

**ETUDE DE LA PRODUCTION PRIMAIRE DE DIFFERENTES SAVANES :
APPORT DES IMAGES A HAUTE RESOLUTION SPOT XS ET LANDSAT TM**

A. AMAN, F. LAVENU, A. PODAIRE, G. SAINT - LERTS Toulouse
J.C. MENAUT, J.Ph. PUYRAVAUD - Laboratoire d'Ecologie ENS Paris
G. MERSADIER, G. SERPANTIE, L. TEZENAS du MONTCEL
ORSTOM Ouagadougou (Burkina Faso)

RESUME

Cette étude a été conduite pour comprendre le mécanisme de la production primaire des savanes d'Afrique occidentale en utilisant les données à haute résolution SPOT XS et LANDSAT TM combinées à des mesures de terrain. Le suivi des courbes d'évolution du NDVI mesuré au sol fournit l'amplitude et la durée du cycle de la biomasse herbacée. Les relations calculées entre, le NDVI et la biomasse fraîche mesurés au sol d'une part, les réflectances dans le MIR et le rapport poids sec/poids frais de biomasse d'autre part, montrent qu'il est possible de suivre l'évolution des biomasses totale et sèche durant un cycle de production. L'évolution du NDVI calculé sur les données TM permet de décrire quantitativement et en terme de surface le recouvrement de la végétation. En combinant l'évolution des réflectances TM5 et du NDVI on peut discriminer les différents types de végétation. L'hétérogénéité dans la distribution de la couverture végétale des savanes et des steppes est décrite au moyen de paramètres statistiques.

1. POSITION DU PROBLEME ET OBJECTIFS

L'objectif scientifique de cette étude est d'évaluer la production primaire dans les savanes d'Afrique occidentale depuis la limite Sud du Sahel jusqu'à la limite Nord de zone forestière. Les données NOAA AVHRR (LAC ou HRPT : 1.1 km ou GAC : 4 km) permettent déjà d'évaluer globalement la production primaire (Loudjani, 1988) en intégrant dans la relation de Monteith (1972), qui relie la production primaire nette (PPN) à l'IPAR (efficacité de l'interception du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) par le couvert végétal), les relations établies par Hatfield (1984) et Asrar (1985) qui introduisent une relation linéaire entre le NDVI (indice de végétation normalisé) et l'IPAR. Cette estimation nécessite de disposer de séries temporelles d'images, en particulier durant la saison des pluies. Ces valeurs de biomasse estimée sont des valeurs moyennées sur des milieux où la répartition de la végétation est souvent fortement hétérogène : les données à haute résolution spatiale telles que Spot XS (20 m) et Thematic Mapper (30 m) peuvent contribuer à améliorer cette évaluation et à expliquer la signification de ces valeurs moyennes :

- en étalonnant les cycles de végétation accessibles par des données telles que AVHRR à des dates significatives de ces cycles,
- en précisant le sens de certains coefficients (coefficient de conversion du CO₂ en matière végétale),
- en fournissant des valeurs de biomasse durant la saison sèche, indispensables pour quantifier les dégagements saisonniers de CO₂ ou CH₄ par respiration de la végétation ou par feux de brousse. Notre étude contribue à cette problématique selon deux directions :
- la caractérisation des cycles de végétation,
- la caractérisation à certaines dates de l'hétérogénéité spatiale de la végétation.

2. MATERIEL ET METHODES

La zone géographique étudiée est située sur un transect Nord Sud entre 10° et 14° de latitude Nord, depuis la région du Yatenga au Nord Ouest du Burkina Faso (Site test de Bidi) jusqu'au Parc national de la Comoé au Nord Est de la Côte d'Ivoire (Site test de Ouango Fitini) au sud du transect. Ce transect est caractérisé par :

- un fort gradient de pluviométrie: 400 mm au Nord (Bidi), 1100 mm au Sud (Ouango Fitini)
- une variation importante de la durée de la saison sèche : 9 mois à Bidi et 6 mois à Ouango Fitini

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : B 26952

Cpte : ex 1 IIII P6

M

- une grande variété de formations végétales: forêts claires et savanes arborées, arbustives et herbeuses au Sud et brousses tigrées, steppes arbustives et herbeuses au Nord.

Sur les deux sites test retenus, 8 à 10 milieux échantillonnés sur des critères géomorphologiques, pédologiques et de physiologie de la végétation ont fait l'objet d'un important ensemble de mesures telles que : météorologie (station synoptique), atmosphère (épaisseur optique), caractérisation de la végétation (floristique, phénologie), récolte de la phytomasse herbacée épigée, mesures radiométriques (bandes SPOT XS1, XS2, XS3 et Landsat TM4 et TM5)

Ces mesures effectuées entre 1985 et 1988 ont concerné la saison sèche à Ouango Fitini et la saison sèche et l'hivernage à Bidi. Des images satellitaires Spot et Landsat TM ont été acquises pendant ces périodes.

3. RESULTATS OBTENUS

3.1. Analyse des mesures de terrain

L'analyse des mesures de terrain (radiométrie visible, proche infrarouge et moyen infrarouge et récolte de la phytomasse herbacée) montre qu'il est possible de caractériser l'évolution temporelle de la végétation herbacée en saison d'hivernage avec le NDVI. Les courbes d'évolution du NDVI (Fig. 1) fournissent pour le site de Bidi l'amplitude et la durée du cycle saisonnier de la végétation permettant ainsi de discriminer les différents milieux.

Sur le site de Ouango Fitini pendant la phase de dessèchement, on observe sur les couverts herbacés une décroissance du NDVI et une augmentation simultanée de la réflectance à 1650 nm. Les effets du passage des feux de brousse sont bien mis en évidence par une chute brutale des réflectances à 650, 850 et 1650 nm. Ces comportements radiométriques ont été reliés à l'évolution temporelle de la biomasse au sol. Deux types de relations statistiques (régression linéaire) ont été ainsi établis :

- NDVI/phytomasse fraîche totale

- TM5/rapport matière sèche sur phytomasse fraîche totale

Sur l'ensemble des sites-test de Ouango Fitini, le NDVI explique 67% de la variance de la phytomasse herbacée totale avec une variabilité des résultats dépendant localement de l'homogénéité des milieux : 74% de variance expliquée pour un milieu où la strate herbacée est homogène (forêt claire) contre 49% pour un milieu où la strate herbacée est discontinue (cuirasse ou bowal).

La réflectance dans le canal TM5 explique 67% de la variance du rapport poids sec / poids frais de la phytomasse herbacée pour tous les milieux échantillonnés (Fig. 2). Ces relations sont établies au cours de la phase de dessèchement, phase marquée à Ouango Fitini par une constance de la matière sèche pour chaque milieu considéré.

La part de variance résiduelle subsistant dans ces relations peut être attribuée d'une part à une forte influence du sol (qui pourrait être minimisée par des mesures radiométriques directionnelles), d'autre part à la méthode d'échantillonnage (les placettes de récolte de la biomasse et celles des mesures radiométriques ne sont pas identiques, le suivi radiométrique ayant été réalisé sur des points fixes, et sans destruction de matière). Par combinaison de ces deux niveaux de relations, on peut réaliser une identification de "classes" de matière sèche disponible et ainsi, durant la saison sèche, pallier par une approche statistique le manque de modèles décrivant l'évolution de cette matière.

Sur le site de Bidi, le comportement est fortement différent du fait de la courte durée de la saison des pluies et de la rapidité de la phase de dessèchement. On peut distinguer trois phases dans l'évolution des indices de végétation (NDVI). Le NDVI est corrélé :

- à la matière sèche en début de saison des pluies.

- à la matière sèche et à l'humidité des plantes au cours de la saison des pluies et en début de saison sèche (pourcentage de variance expliquée par la régression multiple égal à 77% sur la végétation de versants et à 58% sur la végétation de bas-fonds)

- à la structure du couvert herbacé en saison sèche.

Compte tenu de l'hétérogénéité du couvert herbacé, ces relations (établies à partir de mesures verticales) sont fortement influencées par la réponse radiométrique du sol.

3.2. Analyse des données satellitaires

Deux types de corrections ont été appliquées aux données SPOT et TM:

- passage des comptes numériques en radiances spectrales puis en réflectances exoatmosphériques

- conversion des réflectances exoatmosphériques en réflectances sol en utilisant un modèle de correction atmosphérique (Tanré et al, 1985) préétabli pour la zone tropicale en ce qui concerne le contenu en gaz (H_2O et O_2) et prenant en compte le contenu en aérosols sur la base des mesures d'épaisseur optique faites sur le terrain. Ainsi corrigées les images deviennent comparables dans le temps.

A l'échelle globale des sites, l'observation des images :

- TM (NDVI et TM5) depuis la fin de la saison des pluies (maximum de la biomasse), et pendant la phase de dessèchement,

- et Spot XS (NDVI) pendant l'hivernage sur le site de Bidi

permet de caractériser le mode et l'amplitude de l'évolution de la couverture végétale. A Bidi (zone sub sahélienne), le paysage est structuré par les bas fonds et les zones de brousse tigrée. La variation de la couverture du sol par la végétation herbacée est caractérisée en terme de surface par un phénomène de contraction/expansion partant des bas fonds et progressant sur les bas versants et glacis. Au contraire à Ouango Fitini (zone soudanienne), où les surfaces végétales restent relativement stables (en dehors du passage des feux), l'évolution saisonnière de la végétation est marquée par une variation de volume de la matière végétale présente au sol. Pour bien caractériser les cycles de la végétation à Bidi, il est donc nécessaire de disposer d'une première image satellitaire en fin d'hivernage et d'une deuxième en milieu de saison sèche; pour Ouango Fitini, trois ou quatre images semblent nécessaires : en fin de saison des pluies, durant la saison sèche, à la période d'extension maximum des feux de brousse et à la fin de la saison sèche.

C'est ce que montre l'analyse des ellipses tracées à partir des moyennes et de la matrice de variance-covariance dans le repère NDVI / Moyen infra-rouge (TM5) faite sur toutes les parcelles représentatives de chaque site test (Fig. 3). On constate qu'il est possible d'établir un modèle basé sur le sens et l'amplitude des évolutions temporelles NDVI/MIR pour les différents milieux et de classer ces milieux par rapport à ce modèle d'évolution.

3.3. Analyse de l'hétérogénéité de la couverture végétale

L'utilisation complémentaire de données de type AVHRR à haute répétitivité et SPOT ou Landsat TM à haute résolution spatiale nécessite de prendre en compte les problèmes de changement d'échelle liés aux différences de résolution spatiale de ces capteurs : les uns (SPOT et TM) permettent une cartographie fine de la couverture végétale, tandis que les seconds (AVHRR) fournissent des informations intégrées à une échelle du km^2 au minimum. A cet effet, nous avons simulé à partir de données SPOT et TM des indices de végétation (NDVI) sur des pavés de 1 km par moyenne arithmétique sur les réflectances. En utilisant les données de base SPOT ou TM, nous avons calculé des paramètres caractéristiques de la distribution des NDVI sur les pavés : l'écart-type, caractéristique de la variabilité des distributions, et le coefficient de Pearson, caractéristique de la dissymétrie des distributions. Ces paramètres sont ensuite mis en relation avec la valeur moyenne du pavé. Deux comportements se dégagent en fonction de l'hétérogénéité du paysage :

- à Ouango Fitini, au maximum de la biomasse, les valeurs de NDVI sont élevées et les écarts-type associés sont faibles; par contre les coefficients de Pearson varient de façon notable, indiquant des dissymétries gauches ou droites dans les distributions : ces dissymétries peuvent être reliées à des grands types d'occupation du sol : une dissymétrie droite sera significative d'une forte couverture ligneuse, tandis qu'une dissymétrie gauche caractérisera une dominante herbacée. Au cours du dessèchement ces tendances se modifient (baisse des NDVI moyens, augmentation des écarts-type, contraction des valeurs du coefficient de Pearson). Au moment de la reprise de la végétation (Mai), le NDVI croit, et les écarts-type associés sont forts, donc caractéristiques d'une variabilité locale de la couverture végétale. La gamme de coefficients de Pearson associée est faible, montrant que les types de distributions sont assez restreints. La couverture végétale est donc assez variable dans les fréquences

spatiales les plus élevées, mais ses propriétés sont spatialement reproductibles à plus faible fréquence.

- à Bidi, en fin d'hivernage, on observe une forte dispersion des valeurs de NDVI. L'écart-type est corrélé au NDVI : plus le NDVI est élevé, plus l'écart-type est fort. Le coefficient de Pearson est également corrélé au NDVI ($r = -0.85$) : plus le NDVI est élevé, plus la distribution est symétrique. Au cours de la saison sèche, les valeurs du NDVI diminuent fortement, correspondant à une dominante sol nu; les écarts-type associés sont faibles et les coefficients de Pearson traduisent des distributions évoluant entre dissymétrie gauche et symétrie. Au cours de la saison des pluies, les tendances observées en fin d'hivernage s'affirment progressivement.

Les résultats obtenus montrent les différences de comportement entre les deux types de milieux. A Bidi, en milieu hétérogène, on trouve des relations entre les valeurs moyennes de NDVI et les paramètres caractérisant la distribution interne des NDVI dans ces pixels de 1 km² : l'échelle du km² est bien adaptée pour caractériser les distributions. A Ouango Fitini, en milieu plus homogène, les valeurs moyennes et les paramètres caractérisant les distributions de ces valeurs sont indépendantes : les données à haute résolution fournissent une information complémentaire sur la nature des distributions et permettent de classer les types de milieux en fonction des valeurs de ces paramètres.

4. CONCLUSION

Cette étude diachronique a été menée sur 3 années dans des milieux naturels tropicaux très diversifiés à plusieurs niveaux de perception et avec différents types de données complémentaires.

Les expériences de terrain ont permis de mettre en évidence l'évolution temporelle de la phytomasse herbacée et d'établir des relations statistiques (régression linéaire) entre :

- NDVI et phytomasse fraîche totale

- TM5 et rapport de la matière sèche à la phytomasse fraîche totale

La combinaison de ces relations permet d'accéder à la matière sèche à un instant.

Les données à haute résolution SPOT XS et LANDSAT Thematic Mapper acquises à des dates clés permettent d'accéder à la répartition spatiale de la végétation et à une quantification de la phytomasse présente au sol en saison sèche. Les rythmes spécifiques de fonctionnement des formations végétales subsahariennes et soudaniennes sont identifiés. L'analyse de l'hétérogénéité spatiale conduite pour comprendre la signification des informations intégrées à l'échelle de 1 km² (simulée à partir des données SPOT et TM traitées en NDVI) montre que pour un site hétérogène comme Bidi, l'échelle du km² est satisfaisante pour interpréter les valeurs du NDVI. Par contre pour un site globalement homogène comme Ouango Fitini les images à plus haute résolution sont indispensables pour expliquer les hétérogénéités plus fines lissées par la résolution NOAA.

BIBLIOGRAPHIE

ASRAR G., KANEMATSU E. T. et al. (1985) Estimation of total above-ground phytomass production using remotely sensed data. Remote Sensing of Environment, 17:211-220.

HATFIELD J. L., ASRAR G., KANEMATSU E.T. (1984) Intercepted photosynthetically active radiation estimated by spectral reflectance. Remote Sensing of Environment, 14:65-74.

LOUDJANI P. (1988) Cartographie de la production primaire des zones savanicoles d'Afrique de l'Ouest à partir des données satellitaires. Comparaison avec les données de terrain. Mém. DEA Ecologie, Univ. ORSAY. 95 pages.

MONTEITH J. L. (1972) Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. J. Appl. Ecol., 9:747-766.

TANRE D., DEROO C., DUHAUT P., HERMAN M., MORCLETTE J.J., PERBOS J., DESCHAMPS P.Y. (1985) Effets atmosphériques en télédétection, logiciel de simulation du signal satellitaire dans le spectre solaire (5S). Coll. Int. Signatures spectrales d'objets en télédétection. Les Arcs, Déc. 1985. ESA SP 247, 315-319.

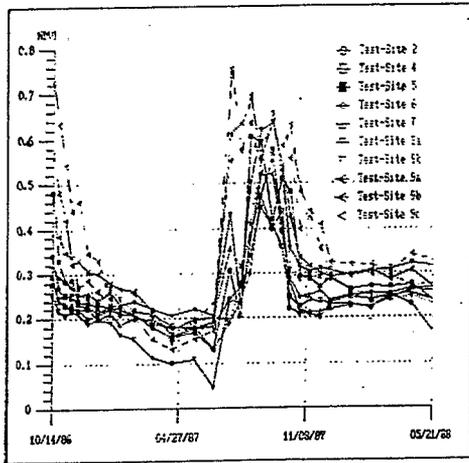


Figure 1.
Evolution temporelle du NDVI mesuré au sol sur tous les sites test à Bidi (Burkina Faso).

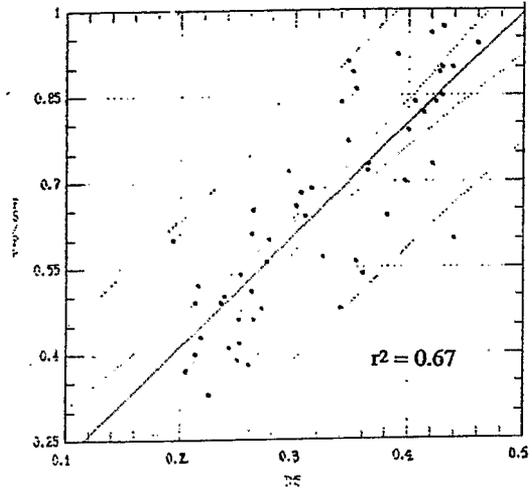


Figure 2.
Régression linéaire entre le rapport matière sèche/biomasse totale et la réflectance dans le MIR (TM5) pour tous les sites test à Ouango Fitini (Côte d'Ivoire).

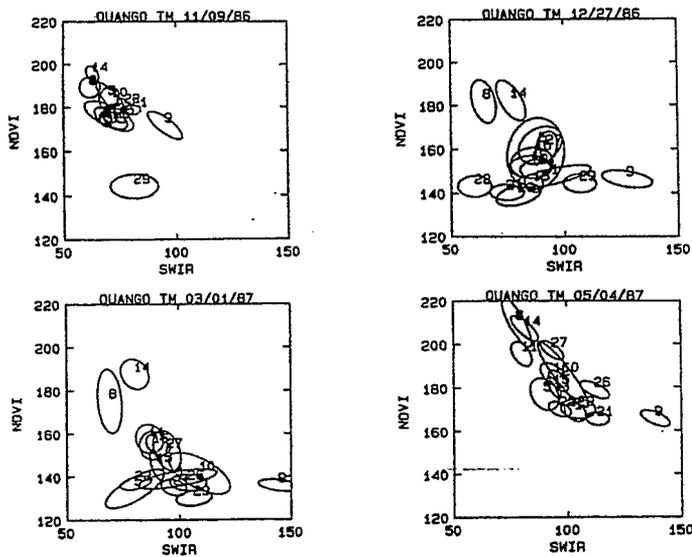


Figure 3.
Ellipses à 1 sigma tracées à partir des moyennes et de la matrice de variance-covariance pour toutes les parcelles représentatives des sites test de Ouango Fitini (Côte d'Ivoire).