Télédétection, 2001, Vol. 2, n° 2, p. 91-101
Des tirés à part sont disponibles auprès de l'éditeur
Droit de photocopie soumis à l'autorisation

© 2001 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *GB Science Publisher*
Imprimé en France

Télédétection en milieu de savane : problème de la nomenclature lié au changement d'échelle spatiale

ANGORA AMAN, SIAKA FOFANA et MÉLANIE KEITA

Université de Cocody, Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT), Laboratoire associé francophone LAF n°401, 22 BP 801, Abidjan 22, Côte d'Ivoire.
Téléphone : (225) 22 44 04 12 ; télécopieur : (225) 22 44 04 12 ; courriel : angora.aman@ird.ci

(soumis le 25 avril 2000 ; révisé le 20 décembre 2000 ; accepté le 11 mai 2001)

Le suivi de l'évolution des paramètres de la couverture végétale terrestre à l'aide de mesures satellitales impose l'acquisition d'images avec une haute fréquence temporelle. Cette priorité se fait au détriment de la résolution spatiale et impose de comprendre la signification des valeurs radiométriques moyennées à une échelle de l'ordre du kilomètre.

Cette étude, effectuée sur certains sites représentatifs des savanes d'Afrique de l'Ouest, contribue à l'analyse des problèmes liés au changement d'échelle spatiale. Les données satellitales acquises par les capteurs à haute résolution spatiale (XS de SPOT, TM de Landsat) constituent l'outil essentiel de cette analyse. Les objectifs principaux de cette étude sont alors :

- la compréhension de l'impact de la résolution spatiale des capteurs sur l'observation des caractéristiques des paysages des savanes et, par suite, la discussion d'une nomenclature appropriée.
- la définition de paramètres permettant de caractériser l'hétérogénéité d'un paysage à une échelle donnée, et pouvant intervenir comme indicateur dans le classement de ce milieu.

Les méthodes utilisées pour cette étude consistent à dégrader progressivement les images à haute résolution spatiale jusqu'aux résolutions des satellites large champ de vue (typiquement de l'ordre du kilomètre), puis à effectuer des mesures sur ces images à l'aide de paramètres descripteurs classiques.

Les analyses conduites ont permis de montrer que :

- le couvert végétal de la zone sahélienne est très hétérogène mais la longueur d'hétérogénéité est prise en compte à l'échelle du AVHRR, ce qui n'est pas le cas de la zone soudanienne ;
- les nomenclatures adoptées par les botanistes, qui sont adaptées aux observations des paysages à des résolutions de 20 m ou de 30 m, s'avèrent inadaptées aux échelles spatiales des capteurs de type AVHRR.

Compte tenu de la sensibilité de la zone soudano-sahélienne aux facteurs climatiques, un suivi régulier du couvert végétal de ce milieu à l'aide de données à large champ de vue présente un intérêt indiscutable en vue de répondre aux diverses questions liées à l'environnement. Mais cela suppose, au préalable, une redéfinition de la nomenclature à l'échelle du kilomètre.

Mots-clefs : résolution spatiale ; végétation ; soudano-sahélien ; nomenclature ; hétérogénéité ; télédétection.

Remote sensing in a sudano-sahelian environment : the problem of nomenclature with spatial resolution change

Spatial integration of radiometric parameters that describe the Earth's vegetation cover is an important issue when studying global scale land -atmosphere interactions. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) is currently used to characterize the land surface in terms of vegetation cycles. The most feasible method for obtaining the surface parameters and updating them periodically is satellite remote sensing. Many studies of the vegetation dynamics, therefore, have been carried out using higher time frequency data from sensors with coarser spatial resolution namely, the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) aboard the NOAA satellites. In sudano-sahelian zone, the vegetation cover is mainly composed of herbaceous and ligneous stratum. A potential problem when using coarsen spatial resolution is that the vegetation can be heterogeneous spatially, and since nomenclature established locally by the botanists may not be appropriate. The purpose of this paper, therefore, is firstly to investigate the significance of NDVI and to characterise the distribution of objects and secondly to discuss about the nomenclature when the spatial resolution varies from 150 to 960 m. These scales correspond roughly to the spatial resolution of present and future sensors dedicated to suitable for large -scale vegetation studies. The problem of nomenclature in sudano-sahelian zone is fundamental since it depends on the density of ligneous and herbaceous stratum. Multitemporal satellite images acquired in visible and infra red channels derived form Landsat TM and SPOT HRV are the primary sources of data. These digital images are degraded to simulate spatial resolution in the range 150-960 m by spatially averaging the data. A qualitative description of NDVI variability based on standard deviation and coefficient of skewness is carried out. Throughout the multitemporal study, the vegetation cover of sudanian zone (Ouango -Fitini) "seems" to be homogeneous for spatial resolution ranging from 150 to 960 m at the maximum of the biomass. However, the distribution of the objects inside degraded pixels is highly variable due to the herbaceous and ligneous reflectance properties. The sign of the dissymmetry can be explained by the relative importance of the trees and grass inside coarsen pixels.

In the sahelian zone (Bidi), the vegetation cover is very heterogeneous at the end of the rainy season. However the vegetation cover characteristics are linearly described by a relationship NDVI/standard deviation and NDVI/coefficient of skeewness at 1 km resolution. In the second part of this paper, a migration matrix is used to quantify the satellite integration data. The results of our investigation emphasise that it is crucial to define a new nomenclature mainly at 1 km resolution. The redefinition of savanna vegetation nomenclature, mainly at 1 km, is of crucial importance considering the rapid growth of sampling data, such as GIS which enable intensive manipulation of spatial data in order to answer complex environmental questions.

Keywords : spatial resolution ; vegetation ; sudano-sahelian ; nomenclature ; heterogeneity ; remote sensing.

1. INTRODUCTION

L'observation de la Terre par les satellites fournit une grande quantité d'informations sur les surfaces terrestres et océaniques. L'un des objectifs de la télédétection est de parvenir à relier les luminances mesurées par les capteurs aux quantités qui permettent de décrire quantitativement, et aux échelles appropriées, les processus que l'on veut étudier. La stratégie d'observation à partir de l'espace est une fonction complexe des caractéristiques spatio-temporelle du phénomène étudié, de la résolution spatiale du capteur et de sa répétitivité : les variables pertinentes à l'échelle des mesures (température, humidité, caractéristiques biologiques du couvert végétal par exemple) ont un sens à l'échelle locale et ne sont plus pertinentes lorsque l'on dégrade la résolution spatiale (Becker et Raffy, 1988).

En fournissant des images de la surface terrestre, les satellites d'observation de la Terre permettent d'appréhender particulièrement les modifications qui se produisent au niveau du couvert végétal. La plupart des investigations visant à étudier le couvert végétal à l'échelle globale ont été réalisées à partir des données AVHRR de NOAA. L'étude de la dynamique du couvert végétal à l'échelle continentale nécessite, par exemple, l'acquisition de données avec une bonne répétitivité (Justice *et al.*, 1989). Malheureusement ce choix se fait au détriment de la résolution spatiale. Or, l'identification des modifications intervenant dans un paysage donné impose que celui-ci soit observé à une échelle spatiale appropriée.

Dans la plupart des études qui ont été conduites dans ce sens, l'indice de végétation normalisé (NDVI) avec ses limites de signification a été couramment utilisé car il représente un bon indicateur des cycles de végétation (Justice *et al.*, 1985 ; Tucker, 1979 ; Townshend and Justice, 1988) : des études théoriques ont par exemple permis de montrer que la production primaire terrestre dépend du rayonnement photosynthétique actif solaire intercepté (IPAR) par le couvert (Asrar *et al.*,1984). En combinant des modèles de transfert radiatif et des modèles de processus biologiques, Sellers (1985) a établi des relations entre le NDVI et la transpiration des couverts. Il paraît alors indispensable de comprendre, dans la première partie de cette étude, la signification des valeurs pondérées à une échelle de l'ordre du kilomètre dans des milieux aussi hétérogènes que les savanes d'Afrique de l'Ouest. Fondamentalement, le couvert végétal recouvrant ces savanes se compose essentiellement d'une strate ligneuse et d'une strate herbacée mais elles sont très souvent difficilement séparables sur les images de télédétection. La description visuelle de ces milieux d'après Trochain (1957) complétée par César (1971) et Fournier (1982) pour Ouango-Fitini (Côte-d'Ivoire) et Boudet (1978) et Fournier (1987, 1991) pour Bidi (Burkina Faso) nous montre qu'elle va de la forêt galerie à la savane herbeuse. Entre ces extrêmes, l'on trouve la forêt claire, la savane boisée, la savane arborée, la savane arbustive. La classification se fonde principalement sur la densité des ligneux en présence et de leur hauteur. Il paraît donc important dans la deuxième partie de l'étude de comprendre si une telle nomenclature, établie à l'échelle de l'œil humain, peut servir de base de classification de ce paysage pour une échelle d'observation de l'ordre du kilomètre. La réponse à cette question paraît essentielle compte tenu du fait que les données fournies par les capteurs des satellites d'observation de la Terre et les systèmes d'information géographique (SIG) sont couramment utilisées pour répondre aux questions cruciales liées à l'environnement (Marceau *et al.*, 1994 ; Puyou -Lascassies *et al.*, 1994). Après une présentation du site et des données utilisées, suit une description de la méthode d'analyse de la variabilité spatiale basée sur la dégradation d'images à haute résolution. Les résultats et la discussion portent essentiellement sur l'étude de la signification de l'indice de végétation moyen saisonnier à l'échelle AVHRR et sur le nombre de classes significatives en fonction de l'échelle d'observation.

2. DESCRIPTION DES SITES ET DES DONNÉES DISPONIBLES

2.1. Description des sites

Deux sites tests principaux ont été choisis dans le cadre de cette étude. Ces deux sites se situent en Afrique de l'Ouest, le long d'un transect couvert par TM de Landsat et HRV (XS) de SPOT (figure 1) : Ouango-Fitini (nord-est de la Côte-d'Ivoire, à la limite nord de la zone soudanienne) et Bidi (nord-ouest du Burkina Faso, limite nord de la zone sahélienne). Ils sont situés aux extrémités d'un transect et distants d'à peu près 550 km. La végétation que l'on trouve le long de ce transect va de la forêt claire à la savane arbustive. Du nord au sud existe un fort gradient pluviométrique croissant. La répartition spatiale et temporelle de la pluie est le facteur déterminant dans le développement de la végétation de ce milieu (Achard, 1989 ; Fournier, 1982). Ce transect est caractérisé par une variation importante de la durée de la saison

sèche : 9 mois à Bidi et 7 mois à Ouango-Fitini. La pluviométrie moyenne annuelle est de 1280 mm à Ouango-Fitini et 400 mm à Bidi. Ces deux sites sont nettement différents par le climat, le couvert végétal et par l'aménagement de l'espace. Les sites de Ouango-Fitini et de Bidi ont été choisis dans le cadre de cette étude car les formations végétales en présence sont respectivement représentatives des zones soudanienne et sahélienne.

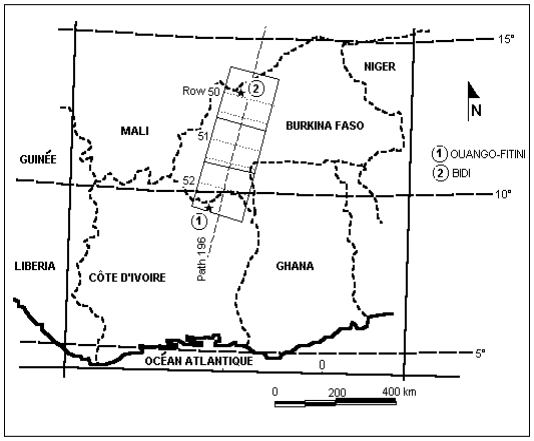


FIGURE 1 Localisation des sites d'étude en Afrique de l'Ouest sur la trace n°196 de TM de Landsat. *Location of the study area in West Africa along Landsat TM path n°196.*

Le paysage de Bidi est structuré par les végétation de bas fonds (Serpantié *et al.*, 1987). 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 de versants et glacis (Aman *et al.*, 1989). La contraction résulte de l'inégale résistance de certaines espèces pendant la sécheresse. Ce phénomène est accentué par une pression humaine croissante.

À Ouango-Fitini au contraire, les surfaces végétales restent visiblement stables (en dehors du passage des feux).

2.2. Données disponibles

De la description de ces milieux, il ressort que seule une étude multidate peut permettre d'envisager une bonne description de la dynamique des différentes formations végétales. Nous avons acquis pour cela des images TM de Landsat et HRV (XS) de SPOT à des dates différentes, correspondant donc à des stades phénologiques différents. La figure 2 représente une image TM de Ouango-Fitini de novembre 1986 (fin de saison des pluies) ; la figure 3 est une image HRV de Bidi d'octobre 1987 (fin de saison des pluies). Les dates de prise de vue des images disponibles figurent sur le tableau 1. Sur chaque site test, nous avons choisi 2 et 3 fenêtres respectivement pour les images TM et HRV. La taille d'une fenêtre représente 512 lignes et 512 pixels par ligne. Le choix des fenêtres retenues sur les zones de Bidi et de Ouango-Fitini se justifie par les raisons suivantes :

a) on dispose d'une large information botanique sur ces secteurs qui ont fait l'objet de nombreuses investigations scientifiques, soit par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD ex ORSTOM), soit par le CESBIO (Centre d'Études Spatiales de la Biosphère) dans le cadre de l'expérience « Biorythme » à Ouango-Fitini et à Bidi ;

b) sur la base de ces connaissances, les fenêtres retenues sont celles qui couvrent à la fois la diversité des composantes du paysage et leur représentativité à l'échelle régionale.

TABLEAU 1 Dates de prise de vue des images de Ouango-Fitini et de Bidi. *Dates of images acquisition of Ouango-Fitini and Bidi.*

Sites / nom des fenêtres	*capteur*	*Dates*
OuangoA, Ouango1	TM de Landsat	9 novembre 1986
OuangoB, Ouango2	" "	27 décembre 1986
OuangoC, Ouango3	" "	1 mars 1987
OuangoD, Ouango4	" "	4 mai 1987
Bidi1, BidiA	" "	9 novembre 1986
Bidi2, BidiB	" "	1 mars 1987
BidiX1, BidiX2, BidiX3	HRV de SPOT	4 octobre 1987

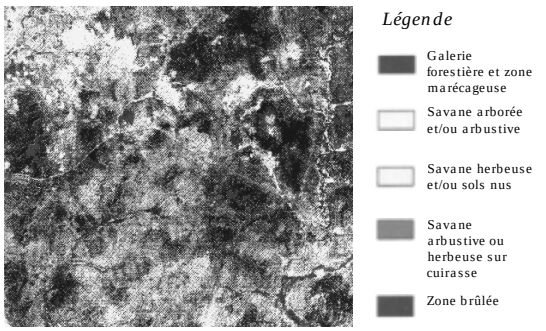


FIGURE 2 Image TM de Landsat de Ouango–Fitini en novembre 1986 de taille 15 km par 15 km environ (TM3 en vert, TM4 en rouge). *Landsat TM image from Ouango-Fitini in november 1986 of about 15 km per 15 km size (TM3 in green and TM4 in red).* (voir image couleur V à la fin de la revue).

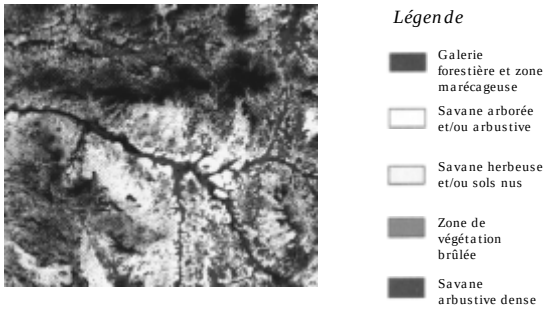


FIGURE 3 Image HRV de SPOT de Bidi d'octobre 1987 de taille 10 km par 10 km environ (XS2 en vert, XS3 en rouge). *SPOT HRV image from Bidi in october 1987 of about 10 km per 10 km size (XS2 in green and XS3 in red).* (voir image couleur VI à la fin de la revue).

3. MÉTHODES

3.1. Modèles simples de caractérisation d'une distribution

Considérons un modèle simple d'occupation du sol composé uniquement de pixels de sols nus et de végétation. Supposons de plus que les pixels de sols nus ont la même valeur de réflectance dans le visible et le proche infrarouge (VIS = 16,5 % et PIR = 18,8 %). Pour les pixels de végétation la réflectance dans le visible vaut 18 % et 60 % dans le proche infrarouge : ces valeurs de réflectance ont été relevées sur le terrain lors d'une campagne de mesures effectuée par le CESBIO à Ouango-Fitini. Nous nous proposons de représenter l'écart type et le coefficient de dissymétrie en fonction du taux de recouvrement.

Sur la figure 4, on simule la variation de l'écart type en fonction du taux de recouvrement : le maximum d'hétérogénéité s'observe pour une distribution composée de 50 % de pixels de végétation et 50 % de pixels de sol nu.

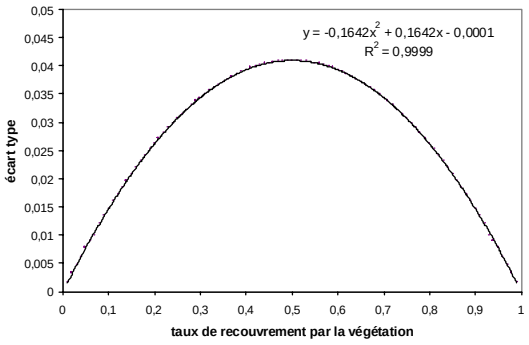


FIGURE 4 Courbe de variation simulée de l'écart type en fonction du taux de recouvrement par la végétation. *Standard deviation variation simulation plot versus vegetation cover rate.*

De même, la figure 5 représente la variation du coefficient de dissymétrie en fonction du taux de recouvrement. Le coefficient de dissymétrie g_1 est positif (dissymétrie gauche) pour un taux de recouvrement inférieur à 50 %. Il devient négatif (dissymétrie droite) pour un taux de recouvrement supérieur à 50 %.

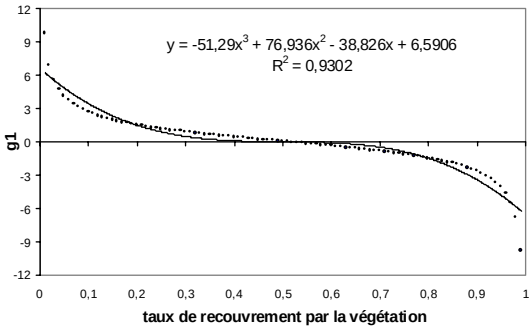


FIGURE 5 Courbe de variation simulée du coefficient de dissymétrie en fonction du taux de recouvrement par la végétation. *Coefficient of skewness variation simulation plot versus vegetation cover rate.*

3.2. Dégradation d'images

La première partie de notre étude vise à rechercher la signification de l'indice de végétation moyen à l'échelle du capteur AVHRR et à des résolutions intermédiaires. Pour ce faire, des images TM et HRV sont dégradées à différentes échelles d'observation. Justice *et al.* (1989) proposent différentes méthodes. Nous ne retiendrons que celle qui consiste à moyenner les valeurs des luminances.

Soit xi,j et yi,j les valeurs de réflectance du pixel (i,j) respectivement dans les canaux visible et proche infrarouge à la résolution spatiale initiale h. On définit l'indice de végétation moyen M_{NDVI} à la résolution Hp = h * p (p entier supérieur à 1) par :

$$M_{NVDI} = \frac{(\bar{y} - \bar{x})}{(\bar{y} + \bar{x})} \qquad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i,j=1}^{n} y_{i,j} \qquad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i,j=1}^{n} x_{i,j}$$

Nous aurions pu utiliser la moyenne des indices de végétation (I_{NDVI}) en lieu et place de l'indice de végétation moyen (M_{NDVI}). L'erreur commise sur le NDVI est dans ce cas de l'ordre de 0,6 % (Aman *et al.*, 1992).

Une approche intéressante pour l'étude de la distribution des objets à l'intérieur d'une image lors d'un changement d'échelle peut être obtenue en représentant le pourcentage de pixels associé une dissymétrie droite ou gauche en fonction de l'échelle d'observation. Dans un souci de simplification nous adoptons la notation suivante : $g_1 = g_1^+$ si $g_1 > 0$ et $g_1 = g_1$ si $g_1 < 0$ g_1^+ et g_1^-

correspondent respectivement aux dissymétries gauche et droite d'une distribution statistique.

La seconde partie de cet article vise à comprendre le problème lié à la nomenclature en milieu de savane lors d'un changement d'échelle spatiale. D'une manière générale, dans une classification d'image, les parcelles d'entraînement sont déterminées *a priori* et le regroupement des objets dans les différentes classes est basé sur des critères statistiques prédéfinis. La question que l'on peut se poser est la suivante : est-il approprié d'utiliser une même nomenclature quelle que soit la résolution spatiale de l'image étudiée, surtout en zone de savane ? Considérons pour cela l'histogramme d'une image à haute résolution spatiale r_0. Nous discrétisons cet histogramme des comptes numériques en classes C_1, C_2,..., C_j par pas de p comptes numériques correspondant à une valeur $M_{NDVI} = \delta_{NDVI}$. Ces classes ainsi définies n'ont pas une signification thématique particulière, soit n_1, n_2,..., n_j le nombre de points respectifs dans les classes C_1, C_2,...,C_j. Lorsque nous passons de l'échelle r_0 d'origine à une échelle dégradée r_j, il paraît essentiel de comprendre comment s'effectue l'intégration des pixels. Nous allons pour cela introduire la notion de matrice de migration et rechercher la manière dont s'effectue la migration des points de l'image d'une classe vers une autre lorsque l'on passe de la résolution r_0 à r_j. L'utilisation de la matrice de migration permet tout simplement d'analyser la provenance des différents points qui interviennent dans le calcul de l'indice de végétation moyen à une résolution dégradée r_j.

4. RÉSULTATS

4.1. Analyse de la variabilité de l'indice de végétation moyen M_{NDVI} en fonction de l'échelle d'observation.

Les résultats présentés dans la première partie de cette étude visent à analyser la signification de la valeur radiométrique moyennée aux échelles spatiales de 150, 450 et 960 m sur les deux sites d'étude. Pour cela, des images TM et HRV, acquises à des dates clés du cycle de la végétation sont dégradées à ces résolutions spatiales. Les écarts types σ_{MNDVI} et les coefficients de dissymétrie g_1 associés aux pixels dégradés sont calculés. Une analyse multidate est réalisée sur chaque site car pour une échelle d'observation donnée, l'hétérogénéité d'un paysage peut être lié au stade phénologique, donc à la saison.

4.1.1. Ouango-Fitini

Au maximum de la biomasse (novembre), les valeurs de M_{NDVI} sont relativement élevées et associées à de faibles valeurs d'écart type σ_{MNDVI} pour la majeure partie des points représentés à 450 m (figure 6). Le maximum d'hétérogénéité observé correspond aux pixels associés à des valeurs de M_{NDVI} autour de 0,45. À 960 m, l'on observe globalement une tendance linéaire négative entre M_{NDVI} et σ_{MNDVI} (coefficient de détermination de l'ordre de 0,50, figure 7). Ces figures peuvent être interprétées à partir du modèle simple (figure 4), à savoir que la végétation est dominante à l'intérieur des pixels simulés à 450 m et 960 m. Cependant, la représentation du coefficient de dissymétrie associé à chaque pixel de M_{NDVI} dégradé à 960 m montre que pour une petite variation du NDVI, la distribution peut être très variable à l'intérieur du pixel AVHRR. Ceci montre que la végétation est dominante à l'intérieur du pixel 960 m en novembre mais les propriétés de réflectance sont différentes.

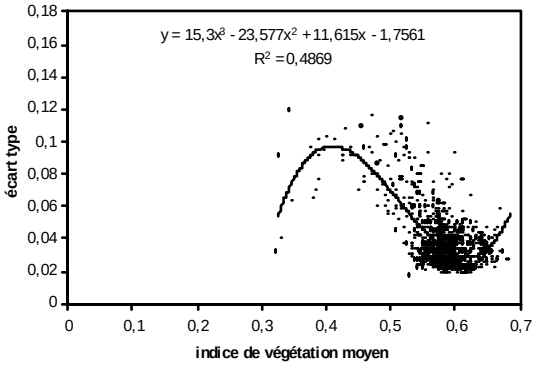


FIGURE 6 Représentation de l'écart type en fonction de l'indice de végétation moyen à 450 m (Ouango-Fitini, fin de saison des pluies). *Standard deviation representation versus mean vegetation index at 450 m (Ouango-Fitini, end of the rainy season).*

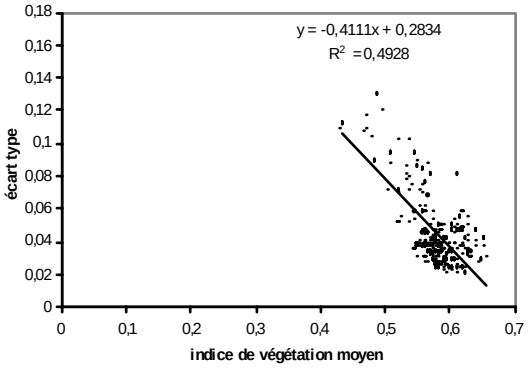


FIGURE 7 Représentation de l'écart type en fonction de l'indice de végétation moyen à 960 m (Ouango-Fitini, fin de saison des pluies). *Standard deviation representation versus mean vegetation index at 960 m (Ouango-Fitini, end of the rainy season).*

Les pixels caractérisés par une dissymétrie droite représentent 50 % de la distribution à 150 m et 66 % à 960 m (figure 8). Sur cette même figure, on montre que le pourcentage de pixels associé à une dissymétrie gauche décroît de 48 % à 32 % lorsque la résolution spatiale est respectivement égale à 150 et 960 m.

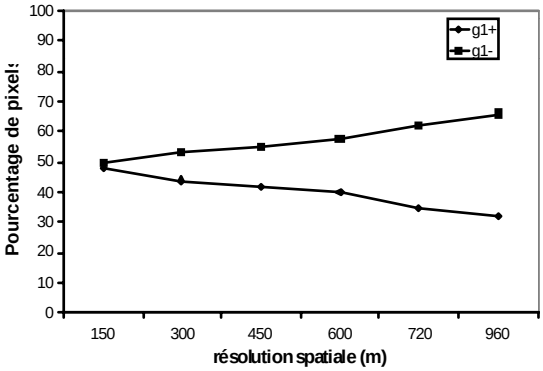


FIGURE 8 Représentation du pourcentage de pixels associés à des dissymétries droite et gauche en fonction de la résolution spatiale (Ouango-Fitini, fin de saison des pluies). *Percentage of pixels representation associated with right and left dissymetry as a function of spatial resolution (Ouango-Fitini, end of the rainy season).*

En mars (pleine saison sèche), la plupart des pixels NDVI dégradés à la résolution AVHRR présentent de faibles valeurs d'indice de végétation comparées à celles de novembre mais elles sont associées à des écarts types relativement élevés : le pixel AVHRR correspond donc à une intégration de sols nus et de végétation plus ou moins desséchée. Les courbes représentatives du pourcentage des distributions gauche et droite montrent effectivement que la situation de mars est l'opposé de celle de novembre (figure 9). En effet, le pourcentage de pixels associés à une dissymétrie droite décroît de 35 % à 16 % et celui correspondant à une distribution gauche croît de 63 % à 82 % lorsque la résolution spatiale varie entre 150 et 960 m. En mars, le pourcentage de sol nu devient dominant à l'intérieur des pixels AVHRR, ce qui n'est pas le cas en novembre.

Pendant la phase de la repousse de la végétation (mai), l'indice de végétation est très variable à 960 m. Les valeurs d'indice de végétation sont relativement élevées (entre 0,5 et 0,7) avec des écarts types également élevés. Ceci correspond à la réponse d'une végétation peu couvrante et peu homogène à cette date. La phase de repousse est largement influencée par les facteurs hydriques.

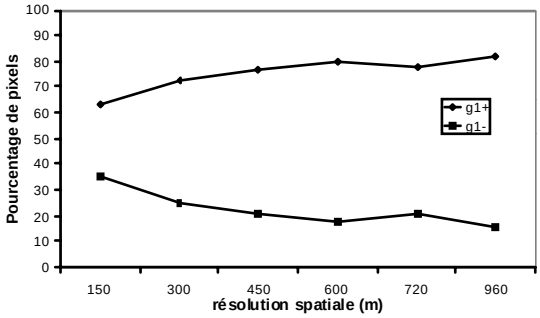


FIGURE 9 Représentation du pourcentage de pixels associés à des dissymétries droite et gauche en fonction de la résolution spatiale (Ouango-Fitini, saison sèche). *Percentage of pixels representation associated with right and left dissymetry as a function of spatial resolution (Ouango-Fitini, dry season).*

4.1.2. Bidi

Sur le site de Bidi, le couvert végétal présente un comportement différent de celui de Ouango-Fitini car, en novembre, le dessèchement est déjà à un stade avancé ; les indices de végétation moyen calculés sur des pixels de résolution 960 m restent inférieurs à 0,3 avec des valeurs d'écart type relativement élevées (figure 10). Ceci se traduit par un coefficient de détermination de 0,53 entre l'indice de végétation moyen et l'écart type à 960 m.

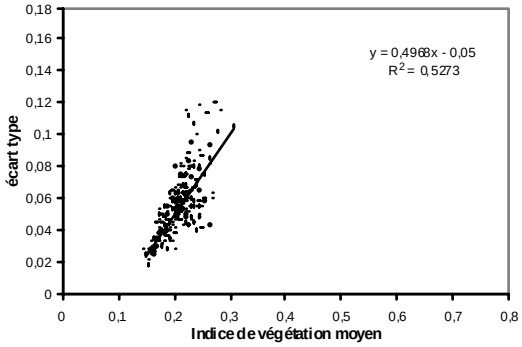


FIGURE 10 Représentation de l'écart type en fonction de l'indice de végétation moyen à 960 m (Bidi, début de saison sèche). *Standard deviation representation versus mean vegetation index at 960 m (Bidi, beginning of the dry season).*

La distribution à l'intérieur de ces pixels est très variable en fonction de l'échelle d'observation : pour des résolutions spatiales inférieures à 450 m, le coefficient de dissymétrie g_1 varie entre –1 et 3 mais devient globalement positif au-delà de cette échelle d'observation. Cette tendance traduit l'importance des sols nus et des végétations desséchées intégrées à ces échelles spatiales.

Pendant la saison sèche (mai), le couvert végétal est complètement desséché quelle que soit

l'échelle d'observation : les valeurs de NDVI correspondent typiquement à une réponse de sol nu (NDVI globalement inférieur à 0,2 avec des écarts types relativement faibles).

À la fin de la saison des pluies (octobre), la représentation de la variabilité de l'indice de végétation à 140 m (figure 11) est conforme à la courbe théorique de la figure 4, à savoir :

– une tendance globalement positive entre l'écart type et l'indice de végétation moyen pour des valeurs inférieures à 0,6 : c'est le cas de la majeure partie des pixels représentés à cette échelle d'observation ;

– les pixels dont les valeurs d'indice sont autour de 0,6 sont très hétérogènes : les écarts types variant entre 0,02 et 0,15. Si le paysage est observé à cette résolution spatiale, il paraît difficile d'associer une signification thématique à l'image correspondante ;

– enfin une tendance négative entre σ_{MNDVI} et M_{NDVI} pour des indices de végétation supérieurs à 0,6 ; les plus grandes valeurs de NDVI sont associées à de faibles valeurs d'écart type, donc à des pixels fortement végétalisés.

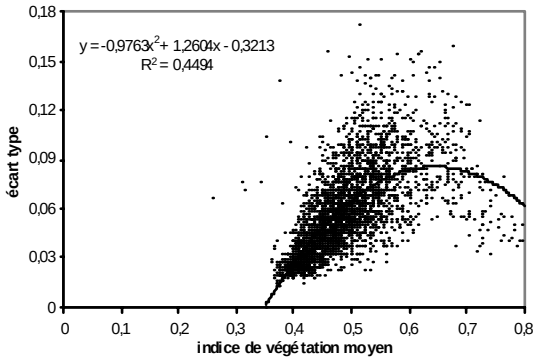


FIGURE 11 Représentation de l'écart type en fonction de l'indice de végétation moyen à 140 m (Bidi, fin de saison des pluies). *Standard deviation representation versus mean vegetation index at 140 m (Bidi, end of the rainy season).*

Ce comportement à 140 m disparaît en partie pour des résolutions spatiales supérieures à 460 m. À 960 m (figure 12) le coefficient de détermination est de 0,59 entre M_{NDVI} et σ_{MNDVI}.

À Bidi, il n'y a pas d'inversion du comportement des courbes de dissymétrie droite et gauche entre les saisons sèche et humide comme à Ouango-Fitini.

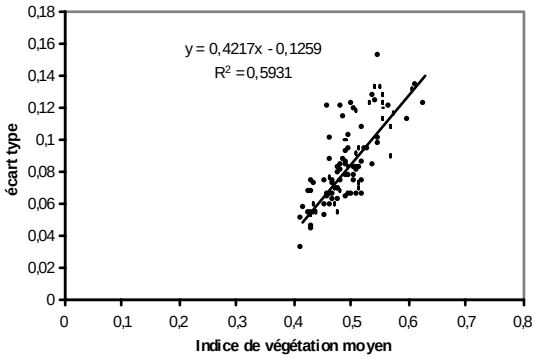


FIGURE 12 Représentation de l'écart type en fonction de l'indice de végétation moyen à 960 m (Bidi, fin de saison des pluies). *Standard deviation representation versus mean vegetation index at 960 m (Bidi, end of the rainy season).*

4.2. Effet de la résolution spatiale sur la nomenclature des savanes : méthode de la « matrice de migration »

L'histogramme de chaque image est discrétisé en choisissant un pas de 6 comptes numériques qui est équivalent à $\delta_{NDVI} = 0,047$. Le choix de cette valeur se justifie car elle correspond en gros à un nombre exploitable de classes NDVI pour utiliser par exemple la relation NDVI/IPAR (Townshend and Justice, 1988). Dans cette relation, on peut espérer avoir 20 classes significatives dans une dynamique du IPAR allant de 0 à 1 avec une erreur résiduelle de l'ordre de 0,005.

Soit α_{Ck}^{min} et α_{Ck}^{max} les valeurs de NDVI minima (respectivement maxima) relatives à la classe C_k. Les bornes associées à la classe suivante (C_{k+1}) s'obtiennent de la façon suivante :

$$\alpha_{ck+1}^{min} = \alpha_{ck}^{min} + 0,08$$

La valeur 0,008 correspond à un pas de quantification sur 8 bits.

$$\alpha_{ck+1}^{max} = \delta_{NDVI} + \alpha_{ck+1}^{min}$$

4.2.1. Ouango-Fitini

L'image NDVI de novembre se décompose en 6 classes C_1, C_2,..., C_6 (tableau 2). Ce tableau représente la matrice de migration 30 m-960 m. Elle montre qu'il n'y a plus que les classes C_3 et C_4 qui soient significatives à 960 m. À la fin de la saison des pluies, les formations végétales pour lesquelles les indices de végétation varient entre 0,529 et 0,615 représentent près de 99 % de l'ensemble du paysage de Ouango-Fitini à 1 km de résolution. L'on constate que ces deux classes ont conservé plus de 55 % de leurs pixels lors du changement d'échelle spatiale et apparaissent plus stables que les autres : la stabilité des classes est donnée par les éléments de la diagonale de la

matrice de migration. Cette matrice permet alors de montrer que les classes C_1, C_2, C_5 et C_6 qui ont été définies sur l'image à 30 m n'existent plus à 1 km de résolution et l'image apparaît homogène : ce résultat est à rapprocher de celui de la figure 7.

Durant la saison sèche, nous pouvons définir 7 classes à partir de l'histogramme de l'image initiale. À 450 m, 5 classes peuvent être exploitées mais elles se réduisent à 4 lorsque l'échelle d'observation devient 1 km. Le nombre de classes visibles sur une image AVHRR serait plus important en mars qu'en novembre à cause du déphasage dans le cycle phénologique qui existe entre les ligneux et les herbacées.

TABLEAU 2 Matrice de migration lors d'un changement d'échelle spatiale 30 m-960 m (Ouango-Fitini, novembre 1986). *Migration matrix with spatial resolution change from 30 m to 960 m (Ouango-Fitini, november, 1986).*

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	0	0	0,74	0,26	0	0
C2	0	0	0,69	0,31	0	0
C3	0	0	0,55	0,43	0	0
C4	0	0	0,29	0,70	0	0
C5	0	0	0,11	0,86	0	0
C6	0	0	0,08	0,91	0	0

Au début de la saison des pluies en mai, 7 classes peuvent être également définies à partir de l'image NDVI initiale. La matrice de migration 30 m-450 m (tableau 3) nous permet de constater que seule la classe C_7 disparaît quasiment à 450 m de résolution. Cependant les 6 classes encore visibles n'ont plus la même signification. En effet les classes C_1, C_2, C_4, C_5, C_6 et C_7 ont cédé respectivement 61 %, 66 %, 25 %, 11 %, 5 % et 3 % de leurs pixels à la classe C_3. Celle-ci correspond donc à une intégration de points issus de classes ayant des significations complètement différentes.

On constate que, quelle que soit la saison, la dégradation d'image à 1 km engendre un regroupement des points vers le centre des histogrammes, lesquels sont tous unimodaux.

TABLEAU 3 Matrice de migration lors d'un changement d'échelle spatiale 30 m-960 m (Ouango-Fitini, mai 1986). *Migration matrix with spatial resolution change from 30 m to 960 m (Ouango-Fitini, mai, 1986).*

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
C1	0	0,14	0,61	0,22	0,01	0	0
C2	0	0,07	0,66	0,24	0,02	0	0
C3	0	0,01	0,50	0,43	0,04	0	0
C4	0	0	0,25	0,59	0,15	0,01	0
C5	0	0	0,11	0,53	0,29	0,05	0
C6	0	0	0,05	0,35	0,40	0,19	0
C7	0	0	0,03	0,19	0,39	0,39	0

4.2.2. Bidi

L'image de novembre (début de saison sèche) peut être segmentée en 7 classes à partir de l'histogramme de l'image initiale. Jusqu'à 150 m, le nombre de classes reste constant et décroît rapidement pour devenir 5 à 450 m et 3 à 1 km (tableau 4). Les classes les plus significatives en novembre à l'échelle AVHRR sont C_2, C_3 et C_4. La matrice de migration de 30 m-1 km montre que ces 3 classes conservent respectivement 33 %, 66 % et 30 % de leurs pixels lors du changement d'échelle spatiale. Ces 3 classes significatives intègrent aussi bien des pixels de végétation peu couvrante et desséchée (C_1) que des pixels de végétation jaunissante et verte (C_5, C_6 et C_7). Bien souvent les pixels intégrés dans une classe donnée peuvent provenir de classes lointaines. La classe C_3 intègre par exemple 36 %, 57 %, 63 %, 59 %, 56 % et 45 % respectivement des pixels des classes C_1, C_2, C_4, C_5, C_6 et C_7.

TABLEAU 4 Matrice de migration lors d'un changement d'échelle spatiale 30 m-960 m (Bidi, novembre 1986). *Migration matrix with spatial resolution change from 30 m to 960 m (Bidi, november, 1986).*

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
C1	0	0,60	0,36	0,03	0	0	0
C2	0	0,33	0,57	0,09	0	0	0
C3	0	0,15	0,66	0,18	0	0	0
C4	0	0,06	0,63	0,30	0	0	0
C5	0	0,03	0,59	0,36	0,01	0	0
C6	0	0,02	0,56	0,39	0,02	0	0
C7	0	0,01	0,45	0,44	0,09	0	0

Durant la saison sèche (mai) une seule classe peut être observée sur les images dégradées à 1 km, l'image est alors très homogène.

À la fin de la saison des pluies, l'histogramme associé à l'image HRV d'octobre possède une large dynamique permettant ainsi de distinguer 8 classes à 20 m de résolution. Sur les 8 classes identifiées au départ, seules 5 sont significatives lorsque la résolution de l'instrument de mesure est de l'ordre du kilomètre (tableau 5).

TABLEAU 5 Matrice de migration lors d'un changement d'échelle spatiale 20 m-960 m (Bidi, octobre 1987). *Migration matrix with spatial resolution change from 20 m to 960 m (Bidi, october, 1987).*

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
C1	0	0,21	0,44	0,26	0,09	0	0	0
C2	0	0,12	0,39	0,36	0,11	0,01	0	0
C3	0	0,03	0,21	0,53	0,19	0,04	0,01	0
C4	0	0,03	0,21	0,53	0,19	0,04	0,01	0
C5	0	0,01	0,17	0,55	0,21	0,04	0,01	0
C6	0	0,01	0,13	0,50	0,27	0,06	0,01	0
C7	0	0,01	0,11	0,45	0,32	0,09	0,02	0
C8	0	0	0,05	0,28	0,44	0,17	0,05	0

5. DISCUSSION

Les images fournies par le capteur AVHRR sont couramment utilisées pour le suivi régulier et saisonnier de la dynamique de la végétation à l'échelle régionale ou continentale. C'est particulièrement le cas en Afrique (Justice *et al*., 1985) où l'utilisation des données AVHRR s'est révélée fructueuse, avec l'étude des problèmes de désertification au Sahel (Prince, 1991), l'étude par télédétection de la production de la biomasse herbacée au Sénégal (Tucker *et al*., 1985) ainsi les estimations des rendements de pâturages effectuées au Niger (Whylie *et al*., 1991) et au Sénégal (Diallo *et al.*, 1991). Cependant, l'utilisation des images AVHRR en zone soudano-sahélienne mérite une attention particulière à cause de l'hétérogénéité de ce milieu. L'étude que nous avons réalisée vise à comprendre, d'une part, la signification des valeurs radiométriques pondérées à une échelle de l'ordre du kilomètre et, d'autre part, à montrer que la nomenclature adoptée à l'échelle usuelle n'est pas adaptée à la résolution spatiale de l'AVHRR.

Les résultats de cette étude effectuée en zone soudano-sahélienne sont significatifs. Ils nous permettent notamment de définir des paramètres de caractérisation de l'hétérogénéité de la végétation à l'échelle AVHRR tout en fournissant une description de son évolution dynamique à cette échelle d'observation. Plus précisément, les résultats relatifs à ce travail mettent en évidence deux types de comportements : à Bidi, on observe un couvert végétal hétérogène mais la longueur d'hétérogénéité est bien prise en compte à l'échelle 1 km, ce qui n'est pas le cas à Ouango-Fitini où la végétation est relativement homogène à la fin de la saison des pluies.

Cette étude permet de décrire l'évolution dynamique d'une végétation de types soudanien et sahélien. L'on constate qu'en milieu soudanien la végétation est dominante à l'intérieur du pixel AVHRR à la fin de la saison des pluies. Cependant cette végétation présente des propriétés de réflectance différente. Ceci peut être expliqué par la différence entre le taux de couverture et l'état de verdeur des ligneux et des herbacées. Pour une forte valeur de M_{NDVI}, une dissymétrie négative peut se traduire par un taux de ligneux prépondérant à l'intérieur du pixel et une dissymétrie positive serait significative d'une prépondérance de la strate herbeuse. Il est donc probable que la dissymétrie négative soit liée à la présence de structures de végétation de bas fonds. L'on constate en effet que la borne inférieure du coefficient de dissymétrie varie de –2,5 à 1 entre novembre et mai alors que la borne supérieure passe de 1 à 1,5 entre ces deux dates. Entre novembre qui correspond au maximum de la biomasse, et mai, qui marque le début de la repousse du couvert végétal, il y a une phase de dessèchement qui se traduit par une légère augmentation de la dissymétrie positive. En mars, il y a un début de repousse des savanes. Ceci se traduit par une réponse radiométrique complexe puisqu'elle correspond à un mélange de sols nus, de zones anciennement brûlées et de repousses vertes dans des proportions qui vont s'inverser progressivement (Lavenu *et al.*, 1984).

Dans le cas de Bidi, nous observons un comportement complètement différent : il y a une influence considérable des sols nus si bien que même au maximum de la biomasse (octobre), la distribution de la végétation est hétérogène à 1 km de résolution. La distribution de la végétation présente une dissymétrie positive à cette date.

L'utilisation de la méthode de matrice de migration met en évidence la nécessité d'une caractérisation de la distribution du couvert végétal à l'échelle 1 km pour ces deux types de paysages. À l'échelle d'observation 20 m ou 30 m, on peut appliquer une nomenclature classique de photointerprétation. La nomenclature est décrite de la façon suivante :

- forêt galerie : taux de couverture ligneuse 100 % ;
- forêt claire : formation herbacée dont la strate arborée et herbacée a un recouvrement de 70 à 90 % ;
- savane boisée : taux de recouvrement arboré et arbustif de l'ordre de 20 à 70 % ;
- savane arborée : formation herbeuse comportant une strate herbacée supérieure et continue d'au moins 80 cm de hauteur avec une couverture ligneuse très variable (de 2 à 20 %) ;
- savane arbustive : elle a les mêmes caractéristiques que la savane arbustive mais avec une strate arbustive dont le taux de couverture reste inférieur à 70 % ;
- savane herbeuse : ce type de formation est en général dépourvu de ligneux (moins de 2 %).

Cette nomenclature intègre « visuellement » une certaine homogénéité à l'échelle 20 -30 m de HRV ou de TM d'observation. Nous constatons que ces différents types de formations végétales que l'on peut trouver à l'échelle de l'œil humain se retrouvent intégrées dans des proportions variables aux classes que l'on obtient à 1 km de résolution spatiale. À titre d'exemple, comment peut-on appeler la nouvelle classe C2 du tableau 5 qui intègre respectivement 39 %, 36 %, 11 %, d'éléments des classes C3, C4 et C5 ? L'étude du

changement d'échelle 30 m -1 km montre donc que ce type de nomenclature n'est plus adapté lorsque l'on prend en compte une résolution de 1 km. Cela indique la nécessité d'utiliser des images à haute résolution spatiale pour déterminer la composition d'un paysage que l'on pourra suivre dans le temps à une échelle plus globale. Au vu de ces résultats, il paraît difficile d'utiliser uniquement le NDVI dérivé de l'AVHRR pour une classification de la végétation en zone soudano-sahélienne. Dans notre étude, les classes qui ont servi aux calculs des matrices de migration n'ont pas nécessairement une signification thématique ; elles ne peuvent donc pas être utilisées directement pour déterminer la nomenclature de ce paysage de savane aux échelles de l'ordre du kilomètre.

Certains auteurs ont utilisé des images TM en vue d'une classification du paysage de Ouango-Fitini. Les résultats de cette étude basés sur une classification de type supervisée montrent que c'est en dégradant l'image TM à 180 m que la séparation des milieux est optimale (Achard, 1989 ; Koné, 1998). Aman (1991) a montré que la taille des structures dominant le paysage des zones soudaniennes est de l'ordre de 150-210 m. Cette taille caractéristique semble liée à l'organisation des éléments du paysage plutôt qu'à un type de végétation déterminé. En milieu sahélien, l'utilisation de variogrammes et de la variance locale (Aman, 1991 ; Koné, 1998) a permis de montrer que ces types de paysage sont dominés par les végétation de bas fonds avec des tailles caractéristiques variant entre 240 et 280 m.

Cette étude, bien que locale, a mis en évidence la nécessité d'une approche multicapteur et multidate pour une meilleure description des savanes en zone soudano-sahélienne. Ce problème d'échelle spatiale représente un paramètre important à prendre en compte par exemple dans l'estimation de la production primaire terrestre où il faut différencier les espèces végétales car leurs caractéristiques biologiques sont variables. Ceci implique le développement de modèles adéquats de passage des échelles courantes à l'échelle AVHRR. Ces modèles doivent intégrer toute la complexité locale dans les paramètres décrivant les processus à l'échelle globale. Certes, la structure de la végétation est complexe dans la zone soudano-sahélienne mais des efforts devraient se faire en vue d'adopter une nomenclature qui pourrait permettre une meilleure exploitation des données AVHRR et VEGETATION en terme de production primaire terrestre dans ce milieu.

6. CONCLUSION

L'étude que nous avons menée à partir d'images haute résolution spatiale acquises sur des milieux représentatifs des savanes d'Afrique de l'Ouest nous a permis d'analyser la signification de la valeur radiométrique moyennée à des échelles spatiales de l'ordre du kilomètre et de poser le problème de la nomenclature liée à cette échelle d'observation.

Les méthodes utilisées sont essentiellement basées sur l'analyse de la variabilité des images en fonction de la résolution spatiale. Les paramètres utilisés (moments d'ordre 2 et 3) constituent des outils d'analyse intéressants car ils permettent une caractérisation de l'hétérogénéité des paysages et une description synthétique des structures sous-jacentes. Les différentes méthodes proposées dans cette étude interviennent également comme des outils pouvant servir comme éléments de classification de ces milieux. Plus précisément, les résultats relatifs à cette étude ont mis en évidence deux types de comportement : à Bidi (zone sahélienne), on observe un couvert végétal très hétérogène, mais la longueur d'hétérogénéité est bien prise en compte à l'échelle de l'AVHRR, ce qui n'est pas le cas à Ouango-Fitini (zone soudanienne) où la végétation est relativement homogène. L'utilisation de la notion de matrice de migration nous indique que les classes de végétation adoptées par les botanistes en zone de savane à l'échelle de l'œil humain sont inappropriées à des résolutions spatiales de l'ordre du kilomètre. À cette résolution la réponse du capteur correspond à une intégration de différents types d'espèces végétales, ayant des propriétés physiques et par suite une contribution aux flux de surface variables. Ceci représente par exemple un facteur perturbateur non négligeable dans l'estimation de la production primaire à l'aide de données issues de capteur à large champ de vue. Les résultats de cette étude méritent d'être étendus à d'autres sites de type tropical.

L'évolution de la végétation dans cette région sensible nécessite un suivi régulier. Seuls les capteurs à large champ de vue peuvent permettre de mener une telle étude. Cependant, des efforts restent à faire en vue de trouver une nomenclature adaptée à l'échelle des capteurs de type AVHRR. La détermination de cette nouvelle nomenclature est urgente compte tenu de l'utilisation massive de données à large champ de vue pour répondre aux questions cruciales liées à l'environnement. Les résultats de cette étude peuvent apporter une contribution à la réalisation de cette nomenclature.

Remerciements

Les auteurs sont très reconnaissants au CESBIO qui leur a fourni les images. Ils tiennent à remercier Messieurs Moussa Koné, Edouard N'guessan du CURAT et François Lavenu du CESBIO pour les nombreuses discussions qui ont permis l'aboutissement de cet article.

Références

ACHARD, F. (1989) Étude des rythmes saisonniers de le végétation en Afrique de l'ouest par télédétection spatiale. *Thèse Université Paul Sabatier de Toulouse*, 246 p.

AMAN, A., LAVENU, F., PODAIRE, A., et SAINT, G. (1989) Étude de la production primaire des différentes savanes : apport des images à haute résolution spatiale XS et TM. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie*, n° 115, p. 40 -44.

AMAN, A. (1991) Analyse des changements d'échelle spatiale à partir de données satellitaires : cas des savanes d'Afrique de l'Ouest. *Thèse Université Paul Sabatier de Toulouse*, 187 p.

AMAN, A., RANDRIAMANTENA, H., P., PODAIRE, A. and FROUIN, R. (1992) Upscale Integration of Normalized Vegetation Index : the problem of spatial heterogneity. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, n° 2, p. 326-338.

ASRAR, G., FUCHS, M., KANEMASU, E. T. and HATFIELD, J. L. (1984) Estimating Absorbed Photosynthetic Radiation And Leaf Area Index from spectral Reflectance in Wheat. *Agronomy Journal*, vol. 76, p. 300-306.

BECKER, F. et RAFFY, M. (1988) Modèles et modélisations en télédétection. p. 37-162. *Télédétection spatiale : aspects physiques et modélisation*. Cepadues-Éditions, École d'été internationale de physique spatiale, Toulouse, 1031 p.

BOUDET, G. (1978) *Manuels sur les pâturages tropicaux et les cultures fourragères*. Institut d'Élevage et de Médecine Vétérinaire, Rapport du Ministère de la Coopération, Paris, 258 p.

CESAR, J. (1971) *Végétation, flore et valeur pastorale des savanes du Parc National de la Comoé*. Rapport du Ministère de la Recherche Scientifique de Côte d'Ivoire, Bouaké, 50 p.

DIALLO, O., DIOUF, A., HANAN, N. P., NDIAYE, A. and PREVOST, Y. (1991) AVHRR monitoring of savanna primary production in Senegal, West Africa : 1978-1988. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 12, n° 6, p. 1259-1279.

FOURNIER, A. (1982) Cycle saisonnier de la biomasse et démographie des feuilles de quelques graminées dans les savanes guinéennes de Ouango-Fitini (Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 168 p.

FOURNIER, A. (1987) Cycle saisonnier de la phytomasse et de la production herbacée dans les savanes soudaniennes de Nazinga (Burkina Faso). Comparaison avec d'autres savanes ouest africaines. *Bulletin d'Écologie*, vol. 18, n°4, p. 409-430.

FOURNIER, A. (1991) Phénologie, croissance et production végétales dans quelques savanes d'Afrique de l'ouest. Thèse de doctorat d'État, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), 312 p.

JUSTICE, C.O., TOWNSHEND, J.R.G., HOLBEN, B.N. and TUCKER, C.J. (1985) Analysis of the phenology of global vegeation using meteorological data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 6, p. 1271-1318.

JUSTICE, C.O., MARKHAM, B.L., TOWNSHEND, J.R.G. and KENNARD, R.L. (1989) Spatial degradation of satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 10, p. 1539-1561.

KONÉ, M. (1998) Étude par télédétection des structures spatiales en milieu de savane : cas du Parc National de la Comoé. *Mémoire de DEA, Université d'Abidjan*, 65 p.

LAVENU, F. (1984) Télédétection et végétation tropicale. Exemple du nord-est de la Côte-d'Ivoire et des mangroves du Bangladesh. *Thèse Université Paul Sabatier de Toulouse*, 189 p.

MARCEAU, D. J., HOWARTH, P. J. and GRATTON, D. J. (1994) Remote sensing and measurement of geographical entities in forested environment. 1. The scale and spatial aggregation problem. *Remote Sensing of Environment*, vol. 49, p. 93-104.

PRINCE, S. D. (1991) Satellite remote sensing of primary production : comparison of results for sahelian grasslands 1981-1988. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 12, n°6, p. 1301-1311.

PUYOU-LASCASSIES, P., FLOUZAT, G., GAY, M. and VIGNOLLES, C. (1994) Validation of the use of multiple linear regression as a tool for unmixing coarse spatial resolution images. *Remote Sensing of Environment*, vol. 49, p. 155-166.

SELLERS, P. J. (1985) Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 6, p. 1335-1372.

SERPANTIÉ, G., MERSADIER, G., TEZENAS DU MONCEL, L. et MERSADIER, Y. (1987) *Transformations d'un système agropastoral Soudano-sahélien (Bidi, nord Yatenga, Burkina Faso)*. Rapport interne ORSTOM, Ouagadougou, 20 p.

TOWNSHEND, J.R.G. and JUSTICE, C.O. (1988) Selecting the spatial resolution of satellite sensors required for global monitoring of land transformations. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 2, p. 659 - 697.

TROCHAIN, J. L. (1957) *Accord Interafricain sur la définition des types de végétation de l'Afrique tropicale*. Bulletin de l'Institut d'Études Centrafricaines, nouvelle série, Brazzaville, p. 55-93.

TUCKER, J. C. (1979) Red and Phographic Infrared Linear Combinations for monitoring Vegetation. *Remote Sensing of Environment*, vol. 11, p. 149-157.

TUCKER, J. C., VANPRAET, C.L., SHARMAN, M. J. and VAN ITTERSUM, G. (1985) Satellite Remote Sensing of Total Herbaceous Biomass Production in the Senegalese Sahel : 1980-1984. *Remote Sensing of Environment*, vol. 17, p. 233-249.

WHYLIE, B. K., HARRINGTON, J. A., PRINCE, S. D. and DENDA, I. (1991) Satellite and ground-based pasture production assessment in Niger : 1986-1988. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 12, n° 6, p. 1281-1300.