaille sur les thèmes suivants :

- estimation des précipitations d'après les données satellitaires au Niger;
- suivi continu de l'érosion éolienne au Mali;
- estimation de biomasse ligneuse dans la zone d'impact des grandes villes soudano-sahéliennes (au Mali et au Burkina Faso);
- suivi continu des pâturages sahéliens au Niger;
- exploration de eaux souterraines dans l'Adrar des Iforas au Mali;
- modélisation hydrologique du Haut-Sénégal en Guinée et au Sénégal;
- études du bilan énergétique et hydrologique au Sénégal, Niger et Burkina Faso;
- développement d'un système bon marché de traitement des données et d'images satellitaires adapté aux conditions locales, le logiciel CHIPS, pour permettre un suivi continu de l'environnement au Sahel et qui, pour l'instant, n'est utilisé que par le Centre de suivi écologique de Dakar.

Les projets ont utilisé des données provenant de différentes plates-formes et divers capteurs dont Landsat MSS/TM, NOAA-AVHRR, Météosat, SPOT et MOS-1. Les stations de réception Landsat, NOAA et SPOT à Maspalomas, récemment installées, ont considérablement amélioré la couverture des données à l'intérieur de la région qui dispose par ailleurs d'une station de réception NOAA-AVHRR à Niamey (Niger).

Les études se sont concentrées sur l'Afrique sub-saharienne, particulièrement sur le Sénégal, le nord de la Guinée, le Mali, le Niger et le Burkina Faso mais sont conçues de telle façon qu'elles ont vocation pour l'ensemble de la sous-région soudano-sahélienne.

Les principales difficultés rencontrées se situent au niveau de la fourniture des images, Landsat TM et MOS notamment, et des échanges d'informations entre les différentes équipes d'études, ce qui augmenterait considérablement l'efficacité de chacune (Justice et Prince, 1987). Un progrès important a été fait dans ce sens en 1988 et 1989 et il est prévu une réunion générale de fin de la tranche d'études en cours en 1990 au Centre commun de recherche d'Ispra à laquelle devraient participer, outre les équipes de recherches et la Commission, des représentants d'AGRHYMET, du CRTO de Ouagadougou (Burkina Faso) et de services nationaux susceptibles d'utiliser les premiers résultats.

En effet, il s'agit maintenant de déterminer ensemble, scientifiques européens et africains, les procédures optimales pour transférer la technologie mise au point sur l'ensemble de la zone soudano-sahélienne.

Dans le même esprit, mais plutôt destiné aux décideurs politiques et financiers, aux planificateurs et aménagistes, etc., sera établi en 1990 un document qui, tout en gardant valeur scientifique, donnera les résultats obtenus et les orientations souhaitables sous une présentation qui en rendra la lecture possible aux non-spécialistes de ces questions.

5.2 Projet régional d'aménagement de bassins versants élémentaires en Guinée : Fouta Djallon et haut bassin du fleuve Niger

5.2.1 Problématique

La plupart des grands fleuves soudano-sahéliens prennent leurs sources en Guinée, dénommée pour ce fait, le château d'eau de l'Afrique de l'Ouest. C'est aussi en Guinée qu'ils reçoivent l'essentiel de l'eau qu'ils vont véhiculer plus au nord dans les régions moins arrosées et pour lesquelles, ils représentent une potentialité de production agricole très importantes : potentiel qu'essaient de mobiliser les nombreux aménagements hydro-agricoles réalisés ou prévus dans leurs lits majeurs (>500 000 hectares).

Malheureusement, ces fleuves ont un régime de plus en plus torrentiel avec des crues très variables d'une année à l'autre, pouvant avoir des pointes très marquées mais, dans la plupart

des cas, peu étalées dans le temps, gênant considérablement la mise en eau des aménagements. Notons que deux barrages, d'ailleurs à vocation première hydro-électrique, Sélingué sur le Sankarani, affluent du Niger, et Manantali sur le Bafing, affluent du Sénégal, devraient jouer un certain rôle régulateur.

Les raisons de cette dégradation du régime des fleuves sont diverses mais deux raisons semblent prédominer :

- une modification climatique en Guinée où le volume des pluies a diminué depuis une dizaine d'années de 100 à 200 mm suivant les lieux et même 700 mm les années les plus sèches, avec un rétrécissement marqué de la période pluvieuse;

- une dégradation du couvert arboré, particulièrement marquée au Fouta Djallon sous la triple pression de feux de brousse sauvages, des défrichements pour mise en culture, de la dent d'un bétail domestique dont l'importance numérique va croissante.

S'il n'est pas possible présentement de modifier le climat, il est possible d'en atténuer les effets négatifs et surtout, il est possible de freiner, et peut-être à long terme, d'arrêter la dégradation du couvert arboré, et donc de lutter contre la dégradation des facteurs naturels de productions en zones agricoles.

On connaît actuellement l'essentiel des techniques permettant de freiner, voire d'arrêter, le processus de dégradation : d'ailleurs quelques applications réussies font apparaître, de ci de là, des oasis de verdure au milieu d'immenses régions de plus en plus dégradées.

La région géographique concernée, plateau du Fouta Djallon et piedmont des massifs montagneux frontaliers avec la Sierra Leone et le Libéria, couvre environ 150 000 km² soit 15 000 000 d'hectares, mais les effets se font indirectement sentir en zone soudano-sahélienne sur des superficies encore plus grandes. C'est dire l'ampleur des problèmes auxquels il importe de s'attaquer. Et ce n'est donc qu'en travaillant à cette même échelle, que l'on peut espérer avoir un certain effet, à moyen terme, sur cette situation.

Parallèlement à cela, seule une participation généralisée des populations rurales à la mise en oeuvre des techniques de défense et restauration des sols peut permettre, avec les moyens financiers dont on dispose, de toucher des superficies importantes, ce qui a comme corollaire que ces techniques doivent être simples, peu onéreuses pour pouvoir être reproductibles aisément, mais aussi que les populations y trouvent, à cette occasion, solution à leurs problèmes immédiats.

Ce sont ces différentes contraintes qui sont à la base de la méthode mise en oeuvre pour exécuter le programme d'aménagement des hauts bassins versants en Guinée, première tranche. Celle-ci concerne :

- la réalisation d'un premier train d'études en vue d'aménagements sur 250 000 hectares;
- la réalisation d'un aménagement de l'espace sur ces 250 000 hectares dans les quatre années à venir;
- le lancement d'un deuxième train d'études pour une deuxième tranche d'aménagements concernant plus de 500 000 hectares.

5.2.2 La méthode utilisée

La mise en oeuvre s'articule autour de quatre points de référence :

- une cartographie de l'ensemble des bassins versants élémentaires pour un haut bassin donné et un classement des bassins élémentaires en fonction de critères hydro-écologiques;
- une ouverture des populations au dialogue pour qu'elles expriment leurs problèmes et que soient définies avec elles les conditions de leur participation au programme;
- la mise en oeuvre, pour une meilleure gestion de l'espace rural, de techniques simples et sûres, peu onéreuses, pouvant être reproductibles dans l'espace;

- une superficie importante rapidement touchée, même si le résultat à l'unité de surface est médiocre.

Les techniques de télédétection sont à la base du premier et du dernier point et elles seules ont permis au niveau des études, et permettront au niveau des aménagements, d'atteindre ces objectifs dans un laps de temps minimum et à un coût raisonnable.

Leur emploi a été établi par l'Institut de télédétection du Centre commun de recherches d'Ispira en 1985-1988 et rodé sur un premier quadrilatère situé entre Kankan, Kouroussa, Faranah et Kissidougou concernant les bassins versants élémentaires du Niger supérieur, du Niandan, du Mafou et du Milo et couvrant environ 30 000 km². Utilisant images satellitaires Landsat, photographies aériennes au 1:50 000 et cartes au 1:200 000, la méthode a permis de cartographier les limites de 199 bassins élémentaires, d'en effectuer un zonage en huit groupes, en fonction d'un certain nombre de critères hydro-écologiques, enfin de mettre en évidence une quarantaine de bassins élémentaires particulièrement parlant au point de vue «érosion» grâce à la comparaison des images d'avril-mai 1975 et de celles de la même époque de 1985 (Grégoire et Gales, 1987).

Cette période de fin de saison sèche a été choisie afin d'éliminer les effets de la strate herbacée pour le calcul d'indice de végétation normalisée à partir des informations enregistrées par les radiomètres. La synthèse de l'imagerie et de la carte des limites de bassins permet réellement d'avoir à la fois l'information et la localisation de l'information. C'est particulièrement précieux pour les feux de brousse que l'on peut remarquablement suivre en se basant sur les informations satellitaires et plus généralement pour des interventions futures en matière de gestion de l'espace arboré (Grégoire *et al.*, 1988).

La méthode a aussi fourni une série de documents cartographiques permettant de visualiser, à un moment donné, la situation d'un bassin hydrologique, ce qui peut servir de base à une analyse dynamique de l'évolution du milieu. En outre, elle a fait apparaître un certain nombre de sites privilégiés, où l'on peut utiliser des images satellitaires à haute résolution de type SPOT qui seraient très coûteuses si l'on devait les utiliser sur l'ensemble d'un bassin.

Enfin, elle a permis, dans un laps de temps court, de cerner les limites géographiques pour les interventions des équipes socioculturelles et techniques sur le terrain afin de bâtir les avant-projets d'aménagement de l'espace en une année, 1988, avec démarrage des actions au cours de l'année 1989.

Bien sûr, les informations satellitaires ont été confrontées avec la réalité-terrain à l'occasion de missions conjointes sur le terrain par le Centre commun de recherche d'Ispira, les équipes sociologiques et techniques, et les autorités guinéennes qui ont en charge le projet.

Depuis, cette méthode a été appliquée par des bureaux d'études européens sur les hauts bassins du Sankarini, du Bakoy, de la Haute Gambie et de la Koulountou.

5.2.3 Les évolutions prévisibles de la méthode

De toutes les façons, les informations continueront d'être exploitées voire affinées sur les bases suivantes :

- examen non plus des indices de végétation moyens par bassin, mais de la répartition de valeurs d'indices au sein de chaque bassin pour mieux évaluer la superficie de chaque strate de végétation;

- choix de sites d'observation au sol pour un suivi visuel du couvert végétal;

- examen d'une évolution au sens vrai du terme : c'est-à-dire voir comment l'on est passé de la situation de 1975 à celle de 1985; pour cela utilisation des images NOAA-AVHRR de 1981-1985 et même au-delà de cette dernière date, pour une surveillance méthodique des

bassins parallèlement à l'utilisation de données à plus hautes résolutions spatiales type Landsat ou SPOT; les informations NOAA-AVHRR 1981-1985 devraient être opérationnelles en 1990 avec une première évaluation vers juin 1989;

- mise en place, en liaison avec le projet, d'un réseau de stations de collecte automatique hydro-agrométéorologiques.

5.3 Étude méthodologique pour une meilleure gestion de l'eau de surface ou souterraine en Afrique de l'Ouest

5.3.1 Gestion des eaux de surface : exemple : essais de prévisions des crues du fleuve Niger en amont du delta central nigérien

Le problème posé était le suivant : dans le cadre de l'effort que le Mali fait pour satisfaire ses besoins céréaliers, une meilleure maîtrise de l'eau par submersion contrôlée dans les plaines d'inondation du fleuve Niger ensemencées en riz devrait à la fois augmenter la production totale annuelle et surtout en atténuer les variations interannuelles suite à une pluviométrie irrégulière. D'où un programme important d'aménagements hydro-agricoles décidé par le Gouvernement malien et financé par le Fonds européen de développement. Or, malgré l'aménagement de superficies importantes, les résultats étaient loin d'atteindre les espérances, en partie à cause du manque d'informations locales fiables sur la pluviométrie, les superficies, le régime de la crue, etc., et ce qui entraînait un gaspillage d'inputs annuels très important et un mauvais emploi des investissements réalisés.

Compte tenu du contexte local, l'on s'est tourné vers les techniques de télédétection, à titre expérimental, pour connaître le plus tôt possible la crue du fleuve afin d'en déduire les emblavures à mettre en riz et donc de programmer, en temps utile, tous les inputs nécessaires pour les cultures.

Lancé en 1980, ce projet a permis d'obtenir, au point de vue méthodologique, des résultats intéressants.

Il a mis en évidence l'intérêt que peut présenter le suivi d'une série de réservoirs hydrologiques dans le haut bassin du Niger en Guinée comme indicateurs précoces de la crue utile dans la région des aménagements hydro-agricoles du Mali soit 300 à 400 km en aval.

La méthode a pu être testée pendant la saison des pluies 1986 grâce à trois images SPOT, exceptionnellement sans nuage, qui ont permis de suivre certaines mares semi-permanentes en bordure du Milo (affluent du Niger) en Guinée, comme indicatrices de l'état hydrologique d'un bassin versant.

Malheureusement, la qualité des séries d'images à haute résolution laisse souvent à désirer en saison des pluies à cause de la nébulosité abondante. Il y a là une limite à l'utilisation pratique de la méthode.

Une solution consisterait peut-être à utiliser, pendant la saison des pluies, les images NOAA plus abondantes mais à faible résolution, leur nombre permettant de profiter plus facilement des éclaircies dans la couche nuageuse, pour le suivi hydrologique du bassin et notamment des mares-témoins; tandis que l'on pourrait obtenir en fin de saison sèche ou en début de saison des pluies par les satellites à haute résolution type SPOT, un état de la situation hydrologique de départ qui servirait de référence à l'analyse hydrologique de la saison des pluies qui suit.

En outre et parallèlement, cette situation en fin de saison sèche pourrait être comparée avec celle des années précédentes et l'état de remplissage des mares-témoins à cette période, pourrait donner une première indication de ce que va être la «vie» hydrologique du bassin en question.

5.3.2 Gestion des eaux souterraines : exemple : étude de la recharge des aquifères du socle cristallin en milieu fissuré sous climats sahélien et soudanien

Dans le cadre de la lutte contre les effets de la sécheresse, la Communauté européenne participe avec de très nombreux bailleurs de fonds à une large campagne de forages qui veut répondre à la satisfaction des besoins élémentaires des populations et de leurs animaux domestiques en matière d'eau. Ceci a lieu principalement dans les zones climatiques sahéliennes et soudanaises de l'Afrique de l'Ouest.

Or, les techniques de forage deviennent de plus en plus performantes notamment dans les roches dures et l'on peut, dans certaines conditions, obtenir des débits d'eau suffisamment importants pour que l'on puisse songer à une certaine irrigation ou à l'alimentation en eau de petits centres urbains.

Les risques sont donc grands de voir tarir plus ou moins rapidement ces réserves d'eau, avec les conséquences graves que cela peut avoir sur les populations concernées, si l'on ne peut apprécier leur éventuel renouvellement.

Dans une première phase qui s'est étalée de 1984 à 1987 au Burkina Faso, on a testé, par la méthode de traceurs radioactifs (tritium, deutérium et oxygène 18), la possibilité d'abord, puis la capacité et le rythme d'une recharge possible des aquifères en milieu fissuré à partir des pluies.

On en a déduit des normes d'exploitation possible de ces aquifères, en fonction de la recharge annuelle et de sa variabilité interannuelle, ceci en vue de guider les campagnes de forage dans les roches dures et d'aider à optimiser l'usage de l'eau souterraine sans épuiser les réserves.

Au cours de la deuxième phase qui a débuté en 1988, pour satisfaire à la petite agriculture irriguée, il s'agit :

- d'améliorer les techniques de prospection en vue de découvrir plus vite des sites susceptibles de donner les débits nécessaires;

- d'observer les réactions des aquifères de milieu fissuré à des sollicitations longues et intenses sous la forme de pompages à fort débit et de définir les limites d'exploitation des milieux testés;

- de choisir des types de cultures économiquement intéressantes et utiles aux agriculteurs, et les rythmes d'irrigation compatibles avec la disponibilité des ressources en eau.

La télédétection a été utilisée à des fins de prospection par l'exploitation de plusieurs images SPOT couvrant les 3 sites expérimentaux du projet et ce sous deux aspects :

- recherche de sites favorables à l'implantation de forages à forts débits en fournissant des éléments descriptifs du milieu fissuré;

- recherche des zones aptes à la mise en culture pour la réalisation des périmètres irrigués.

Si, pour deux des sites, la participation de la télédétection a été très limitée du fait de la présence d'une importante couverture de latérite, pour le 3^e site, on a assisté à un gain très net en efficacité tant sous l'angle de l'aptitude des terres à la mise en culture que sous celui du potentiel de reconstitution de la ressource en eaux souterraines, car elle a permis de mettre rapidement en évidence des zones hydrologiquement et agronomiquement favorables qui soient aussi proches que possible les unes des autres (BRGM/Aquater, 1986).

6 Conclusions

6.1 Les aspects positifs de l'utilisation des techniques de télédétection

En simplifiant à l'extrême, avec tous les risques que toute simplification entraîne, l'on peut dire que les notions fondamentales du contrôle de la désertification sont :

- le long terme;
- les grands espaces géographiques.

Les techniques de télédétection répondent parfaitement à ces deux notions. Elles peuvent en effet analyser des phénomènes sur de longues périodes et ce, sans se soucier de frontières administratives ou humaines.

Mais ces notions de durée et d'espace sont consommatrices d'énergie et d'argent, deux éléments toujours limités : elles postulent donc un engagement politique au niveau des instances gouvernementales nationales ou sous-régionales avec aussi, parallèlement, un engagement volontaire et réfléchi au niveau du simple citoyen.

Par ailleurs, les techniques de télédétection permettent aussi un gain de temps très important, et donc finalement d'argent, par rapport aux techniques classiques permettant d'inventorier et de suivre les connaissances indispensables tel que l'évolution de la superficie du couvert arboré dans l'espace et le temps. Mieux même, elles rendent possibles ce qui, sans elles, seraient dans le contexte actuel, humainement et financièrement parlant impossible, tel qu'inventorier, classer, cartographier les bassins versants élémentaires constitutifs du haut bassin d'un fleuve donné et ce année par année.

Leurs interventions majeures semblent se situer principalement au niveau des études préparatoires à un projet de développement agricole, plutôt qu'au niveau de l'exécution du projet, si l'on fait exception de l'évaluation concomitante et du suivi des actions où elles retrouvent toute leur potentialité.

6.2 Contraintes et risques de l'utilisation des techniques de télédétection

Toutefois, les techniques de télédétection, même insérées dans un éventail d'autres techniques, chacune épaulant l'autre, ont besoin pour faire épanouir toutes leurs possibilités, d'une véritable chaîne technologique allant des satellites de support des capteurs, à l'utilisateur final qui doit pouvoir «lire» les informations tirées des images satellitaires pour un terroir donné, comme support de ses interventions en matière de développement rural - impliquant, entre autres, la lutte contre la désertification.

Or, le risque est très grand, devant l'évolution rapide des techniques et la recherche de performances accrues, au niveau de la résolution par exemple, ou sous la pression de «clients» plus exigeants dans les pays économiquement avancés, de voir cette chaîne - pourtant déjà bien légère - se distendre chaque jour davantage, creusant ainsi le fossé déjà très large entre les potentialités offertes par la télédétection et l'usage trop limité que l'on en fait pratiquement.

Sur ce point, la responsabilité des pays industrialisés doit être fortement engagée afin de limiter ce risque. Dans la négative, les techniques de télédétection ne seront pas facteurs de développement, ce développement qui est finalement le but recherché par une meilleure connaissance du processus de désertification, laquelle permettra une lutte plus efficace contre la désertification, et pour finir, la préservation des facteurs naturels de production, soubassement indispensable à tout développement solide.

7 Références

BRGM/AQUATER, 1986. La recharge naturelle des aquifères de socle sous climats sahélien et soudanien. Études expérimentales en Afrique. —Orléans.

- COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES, 1986. Communication de la Commission au Conseil et au Parlement européen. Protection des ressources naturelles- Lutte contre la désertification en Afrique. —Direction générale du développement, Bruxelles.
- GRÉGOIRE, J.-M. et D. GALÈS, 1987. Comparaison de l'état du couvert végétal arbustif et arboré en 1975 et 1985 sur le haut bassin du fleuve Niger en Guinée; exploitation de l'indice de végétation normalisé déduite des enregistrements Landsat-MSS. —Centre commun de recherche, Commission des communautés européennes, Direction générale de la recherche, Ispra.
- GRÉGOIRE, J.-M., S. FLASSE et J. P. MALINGREAU, 1988. Évaluation de l'action des feux de brousse de novembre 1987 à février 1988 dans la région frontalière Guinée-Sierra Leone. — Centre commun de recherche, Commission des communautés européennes, Direction générale de la recherche, Ispra.
- GRÉGOIRE, R., 1984. Coopération entre pays industrialisés et pays en voie de développement dans le domaine de la télédétection. —Direction générale du développement, Commission des communautés européennes, Bruxelles.
- JUSTICE, C. O. et S. D. PRINCE, 1987. Évaluation première phase de l'étude sur la caractérisation par télédétection de la dynamique des phénomènes de désertification à la périphérie sud du Sahara. —Queen Mary College, Université de Londres.

