*Télédétection*, 2006, vol. 6, n° 2, p. 87-101
© 2006 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions Scientifiques GB*

# VARIATION SAISONNIÈRE DE LA VÉGÉTATION DE SAVANE : CAS DU PARC NATIONAL DE LA COMOÉ EN CÔTE D'IVOIRE.

Angora Aman[1], Delfin Abe Ochou[1], Édouard N'Guessan[2], Brahima Koné[1], Moussa Koné[2]

*[1] Université de Cocody, Unité de Formation et de Recherche des Sciences de Structures et de la Matière (UFR SSMT), Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de Mécanique des Fluides (LAPA-MF), 22 BP 582, Abidjan 22, Côte d'Ivoire.*
*Téléphone : (225) 07 82 77 52 ; Télécopie : (225) 22 44 14 07 ;*
*Courriel : aman_angora@yahoo.fr*

*[2] Université de Cocody, Unité de Formation et de Recherche en Biosciences, 22 BP 582, Abidjan 22, Côte d'Ivoire.*
*Téléphone : (225) 22 44 03 07 ;*
*Télécopie : (225) 22 44 03 07 ;*
*Courriel : k_nguessan@yahoo.fr*

*Soumis le 9 novembre 2004 ; révisé le 23 juin 2005 ; accepté le 6 décembre 2005*

Des mesures de terrain réalisées à l'aide du radiomètre CIMEL et des images TM (Thematic Mapper) de Landsat dans le Parc national de la Comoé (Côte d'Ivoire) sont utilisées pour analyser le fonctionnement des savanes de type soudanais. L'utilisation conjointe de la variation temporelle du NDVI (Indice de Végétation Normalisé) et d'une fonction de structure respectivement à partir des données in situ et des images TM de Landsat indique les résultats suivants :
(1) L'indice de végétation (NDVI) se caractérise par une fonction linéaire pendant la phase de dessèchement de la végétation.
(2) La prise en compte de la phase de repousse se traduit globalement par une fonction polynomiale du second degré pour la période octobre-avril avec une variance expliquée d'environ 90 %. Cette dernière reste cependant très influencée par la pluviométrie, le type de sol et la nature des couverts végétaux.
(3) Cette étude fournit des valeurs de NDVI pouvant être intégrées dans un modèle climatique en zone de savane pendant la période de grande modification de la phénologie du couvert végétal.
En dépit de la complexité apparente de cette végétation de savane liée au déphasage dans le fonctionnement des ligneux et des herbacées, celle-ci est organisée en unités structurales variant entre 150 m et 180 m, quelle que soit la saison. Cette dimension caractéristique du paysage semble liée à la taille des unités du milieu plutôt qu'à la spécificité des différents types de couvert en présence. Une nomenclature de la végétation aux échelles d'observation 150 m–180 m reste à définir pour améliorer l'analyse de la dynamique saisonnière de ce milieu.

Mots clés : indice de végétation normalisé ; télédétection ; savane ; saison ; mesures in situ ; variogramme.

# SEASONAL VARIATION OF SAVANNA VEGETATION : CASE OF THE COMOE NATIONAL PARK IN THE IVORY COAST.

Vegetation is a very sensitive part of the ecosystem for climate change and many studies of vegetation dynamics in Africa are currently being carried out using higher time frequency data from sensors with coarser spatial resolution. However, the potential of remote sensing cannot be always easily exploited for monitoring vegetation change especially in the Sudanian area where the vegetation cover is spatially and temporally heterogeneous throughout the seasons. As the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) is a crucial input parameter to the climatic models, it is highly important first to characterize its seasonal variation for different types of vegetation cover in the Sudanian region. Secondly, we need to determine compatible spatial scales for a better understanding of the Sudanian vegetation dynamics both for regional or global climate change studies.
Our study is carried out on a representative site of the Sudanian savanna located at the Northern limit of the Comoe National Park (Ivory Coast). Both multitemporal Landsat TM images and in situ radiometric and rainfall acquisitions from October (end of the rainy season) to April (beginning of the rainy season) are used in this study.
The NDVI data generated from radiometric measurements are analyzed over different vegetation types from October to April as they are directly related to plant vigor and growth conditions. This study yields interesting results ; in particular, NDVI values were provided for Sudanian vegetation at different states of phenology. NDVI computed with radiometric measurements varies as a second order polynomial during the dry and the growing seasons. When estimating the temporal variation of the NDVI with such a polynomial, the RMSE (Root Mean Square Error) is 0.04 with 90 % of confidence in the estimate. The dry season, which starts in October for most of the vegetation cover, ends in February and the NDVI decreases linearly during this period with a correlation coefficient ($r^2$) of 0.97 and a RMSE of 0.03. A shift in time is observed during the dry season for the vegetation in the lowlands, stressing the impact of soil humidity in the vegetation development in this study area. The growth of the vegetation starts with the appearance of the first rainfall but it is a complex function of the vegetation characteristics and the soil background. During the growing season, the vegetation cover remains very heterogeneous.
In the second part of this paper, a classification method based on the use of a variogram (structural functions) was completed on the Landsat scenes for a ground pixel size of 1 km in order to analyze the seasonal dynamics structure of the landscape within the range of 30 m–300 m. The analysis conducted during the phenology change of the vegetation cover in the Sudanian area stresses that the characteristic sizes are within [150 m–180 m]. This size seems to be related to the spatial organization of the savanna environment rather than the vegetation cover type.

**Keys words**: Normalized Difference Vegetation Index, remote sensing, savanna, season, in situ measurements, variogram.

## 1. INTRODUCTION

La savane en Afrique de l'Ouest fait l'objet de nombreuses recherches dans la mesure où elle représente un bon indicateur des changements climatiques (Justice et al., 1985 ; Le Barbé and Lebel, 1997 ; Graef and Haigist, 2001 ; Roerink et al., 2003). Le couvert végétal recouvrant les zones de savanes se compose essentiellement de strates herbacées et de strates ligneuses. En novembre (début de la saison sèche), les herbacées entament leur dessèchement tandis que les ligneux sont toujours en pleine feuillaison (Fournier, 1987). Pendant la saison sèche, les paysages présentent une certaine hétérogénéité correspondant à des sols nus, des zones brûlées et des repousses vertes dans des proportions très variables. Pendant cette période, le dessèchement affecte toute la strate herbacée alors que la chute des feuilles chez les ligneux n'affecte pas toutes les espèces. Le couvert végétal de la zone soudanienne représente ainsi un milieu complexe de par son fonctionnement et intéressant à étudier à l'aide de l'outil de télédétection (Aman, 1991).

En fournissant régulièrement des images de la surface, les satellites d'observation de la terre permettent de détecter en particulier les changements dans le couvert végétal. La plupart des observations visant à étudier la dynamique de la végétation à l'échelle régionale ou globale ont été réalisées à partir de données AVHRR de NOAA (Advanced Very High Resolution Radiometer-National Oceanic and Atmospheric Administration). C'est particulièrement le cas en Afrique de l'Ouest où l'utilisation de ces données s'est avérée fructueuse, pour l'étude des problèmes de la désertification des sols au Sahel (Prince, 1991), pour l'étude de la production de biomasse herbacée au Sénégal (Tucker *et al.*, 1985) ainsi que pour l'estimation de rendements de pâturages au Niger (Whylie et al., 1991). Il convient cependant de mentionner que cette observation spatiale est conditionnée par plusieurs paramètres dont les échelles de temps et d'espace de mesure. La capacité de détection des changements qui se produisent au niveau des objets recouvrant la surface terrestre à partir de données spatiales est une fonction complexe des caractéristiques spatio-temporelles du phénomène lui-même, de la résolution spatiale du capteur et de sa répétitivité temporelle (Becker et Raffy, 1988). Les variables pertinentes à l'échelle des mesures in situ ne le sont plus dès lors que la résolution spatiale est dégradée.

De par leur complexité, les savanes en Afrique de l'Ouest représentent des cas d'étude privilégiés pour la recherche d'échelles spatiales d'observation au sol. En effet, le couvert végétal de ces savanes se compose fondamentalement de deux strates, une ligneuse et l'autre herbacée, et la nomenclature utilisée est basée sur des critères de hauteur et de densité des ligneux (Trochain, 1957 ; César, 1971 ; Boudet, 1978 ; Fournier, 1987 ; Poilecot, 1991). Cette nomenclature n'est pas appropriée pour la classification de ce type de végétation à partir d'images satellitaires telles qu'AVHRR (Aman *et al.*, 2001). Cependant les informations relatives au fonctionnement de ces savanes à l'échelle locale peuvent constituer des éléments clés pour une meilleure interprétation des images issues des capteurs à plus haute résolution spatiale tels que HRV de SPOT (Haute Résolution dans le Visible) et AVHRR de NOAA. La présente étude consiste à caractériser des stades phénologiques d'un tel milieu à l'aide de mesures radiométriques de terrain durant la période où le couvert végétal subit les modifications les plus importantes de son cycle végétatif (octobre-avril). Le milieu d'étude choisi est le Parc national de la Comoé. Le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) avec ses limites de signification sera utilisé comme le paramètre clé de notre étude car il représente un bon indicateur des cycles végétatifs (Tucker, 1979). Connaître la variation du NDVI sur différents types de couverts végétaux à différentes saisons est un objectif intéressant car celui-ci est couramment utilisé dans les modèles climatiques (Goward, 1988). Elle peut également servir à la compréhension de la dynamique saisonnière des structures spatiales du paysage.

Cette étude s'organise de la manière suivante : après une présentation du site et des données utilisées suit une description de la méthode d'analyse des structures spatiales à l'aide du variogramme. Les résultats sont alors discutés essentiellement sur la caractérisation du couvert végétal des savanes de type soudanais et sur l'évolution saisonnière de leurs structures spatiales sous-jacentes entre le début du dessèchement et la repousse du couvert végétal en relation avec la pluviométrie. Un accent particulier sera mis sur le cas des bas fonds qui représentent des éléments structurants des paysages de savanes.

## 2. DESCRIPTION DU SITE D'ÉTUDE

La zone d'étude se trouve dans le Parc national de la Comoé (PNC) autour du site de Ouango-Fitini au nord-est de la Côte d'Ivoire (Figure 1). Ce parc, qui couvre une superficie de 1 149 150 ha est protégé depuis 1926. Il est reconnu comme réserve de la biosphère et comme site du Patrimoine Mondial. Le PNC a fait l'objet de nombreuses études dans le passé (César, 1971 ; Fournier, 1982 ; Lavenu, 1984 ; Achard, 1989 ; Poilecot, 1991 ; Aman *et al.*, 1992 ; Aman *et al.*, 2001).

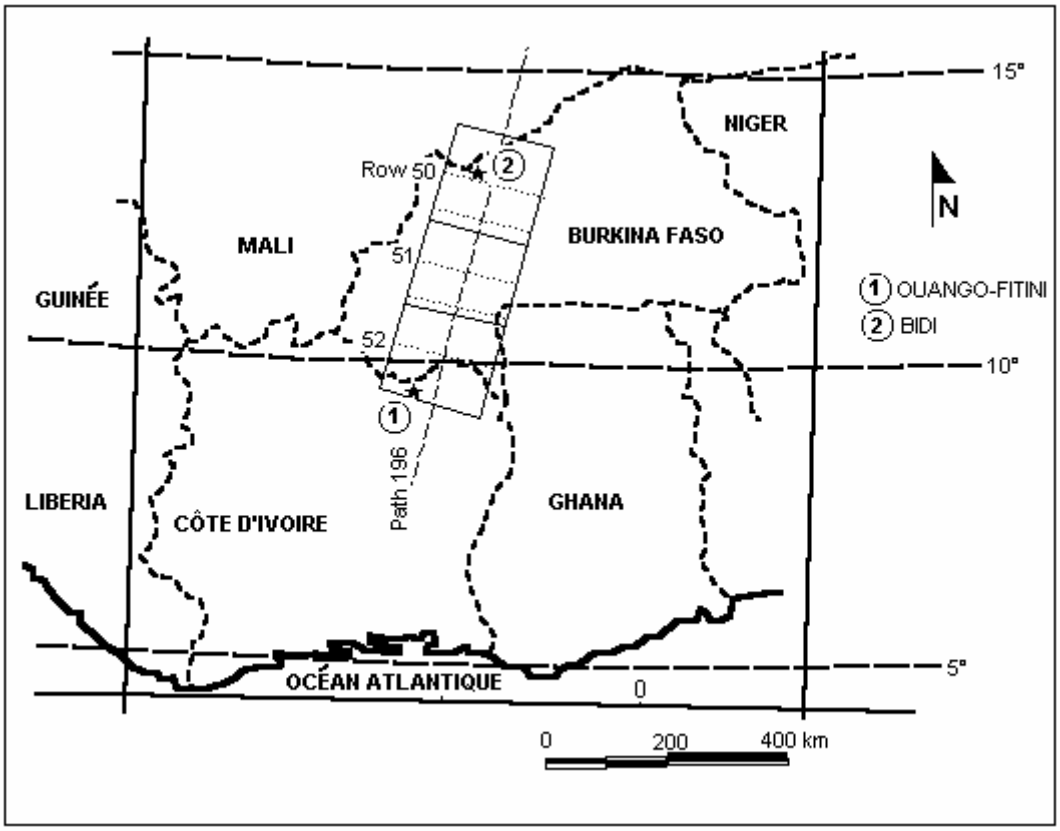



**FIGURE 1 :** Localisation de la zone d'étude en Côte d'Ivoire sur la trace de l'orbite # 196 de TM de Landsat.
*Location of the study area in the Ivory Coast along the Landsat TM ground track (orbit # 196).*

### 2.1. Végétation

La végétation du site de Ouango-Fitini appartient au domaine soudanais caractérisé principalement par deux types de formations végétales : savanicoles et forestières.
La nomenclature classique décrite selon Trochain (1957) est la suivante :

- forêt galerie : formation forestière bordant les cours d'eau, constituée d'arbres et de lianes, avec un taux de couverture ligneuse de 100 %.
- forêt claire : formation végétale dont la strate ligneuse a un recouvrement de 70 à 90 %.
- savane boisée : formation végétale avec un recouvrement ligneux de l'ordre de 20 à 70 %.
- savane arborée : formation comportant une strate herbacée continue avec une couverture ligneuse de 2 à 20 %.
- savane arbustive : elle a les mêmes caractéristiques que la savane arborée, mais avec un taux de couverture des ligneux variant de 2 à 70 %.
- savane herbeuse : ce type de formation est en général dépourvu de ligneux (moins de 2 %).
- L'écosystème de Ouango-Fitini se maintient principalement par un équilibre fragile entre le sol, le climat, la végétation, la faune et les feux. Les feux interviennent souvent à la fin du mois de novembre (Lavenu, 1984). Mais c'est au cours de la période décembre-janvier qu'apparaissent les plus grandes zones de brûlis.

### 2.2. Le climat

Le climat est l'un des facteurs essentiels dont dépend la couverture végétale de la zone soudano-sahélienne. La pluviométrie représente un facteur écologique déterminant car elle permet de différencier les climats dans cette zone. Le développement des formations végétales dépend non seulement de la quantité de pluie tombée, mais aussi de leur répartition temporelle. Le climat de Ouango-Fitini est de type tropical humide à une saison sèche (novembre-avril) et une saison de pluie (mai-octobre).

## 3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

### 3.1 Matériel

Les images utilisées dans cette étude ont été acquises à différentes dates correspondant à différentes saisons pour rendre compte des changements de la phénologie du couvert végétal. Les dates de prise de vue des images disponibles figurent dans le Tableau 1. Le choix des deux fe-

nêtres retenues dans le cadre de cette étude est justifié par les raisons suivantes:

a) une grande base de données botaniques a été élaborée au-dessus de ces secteurs lors des nombreuses campagnes de mesures effectuées par l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement), par le CESBIO (Centre d'Étude Spatiale de la Biosphère) et par l'UFR de Biosciences de l'Université de Cocody (Côte d'Ivoire). La Figure 2 représente une image TM de LANDSAT acquise au-dessus de Ouango-Fitini, en novembre 1986.

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

**TABLEAU 1 :** Dates d'acquisition des images TM de Landsat au-dessus de Ouango-Fitini. *Acquisition dates of the LANDSAT TM images over Ouango-Fitini.*

| Sites | Dates |
|---|---|
| OuangoA, Ouango1 | 4 novembre 1986 |
| OuangoB, Ouango2 | 27 décembre 1986 |
| OuangoC, Ouango3 | 1 mars 1987 |
| OuangoD, Ouango4 | 4 mai 1987 |

.

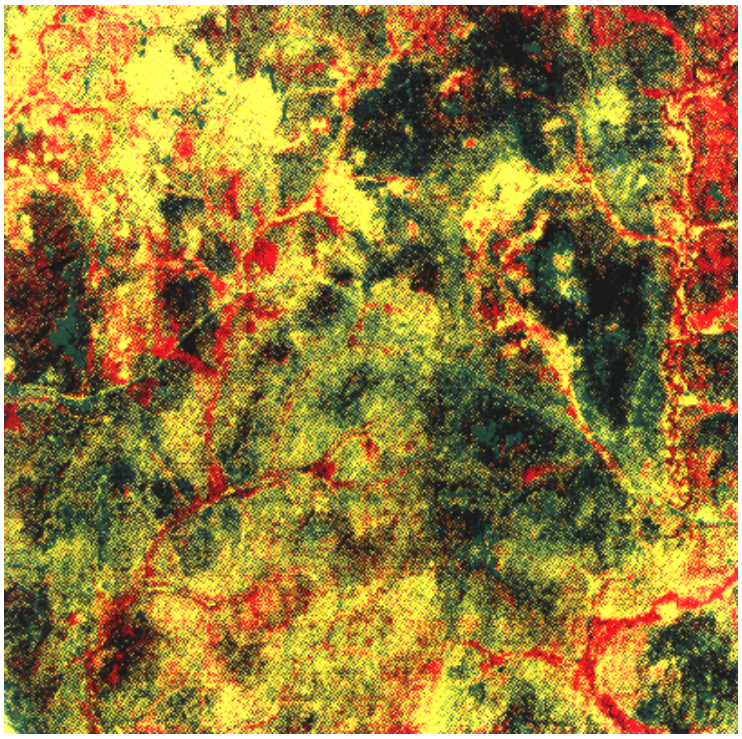


**FIGURE 2 :** Composition colorée d'une scène TM de Landsat (superficie 15 km par 15 km) acquise au-dessus de Ouango-Fitini en novembre 1986 : TM-3 et TM-4 respectivement sur les plans vert et rouge. *Colour composite of a Landsat TM scene (area of 15 km by 15 km) acquired over Ouango-Fitini in November 1986 : TM-3 and TM-4 respectively on the green and the red plane.*

En plus des images TM, nous disposons des hauteurs mensuelles de pluie de 1960 à 1990 et de mesures radiométriques de terrain dans les canaux XS de SPOT. Ces mesures in situ couvrent pratiquement toute la période d'acquisition des images satellitaires (octobre 1986-mai 1987). Les mesures de terrain ont été réalisées par le CESBIO dans le cadre de l'expérience « rythmes biologiques de la végétation » à l'aide du radiomètre CIMEL. Cet instrument portatif est constitué de deux radiomètres indépendants permettant une acquisition simultanée des luminances incidentes et réfléchies par une cible au sol dans trois bandes spectrales identiques à celles de SPOT (XS1 : 550 nm–590 nm, XS2 : 620 nm–680 nm, XS3 : 790 nm–890 nm). Les luminances issues de la cible au sol ont été acquises dans un champ de vue (Field Of View (FOV)) de 12 ° tandis que les mesures d'éclairement provenant du ciel sont intégrées dans une demi-sphère. La réflectance de la cible dans chacune des trois bandes spectrales est alors calculée comme un rapport de la luminance réfléchie par la cible à l'éclairement hémisphérique du ciel. Sept sites ont été identifiés pour la réalisation de ces mesures radiométriques de terrain. Sur chaque site test, trois ou quatre parcelles ont été délimitées par une piste par-feu. La Figure 3 présente la description d'un site test. Les parcelles choisies ont été échantillonnées à partir de critères géomorphologiques, pédologiques et de physiono-

mie de la végétation. Sur chacune de ces parcelles, une placette a été protégée pour procéder aux mesures durant toute la campagne. Sur chaque placette, trois mesures étaient effectuées au nadir et dans un plan proche de celui du plan d'incidence solaire. Ces trois mesures visaient à prendre en compte l'hétérogénéité spatiale éventuelle de la structure du couvert herbacé. À proximité immédiate de la placette, une petite surface (~10 m²) était entièrement désherbée afin de mesurer la réflectance du sol nu.

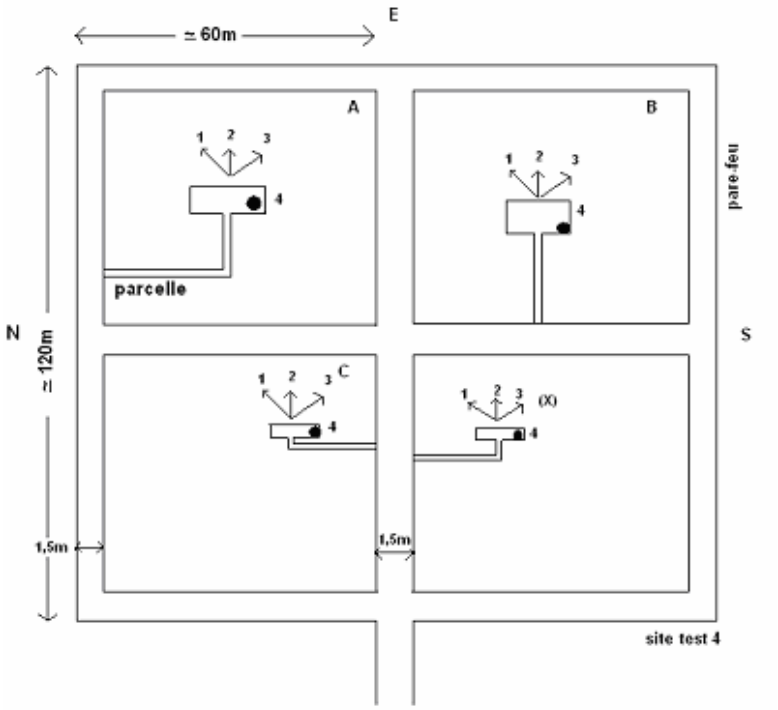



**FIGURE 3 :** Schéma d'un site test.. *Schematic representation of a test site.*

### 3.2. Méthodes

#### 3.2.1. Calcul du NDVI à l'aide des mesures CIMEL

Parmi les indices de végétation, le NDVI constitue un bon indicateur des cycles végétatifs (Tucker, 1979). Les moyennes des mesures de réflectance effectuées sur les différentes parcelles d'un même site sont utilisées pour le calcul du NDVI. Nous procédons alors à l'identification des phases dynamiques des différents biomes en présence sur le site d'étude à l'aide d'une simple représentation graphique de la variation temporelle de cet indice de végétation. Un ajustement polynomial est appliqué sur ces mesures expérimentales afin de faciliter cette analyse.

#### 3.2.2. Détermination de variogramme sur les images AVHRR

La structure spatiale d'un couvert végétal est décrite par la manière avec laquelle sont agencées ses différentes composantes ente elles. Elle se définit plus précisément comme un groupe d'éléments perçus dans sa totalité comme n'étant plus le produit d'un assemblage aléatoire. Comprendre la structure spatiale d'un couvert végétal nécessite une modélisation des relations spatiales entre les éléments constitutifs.

Le variogramme qui par définition représente un indice de contraste sensible aux fluctuations locales s'avère être un outil particulièrement approprié dans cette approche (Ruelle *et al*., 1986). Il permet de caractériser les corrélations spatiales au sein d'une structure régionalisée (Serra, 1967).

Dans la pratique, le variogramme sur une fenêtre U se calcule de la manière suivante :

$$(1) \qquad \gamma(h) = \frac{1}{2n}\sum_{i=1}^{n}\left[F(x_i + h) - F(x_i)\right]^2 \qquad h \in \left[0, h_{\max}\right].$$

où n représente le nombre de pixels distants de h dans la fenêtre U et h une distance sélectionnée en pixels pour l'analyse des propriétés structurales de la scène étudiée.

$x_i$+h et $x_i$ représente deux pixels appartenant à cette fenêtre U séparés d'une distance h. Ici, $F(x_i)$ représente simplement le compte numérique du pixel $x_i$.

La taille de la fenêtre U doit être choisie au moins égale à $3h_{max}$ (Ramstein and Raffy, 1989). Nous nous proposons d'analyser les structures spatiales à travers des fenêtres glissantes de taille de 1 km par 1 km. Seules sont utilisées dans le cadre de cette étude, les images en indice de végétation. Les structures spatiales seront alors analysées pour des distances h comprises entre 1 et 10 pixels, soit entre 30 m et 300 m.

En dépit de la complexité apparente des paysages naturels liée à une variation chaotique de ses composantes à l'échelle locale, apparaissent deux grands types de structures spatiales simples (Ramstein and Raffy, 1989) :

- La première concerne les phénomènes stationnaires. Il existe donc dans ce cas une échelle spatiale privilégiée d'observation au-delà de laquelle le phénomène apparaît comme un bruit blanc.
- La deuxième s'applique aux phénomènes qui présentent une forme de structure identique quelle que soit l'échelle d'observation. Elle concerne les formes fractales.

Pour obtenir une description concise et objective du variogramme, il est primordial de faire appel à des modèles mathématiques. Dans l'étude des paysages naturels, le modèle à palier dont l'équation est la suivante (2) est le plus couramment utilisé (Woodcock et al., 1988) :

(2) $$\gamma(x) = c(1 - e^{-\frac{h}{a}})$$

où c et a sont des constantes positives ; c représente la variance sur l'image et a est un paramètre lié à la longueur d'autocorrélation ($l = 3a$). Ces paramètres sont utilisés pour la réalisation d'une classification texturale sur une image.

## 4. RÉSULTATS

### 4.1. Analyse des mesures de terrain

Cette analyse vise à caractériser les stades phénologiques de la végétation en étudiant la variation du NDVI du dessèchement à la reprise du couvert végétal dans le Parc national de la Comoé. Compte tenu de l'importance de la pluviométrie dans le développement de la végétation pour cette zone d'étude, il est essentiel d'analyser dans une première étape sa variation saisonnière.

#### 4.1.1. Pluviométrie associée à la période d'étude à Ouango-Fitini

La Figure 4 représente l'évolution des hauteurs mensuelles de pluie enregistrées entre septembre 1986 et mai 1987 dans le Parc national de la Comoé. Une décroissance de la pluviométrie est observée entre septembre et décembre 1986, la période sèche correspondant à décembre 1986, janvier et février 1987. A partir de mars 1987, les premières pluies sont enregistrées, mais c'est généralement en mai que débute la saison des pluies à Ouango-Fitini.

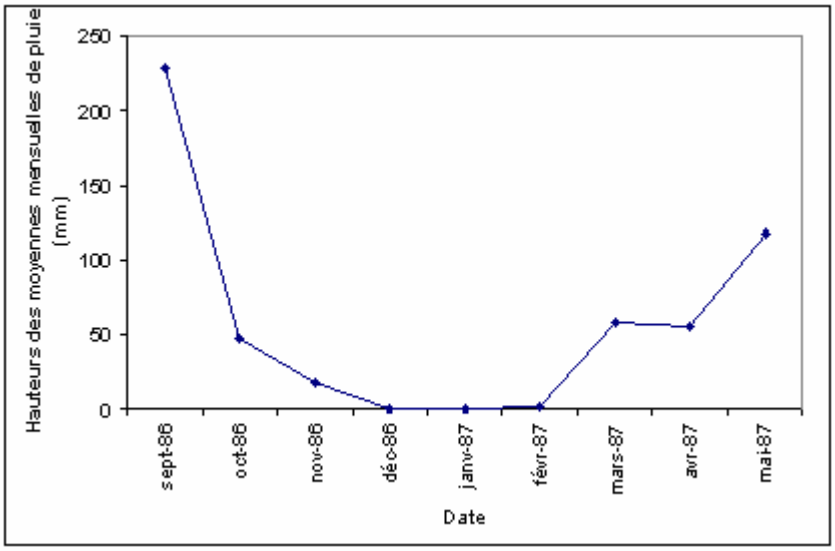



**FIGURE 4 :** Hauteurs en des moyennes mensuelles de pluie enregistrées dans la zone de Ouango-Fitini entre septembre 1986 et mai 1987. *Monthly mean rainfall over Ouango-Fitini collected from September 1986 to April 1987.*

#### 4.1.2. Variation temporelle du NDVI du dessèchement à la reprise du couvert végétal

Les indices de végétation ont été calculés à partir des mesures radiométriques effectuées sur l'ensemble des parcelles des 7 sites d'étude. La Figure 5 représente les variations de l'indice de végétation entre octobre 1986 et avril 1987 sur les savanes arbustives / arborées et herbeuses. Une comparaison directe à la pluviométrie enregistrée sur la zone d'étude (Figure 4) indique qu'à la fin de la saison des pluies (octobre), l'indice de végétation est relativement élevé. Celui-ci varie entre 0,45 pour la savane herbeuse et 0,65 pour les savanes arborées / arbustives sur sol hydromorphe. À cette date, le NDVI correspond au maximum de biomasse foliaire du couvert végétal. À partir d'octobre, le NDVI présente une phase de décrois-

sance, suivie d'une légère croissance à partir de la mi-mars, selon le type de couvert. Ces deux phases correspondent respectivement à la période de dessèchement et de repousse du couvert végétal. Entre ces deux étapes du cycle de la végétation, apparaît une période stationnaire caractérisée par de faibles valeurs de NDVI (comprises ici entre 0,25 et 0,3). L'analyse de la Figure 6 montre que le début du dessèchement des savanes des bas fonds n'intervient qu'à partir de la mi-novembre, au moment où les herbacées et les ligneux sont déjà en phase de dessèchement avancé.

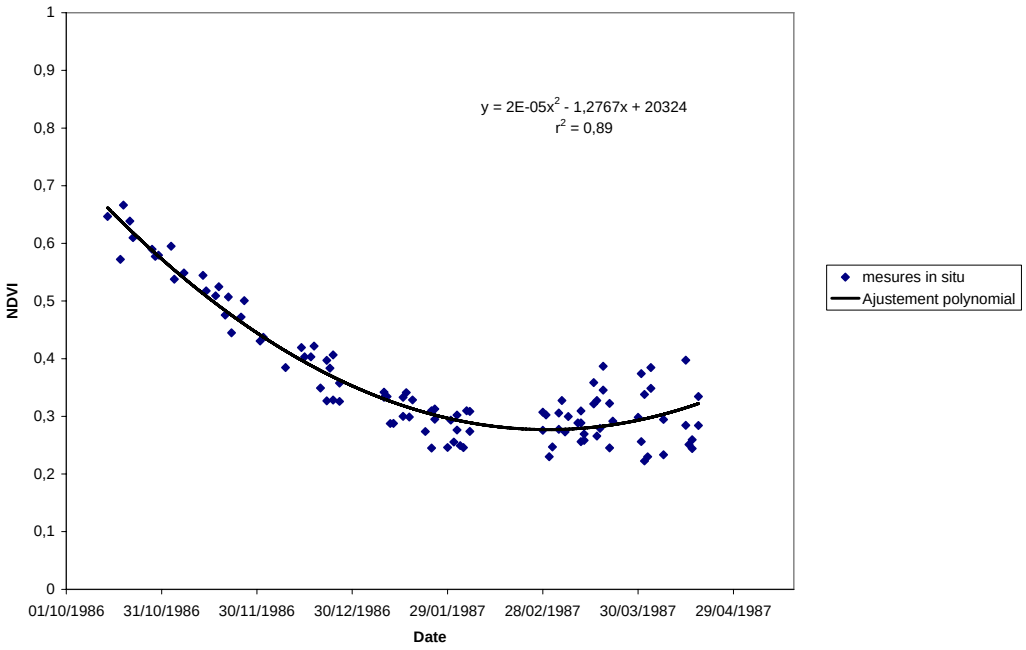



**FIGURE 5 :** Variation temporelle de l'indice de végétation déterminée à l'aide des mesures CIMEL acquises sur l'ensemble des savanes arborées / arbustives durant la période octobre 1986–avril 1987. *Temporal variation of NDVI computed with CIMEL, measurements acquired over wooded savanna.*

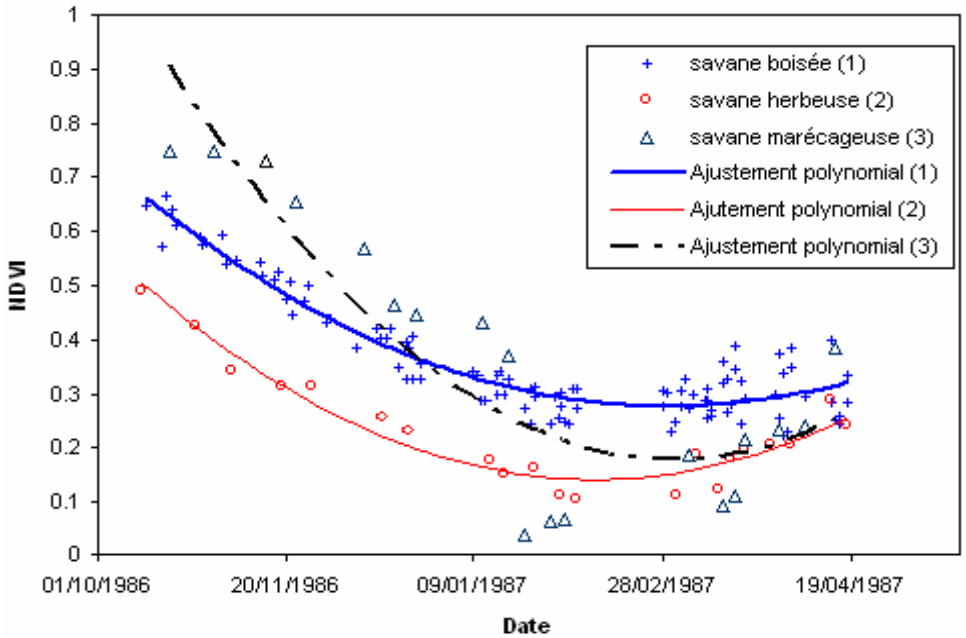



**FIGURE 6 :** Comparaison de la variation temporelle du NDVI des savanes arborées / arbustives, marécageuses et herbeuses, durant la période octobre 1986–avril 1987. *Comparison of NDVI temporal variation over wooded savanna, lowland savanna, and herbaceous savanna, from October 1986 to April 1987.*

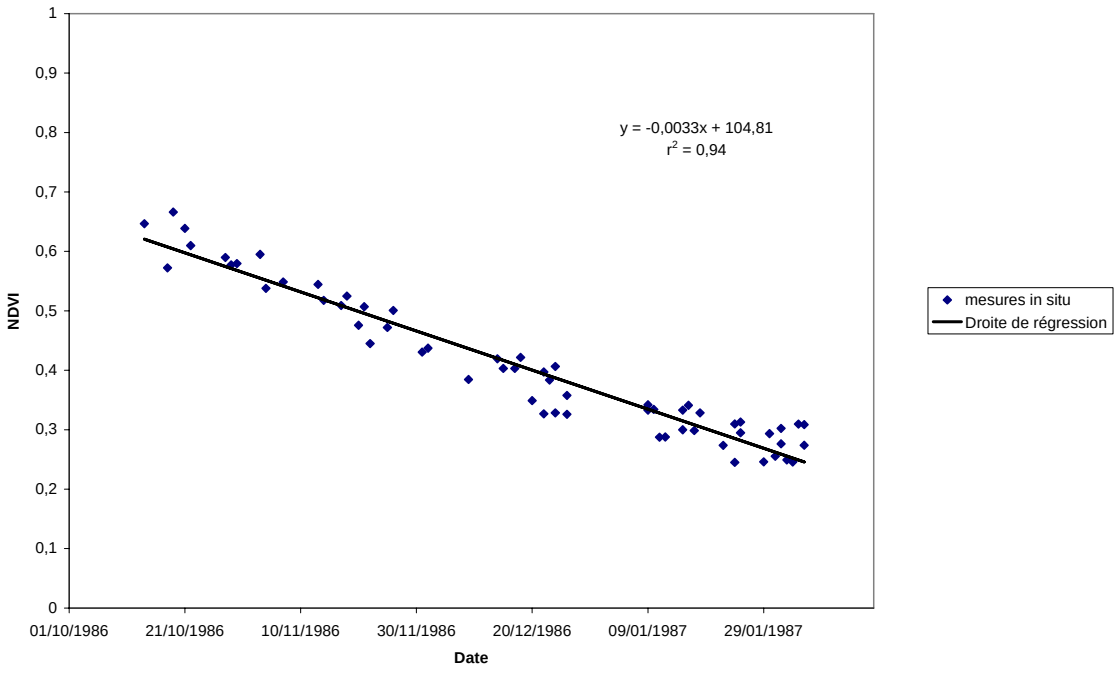
La variation temporelle de l'indice de végétation au cours de la période octobre-avril a été ajustée par une courbe de tendance (ici un polynôme du second degré) pour chacun des sept sites retenus (Tableau 2). Les résultats démontrent qu'il est possible de caractériser globalement le cycle végétatif du couvert végétal des savanes soudaniennes par leur NDVI (Figure 6). En effet, l'erreur absolue commise sur l'estimation du NDVI est de l'ordre de 4 %. À l'exception de la savane marécageuse de bas-fond sur sol hydromorphe, plus de 90 % de la variation du NDVI peut être estimée à partir de cet ajustement polynomial. La repousse de la végétation se traduit par des indices de végétation très variables à cause du stress hydrique. Pendant cette phase, le couvert végétal peut présenter une très grande hétérogénéité spatiale. Nous détaillons dans les parties suivantes les différentes phases du cycle végétatif au cours de la période octobre–avril.

a) Caractérisation de la phase du dessèchement de la végétation (octobre–mi-février).

Durant toute la période du dessèchement de la végétation, des mesures radiométriques (CIMEL) ont été acquises 10 à 12 fois sur chacune des parcelles retenues pour cette étude. Pendant toute cette phase de dessèchement, le NDVI des savanes herbeuses reste toujours inférieur à celui des autres formations végétales. Quant aux savanes marécageuses des bas-fonds, le dessèchement ne débute qu'après la mi-novembre et les valeurs du NDVI mesurées sont relativement élevées (entre 0,75 en octobre et 0,40 en janvier).

**TABLEAU 2 :** Coefficients d'ajustement polynomial de la variation temporelle du NDVI durant la période octobre 1986-avril 1987. *Polynomial coefficients of the NDVI temporal variation from October 1986 to April 1987.*

| Nom et description des sites tests | a | b | c | $r^2$ |
|---|---|---|---|---|
| Site 1 : savane herbeuse | $3.10^{-5}$ | -0,0067 | 0,58 | 0,93 |
| Site 2 : savane arbustive/arborée | $2.10^{-5}$ | -0,0056 | 0,72 | 0,95 |
| Site 3 : savane arbustive | $2.10^{-5}$ | -0,0069 | 0,78 | 0,90 |
| Site 4 : savane arborée | $2.10^{-5}$ | -0,0055 | 0,69 | 0,95 |
| Site 5 : savane marécageuse | $4.10^{-5}$ | -0,0120 | 1,29 | 0,80 |
| Site 6 : savane herbeuse | $2.10^{-5}$ | -0,0056 | 0,74 | 0,95 |
| Site 7 : forêt claire | $2.10^{-5}$ | -0,0063 | 0,75 | 0,94 |



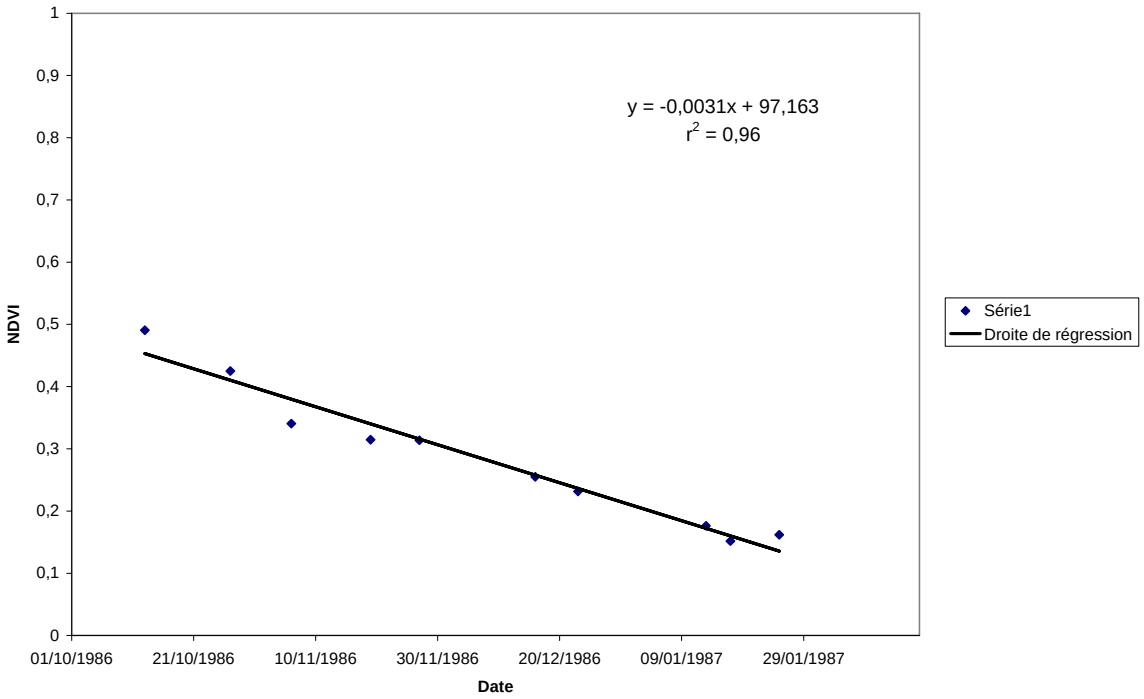



**FIGURE 7 :** Variation temporelle du NDVI de l'ensemble (a) des savanes arborées / arbustives et (b) des savanes herbeuses pendant la période de dessèchement.. *Temporal variation of NDVI over (a) wooded savanna, and (b) herbaceous savanna during the drying season.*

Les Figures 7a et 7b représentent respectivement les variations du NDVI des savanes arbustives / arborées et des savanes herbeuses entre octobre et la mi-février sur lesquelles on a appliqué une régression linéaire. Les variances expliquées sont respectivement 93,7 % et 97,2 %. Le Tableau 3 fournit les valeurs des coefficients de l'ajustement linéaire du NDVI pour les différents sites d'étude. Les pentes associées à cet ajustement linéaire (coefficients a) représentent la vitesse à laquelle se dessèchent les différentes savanes en présence. Il apparaît ainsi que les savanes boisées et les savanes herbeuses, présentant des pentes quasi-identiques, se dessèchent plus rapidement que la savane de type marécageuse. Bien que les savanes boisées se dessèchent à la même vitesse que les savanes herbeuses, celles-ci se caractérisent par des indices de végétation toujours plus faibles que ceux des savanes boisées pendant toute cette phase phénologique

**TABLEAU 3 :**Coefficients d'ajustement linéaire de la variation temporelle du NDVI durant la période de dessèchement de la végétation. *Linear coefficients of the NDVI temporal variation during the drying period of the vegetation.*

| Nom et description des sites tests | a | b | $r^2$ |
|---|---|---|---|
| Site 1 : savane herbeuse | -0,0030 | 0,49 | 0,97 |
| Site 2 : savane arbustive/arborée | -0,0031 | 0,66 | 0,97 |
| Site 3 : savane arbustive | -0,0039 | 0,70 | 0,94 |
| Site 4 : savane arborée | -0,0032 | 0,64 | 0,95 |
| Site 5 : savane marécageuse | -0,0047 | 0,88 | 0,93 |
| Site 6 : savane herbeuse | -0,0032 | 0,68 | 0,96 |
| Site 7 : forêt claire | -0,0035 | 0,68 | 0,99 |

b) Caractérisation de la végétation desséchée.

Entre mi-février et mi-mars, les indices de végétation sont relativement faibles (0,1 à 0,2). Ils correspondent à des sols nus secs ou de la végétation desséchée. Généralement, des feux de brousse interviennent pendant cette période induisant de faibles valeurs de NDVI (i.e., de l'ordre de 0,05). Mais en mars, ces indices de végétation sont de l'ordre de 0,2 sur des parcelles brûlées entre décembre et janvier.

c) Description de la phase de reprise de la végétation

Sur l'ensemble des sites de mesures, la repousse de la végétation est effective sur les parcelles de savanes herbeuses et les savanes arbustives / arborées sur des sols hydromorphes. La reprise de l'activité chlorophyllienne de la savane arborée/arbustive se traduit par une augmentation de l'indice de végétation qui passe de 0,05 (après le passage du feu à la fin janvier) à 0,25 à la mi-avril. Lorsque la savane arborée / arbustive est épargnée par les feux de brousse, le NDVI associé est de l'ordre de 0,4. La repousse du couvert végétal est étroitement liée à l'arrivée des premières pluies, surtout pour la savane herbeuse. Au début de la repousse, la réponse radiométrique est très variable et la végétation présente souvent une certaine hétérogénéité spatiale. Les périodes de reprise du couvert végétal dépendent du type de couvert (Estève *et al.*, 1998; Foody, 2003). C'est pendant la reprise du couvert végétal que la réponse radiométrique est très variable, se traduisant par une forte hétérogénéité spatiale sur les images satellitaires. L'incertitude observée sur l'estimation de la variation du NDVI entre octobre et avril par une fonction polynomiale du second degré provient essentiellement de cette période de repousse du couvert végétal.

### 4.2. Analyse des structures spatiales du paysage de Ouango-Fitini

La deuxième partie de notre étude vise à rechercher les structures spatiales du paysage de Ouango-Fitini et leur évolution saisonnière pour les différents stades phénologiques du cycle végétatif. Nous avons utilisé pour cela deux sous-fenêtres dans des images TM de Landsat d'une taille de 15 km par 15 km. Chacune de ces 2 sous-fenêtres a été découpée en zones de 1 km par 1 km pour simuler la résolution des scènes AVHRR de NOAA. Le variogramme a ensuite été calculé sur chacune de ces zones pour une distance variant entre 30 m et 300 m.

#### 4.2.1. Analyse de la dynamique des structures spatiales

La Figure 8 présente un exemple de variogramme calculé sur une zone de 1 km par 1 km découpée à partir de l'image de novembre 1986 et modélisé par une fonction exponentielle décroissante (Eq. 2 ; a = 2,3, c = 1,2). Celle-ci fournit une structure spatiale d'une taille d'environ 210 m. La Figure 9 fournit la répartition de la distribution des structures spatiales dominant le paysage de Ouango-Fitini de novembre 1986 à mai 1987. D'après cette figure, les structures spatiales dominant le paysage en novembre ont des dimensions comprises entre 150 m et 180 m. D'un point de vue phénologique, novembre correspond au début du flétrissement des herbacées et au début de la défeuillaison des ligneux. Cependant, nous pouvons dire que la dimension 150 m-180 m est celle de la végétation encore au maximum de la biomasse (Aman *et al.*, 2001).

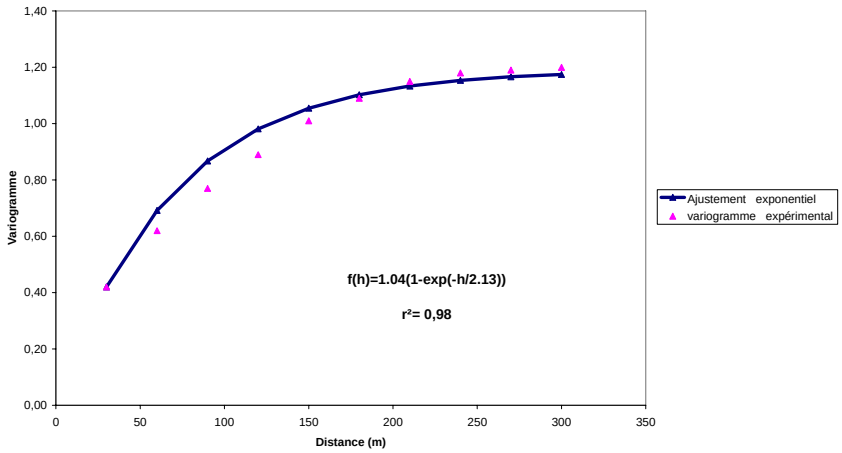



**FIGURE 8:** Variogramme expérimental calculé sur une scène TM de Landsat acquise au-dessus de Ouango-Fitini (mai 1987) et ajusté par le modèle exponentiel ( a = 2,13, c = 1,04 ). *Experimental variogram computed for a Landsat TM scene acquired over Ouango-Fitini (May 1987), and fitted by an exponential model ( a = 2.13, c = 1.04 ).*

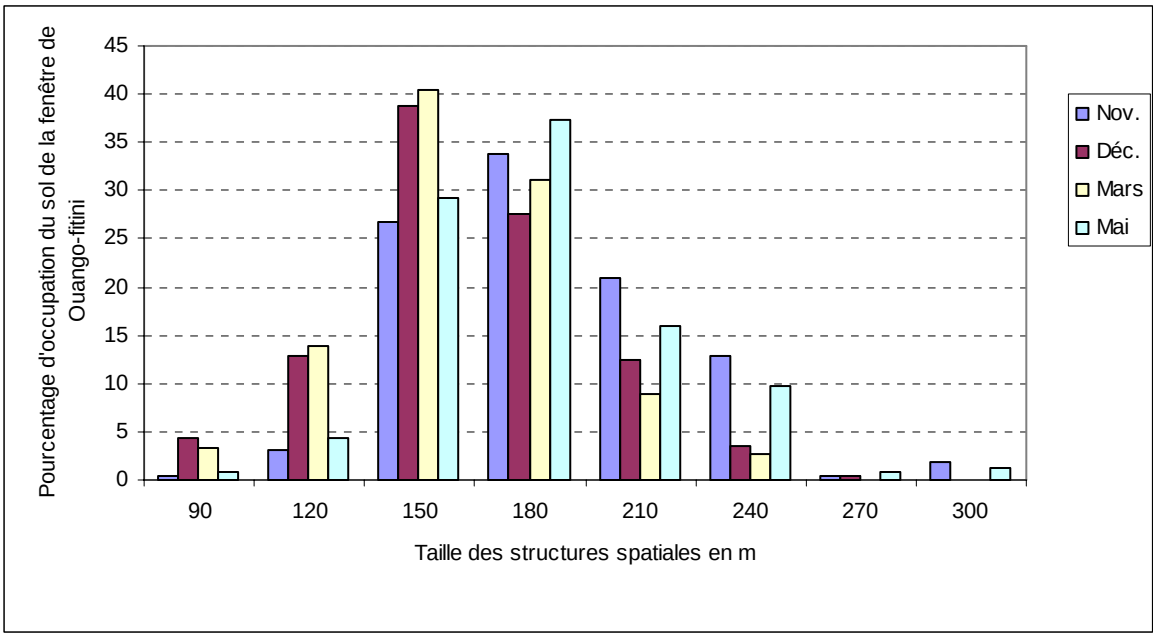



**FIGURE 9 :** Comparaison de la taille des structures spatiales dominantes du paysage de Ouango-Fitini en novembre, décembre, mars et mai. *Comparison of spatial structure sizes in Ouango-Fitini during November, December, March and May.*

L'analyse des variogrammes de décembre et de mars indique que l'organisation du paysage de notre site d'étude est comprise entre 150 m et 180 m pendant la saison sèche.

En mai, période au cours de laquelle les différentes formations végétales sont en pleine reconstitution, le paysage reste toujours organisé en objets dont les tailles caractéristiques varient entre 150 m et 180 m. Bien que la résolution spatiale optimale à l'observation de ce paysage reste voisine de 150 m à 180 m et que celle-ci ne change pas d'une saison à une autre, cela ne signifie pas d'un point de vue thématique que la nomenclature de la végétation soit la même en toutes saisons. Le variogramme permet simplement de définir les structures spatiales dans une image, mais ne permet pas de définir des classes de végétation (Woodcock *et al.*, 1988).

### 4.2.2. Cas particulier des bas-fonds marécageux

Nous avons appliqué le variogramme au cas particulier d'une parcelle de végétation de bas-fond pour analyser la dynamique saisonnière de sa structure spatiale. La Figure 10 présente les variogrammes associés à une zone de bas-fond à différentes dates. En novembre, la taille caractéristique du bas-fond varie entre 240 m et 270 m. L'étude réalisée à partir des mesures in situ montre que pour ce type de végétation, le dessèchement ne débute qu'après la mi-novembre. En décembre, la taille du bas-fond se rétrécissant, la taille optimale passe à 180 m. Cette diminution de la taille se traduit par l'effet de la sécheresse. En effet, les parties desséchées du bas-fond se confondent radiométriquement à la savane herbeuse environnante subissant elle-même un assèchement à cette période. La partie centrale du bas-fond, plus humide (sol hydromorphe) est moins affectée par la sécheresse. Avec la repousse de la végétation due aux premières pluies, le variogramme de mai se confond avec celui de novembre. Ceci correspond au phénomène de contraction et d'expansion de ce type de couvert végétal respectivement pendant la saison sèche et au début de la saison des pluies (Lavenu, 1984).

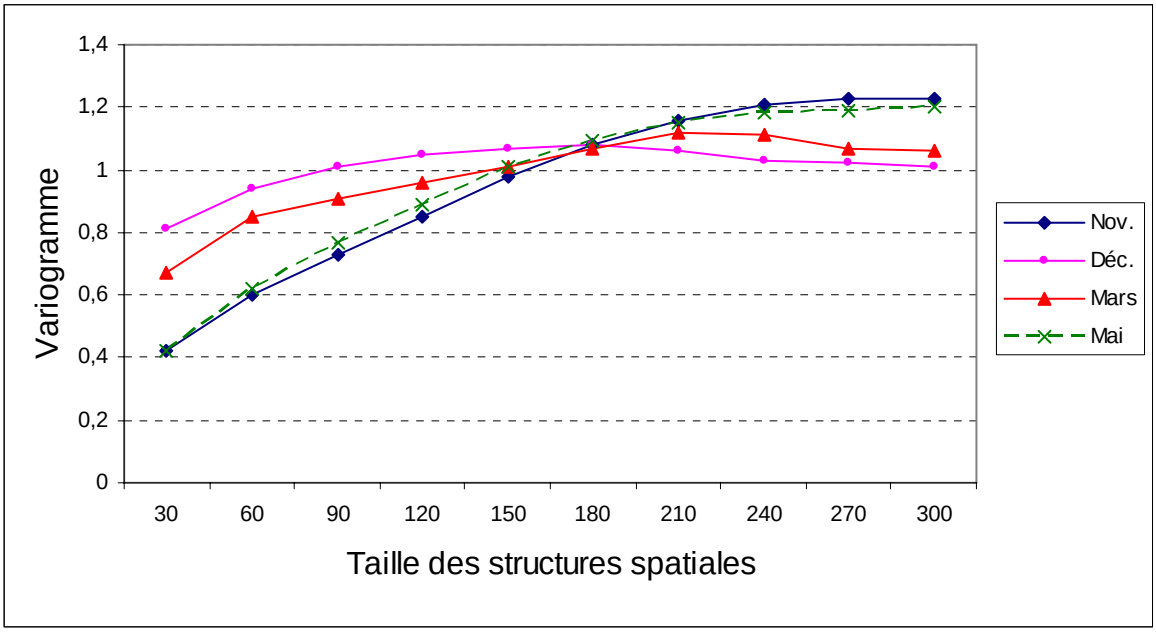



**FIGURE 10 :** Dynamique saisonnière d'une savane marécageuse de bas-fond. *Seasonal dynamics of lowland savanna.*

### 4.2.3 Discrimination savane herbacée–savane de bas-fond à l'aide du modèle de variogramme exponentiel

Dans cette partie, nous proposons d'utiliser les paramètres a (taille) et c (variance) du modèle de variogramme exponentiel pour séparer les savanes des bas-fonds et les savanes herbeuses.

Deux parcelles d'entraînement de végétation de bas-fond (bas-fond 1 et bas-fond 2) et deux autres de savanes herbeuses (savane herbeuse 1 et savane herbeuse 2) ont été choisies et les variogrammes associés ont été calculés à partir des images de novembre et mars. Les paramètres « a » et « c » ayant servi à la représentation de la Figure 11 mettent en évidence 3 regroupements (R1, R2 et R3) de points qui sont représentatifs des types de végétation. En novembre, à la fin de la saison des pluies, les bas-fonds 1 et 2 se regroupent en une seule classe (R1). Les variances associées sont élevées et les structures spatiales en présence ont une taille d'environ 180 m.

L'hétérogénéité radiométrique observée est probablement due au déphasage dans le fonctionnement des strates herbacées et ligneuses des bas-fonds. Pendant la saison sèche (mars), les bas-fonds présentent deux structures (variogrammes présentant des formes imbriquées) : une structure liée aux herbacées qui correspond aux versants des bas-fonds et une structure ligneuse (partie centrale des bas-fonds). Les structures herbacées des bas-fonds et celles des savanes herbeuses correspondent à la classe R2, montrant ainsi qu'elles représentent le même type de végétation, mais avec des textures différentes.

Les structures centrales des bas-fonds sont de tailles réduites avec une structure homogène : celles-ci sont regroupées dans la classe R3.

Cette étude montre qu'il est possible d'utiliser les paramètres du modèle exponentiel du variogramme pour discriminer la savane herbeuse et la savane des bas-fonds, mais seulement en fin de saison des pluies.

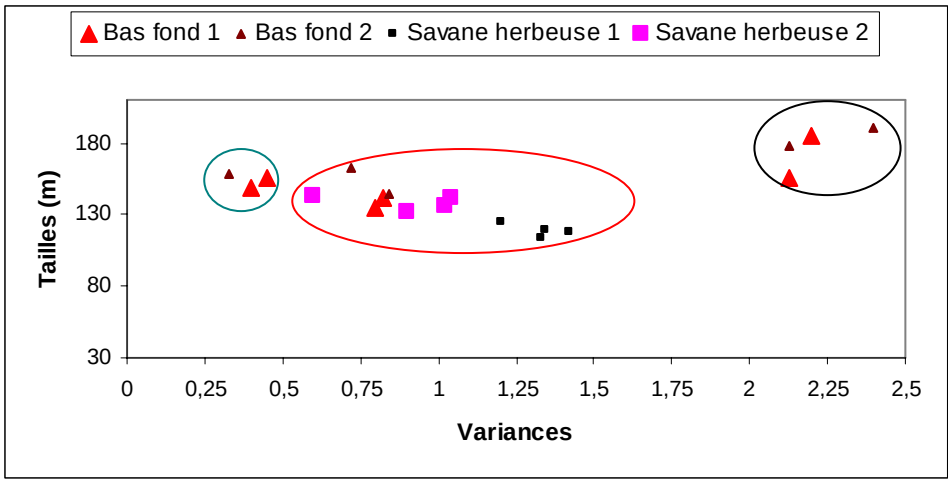



**FIGURE 11 :** Classification saisonnière des savanes marécageuses et herbeuses à l'aide des paramètres du modèle exponentiel.. *Seasonal classification of lowland and herbaceous savannas using exponential model parameters.*

## 5. DISCUSSION

L'ensemble des résultats présentés ci-dessus permet une description synthétique de la dynamique du couvert végétal d'une savane de type soudanais pendant la période des phases de jaunissement, dessèchement et de repousse. Les mesures in situ ont permis de modéliser les variations temporelles du NDVI pour divers types de savane à l'exception de celles des bas-fonds. La variation temporelle du NDVI estimée à l'aide d'un polynôme du second degré conduit à des corrélations supérieures à 90 %.

Ces résultats ont notamment permis de démontrer qu'au maximum de la biomasse, les indices de végétation les plus faibles sont associés aux savanes herbeuses (autour de 0,45) alors que les plus élevées correspondent aux végétations de savanes marécageuses (de l'ordre de 0,75). Cette étude a également permis de mettre en évidence que le début du dessèchement des savanes des bas-fonds est décalé au moins d'un mois par rapport aux autres formations végétales, ceci pouvant s'expliquer par le fait que pour ce type de végétation, le sol constitue un réservoir hydrique en début de saison sèche.

L'étude détaillée des différentes phases qui interviennent dans le cycle de fonctionnement du couvert végétal indique une décroissance linéaire du NDVI entre octobre et la mi-février. L'erreur commise sur l'estimation du NDVI sur cette période est relativement faible (entre 0,01 et 0,03). L'hétérogénéité spatiale très souvent observée sur des images AVHRR pendant la phase de dessèchement de la végétation est en partie expliquée par les feux de brousse allumés dans le parc et au déphasage de fonctionnement dans le cycle végétatif entre les différentes formations végétales en présence (Lavenu, 1984). Il est également possible d'observer cette hétérogénéité spatiale dans des images à plus haute résolution spatiale de type HRV de SPOT pour cette période. Ceci conduit à définir de nombreuses classes d'entraînement sur ces types d'image. Par contre, sur une image AVHRR, le nombre de classes pouvant être définies en novembre reste relativement faible dans la mesure où l'image apparaît plus homogène à cette résolution spatiale (Aman *et al.*, 2001). Ceci peut constituer un facteur limitatif à l'exploitation d'images AVHRR en terme de production primaire terrestre dans cette zone d'étude. L'utilisation de mesures radiométriques de terrain indique qu'il est difficile de faire mieux à l'échelle locale. En effet, la Figure 6 permet de ne distinguer que trois grandes classes de végétation de savanes, à savoir les savanes herbeuses, les savanes boisées et les savanes de bas-fond. Ceci apparaît clairement pour la période allant d'octobre à la mi-novembre. Au-delà, seules deux grandes classes se distinguent entraînant ainsi d'énormes confusions, surtout pendant la période de repousse du couvert végétal.

Un tel résultat montre notamment que la phase de repousse est liée à l'humidité du sol et au type de végétation (Roerink *et al.*, 2003). Les mesures radiométriques n'ayant pas été conduites sur plusieurs années, il ne nous a pas été possible de rechercher par exemple l'effet d'une fin de saison de pluie précoce sur la variation du NDVI. L'utilisation du NDVI seul ne permet pas de distinguer complètement les différents types de couverts végétaux présents sur la zone d'étude, même à l'aide de mesures in situ, surtout pendant la phase de repousse de la végétation. Qu'en est-il à l'échelle d'observation des satellites à haute résolution ou à large champ de vue où l'extraction d'information est souvent basée sur des critères texturaux ou structuraux ?

L'analyse des images de télédétection présente un double aspect complémentaire et / ou contradictoire (Serra, 1967) :

- les variations d'un pixel à un autre sont localement chaotiques (haute irrégularité et variation imprévisible d'un pixel à un autre) ;
- pourtant ces variations semblent structurées en moyenne, reflétant les caractéristiques structurales du phénomène étudié.

La réalité physique se trouve entre ces deux pôles contradictoires et / ou complémentaires. Le variogramme peut servir à modéliser de tels phénomènes.

Les résultats obtenus en appliquant une fonction de structure sur des images satellitaires de Ouango-Fitini montrent que malgré la complexité de ce paysage, il existe une échelle d'observation privilégiée permettant d'analyser la dynamique de notre milieu d'étude. Nous constatons que, quelle que soit la saison, les structures spatiales de ce paysage sont organisées en unités comprises entre 150 m et 180 m environ. En novembre et en mai, les tailles des structures sont d'environ 180 m tandis qu'elles sont de 150 m en décembre et en mars. Ces dimensions caractéristiques dominant le paysage semblent liées à la taille des unités de ce milieu plutôt qu'à celles spécifiques de tel ou tel type de couvert. S'il est facile d'associer certaines formes de variogrammes à des types de couvert (brousse tigrée par exemple), il ne paraît généralement pas facile d'associer ou de classifier les différentes formations végétales à partir de l'allure des variogrammes (Stralhler *et al*., 1986 ; Woodcock *et al*., 1988 ; Ramstein and Raffy, 1989). Il convient d'indiquer que le variogramme associé à une zone de 1 km par 1 km peut mettre en évidence l'existence d'un objet d'une taille donnée à une saison tout en correspondant à une autre forme de variogramme à une autre saison. Dans cette étude, le variogramme a tout simplement été utilisé pour discuter de l'organisation spatiale des objets du paysage de Ouango-Fitini, mais il ne permet pas de distinguer les différentes savanes en toute saison. La classification dynamique réalisée à partir des paramètres « a » et « c » du modèle de variogramme exponentiel sur des savanes de bas-fond et des savanes herbeuses montre qu'il est possible de séparer ces deux types de formation végétale à la fin de la saison des pluies (novembre). En effet, à cette date, les structures de bas-fond présentent des propriétés radiométriques différentes. Ceci pourrait s'expliquer par la différence entre le taux de couverture et l'état de verdeur des ligneux et des herbacés. Pendant la saison sèche, il est difficile de séparer ces deux types de savane. Ceci se constate également sur la variation temporelle du NDVI. Ramstein *et al.* (1989) ont utilisé le paramètre « a » du modèle exponentiel pour discriminer les textures des villes, des forêts et des champs à partir d'une image de TM de Landsat à une date donnée. L'utilisation d'une telle méthode pour distinguer les espèces végétales nécessite une approche multidate.

En utilisant une image TM de Landsat de Ouango-Fitini acquise en novembre 1986, Achard (1989) souligne que 180 m représente la distance optimale pour distinguer les classes de végétation entre elles. Il justifie l'utilisation de la résolution 180 m par l'homogénéité des paysages observés sur le terrain. À cette résolution spatiale, il a ainsi obtenu 7 classes de végétation. Comparés aux travaux d'Achard (1989), ces résultats montrent que si l'organisation spatiale des objets au sol ne change pas énormément d'une saison à une autre, cela n'autorise pas l'adoption d'une même nomenclature quelle que soit la période d'étude. Ceci peut en effet conduire à des confusions importantes compte tenu de la complexité du fonctionnement de ce milieu. Bien que réalisée à l'échelle locale, la présente étude montre la nécessité de définir une nomenclature pendant la saison sèche et une autre après la saison des pluies, à l'échelle optimale d'observation (150-180 m), en milieu de savane.

## 6. CONCLUSION

Le couvert végétal recouvrant la zone soudanienne et sahélienne constitue une zone privilégiée d'étude dans la mesure où il représente un indicateur essentiel dans l'étude les changements climatiques en Afrique de l'Ouest. Si la résolution à l'échelle AVHRR permet une description assez simple de la végétation sahélienne, ceci n'est pas le cas des savanes soudaniennes. Pour ces végétations de savanes, l'utilisation de la nomenclature de base définie par les botanistes n'est pas appropriée à la résolution spatiale d'AVHRR. De plus, à cette résolution spatiale, ces savanes sont homogènes à la fin de la saison des pluies puis hétérogènes pendant la saison sèche. Cette étude réalisée dans le Parc national de la Comoé, nous permet de poser le problème d'échelle spatiale optimale d'observation des savanes de type soudanienne à différentes périodes de leur cycle de fonctionnement.

L'utilisation conjointe de mesures radiométriques de terrain et d'images spatiales TM de Landsat pendant la période où le couvert végétal subit les grandes modifications de son cycle de fonctionnement fournit des résultats significatifs. En effet, cette étude a permis de montrer qu'il est possible de caractériser l'évolution temporelle du couvert végétal en zone soudanienne à partir du NDVI dérivé de mesures in situ. Les phases allant du dessèchement jusqu'à la reprise du couvert végétal peuvent être ajustées simplement par une fonction polynomiale du second ordre. Cette étude a montré en particulier que la période du dessèchement de la végétation qui s'étend d'octobre à la mi-février se traduit par une décroissance linéaire du NDVI sur la plupart des types de savanes étudiées. L'erreur commise sur les valeurs du NDVI mesurées et estimées par cette fonction linéaire reste très faible (entre 0,01 et 0,03 selon le type de végétation). Cependant, il convient de signaler que l'incertitude sur la valeur du NDVI est beaucoup plus grande pendant la période de repousse du couvert végétal (mars–avril) car elle dépend fortement du type de savane et des caractéristiques du sol. Les indices de végétation observés à l'aide des mesures radiométriques sont comparables à ceux intégrés à l'échelle AVHRR, mais avec des significations qui peuvent être difficiles à interpré-

ter surtout pendant la saison de la repousse du couvert végétal. Si la variation du NDVI sur la période considérée permet de caractériser le cycle de fonctionnement du couvert végétal à partir de données in situ, il est à noter que ce seul paramètre ne suffit pas pour distinguer les différents types de végétation rencontrés dans le Parc national de la Comoé en toute saison.

Malgré la complexité de ce milieu, il a été démontré à l'aide d'une fonction de structure (le variogramme) que le paysage du Parc national de la Comoé est composé d'unités structurales dont la taille varie entre 150 m et 180 m, quelle que soit la saison. Ce résultat signifie qu'en zone soudanienne, les surfaces végétales restent stables (en dehors du passage des feux). Les variogrammes indiquent que les tailles des structures dominant le paysage pendant la saison sèche sont d'environ 150 m alors qu'elles sont de l'ordre de 180 m au maximum de la biomasse. La caractérisation du couvert végétal à l'échelle locale grâce aux mesures de terrain permet de décrire en particulier le fonctionnement de certains milieux tels que les savanes de bas-fond. Les échelles d'observation mises en évidence par le variogramme semblent liées à la taille des unités de ce milieu plutôt qu'à celle spécifique de tel ou tel type de couvert végétal. Les résultats de cette étude doivent être complétés par la recherche d'une nomenclature à l'échelle d'observation comprise entre 150 et 180 m et validés sur d'autres types de savanes. Une nomenclature définie à cette résolution spatiale serait d'un apport considérable aussi bien pour l'estimation de la production primaire que pour la recherche sur le climat dans la zone de l'Afrique de l'Ouest occupée par les savanes.

### *Remerciements*

Les auteurs sont très reconnaissants au CESBIO qui leur a fourni les images et les données radiométriques de terrain. Ils tiennent également à remercier le service de la Météorologie de la Côte d'Ivoire pour avoir mis à leur disposition les mesures pluviométriques de la région de Ouango-Fitini. Ils tiennent enfin à remercier Monsieur François Lavenu (CESBIO) pour ses nombreuses discussions qui ont permis l'aboutissement de cet article. Enfin, nous tenons à remercier les arbitres pour leurs critiques positives.

### *Références*

Achard, F. (1989) Étude des rythmes saisonniers de la végétation en Afrique de l'Ouest par télédétection spatiale. Thèse, Université Paul Sabatier, Toulouse, 246 p.

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, Toulouse, 187 p.

Aman, A., H.P. Andriamanantena, A. Podaire and R. Frouin, R. (1992) Upscale Integration of Normalized Vegetation Index: the problem of spatial heterogeneity. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, vol. 30, n°2, p. 326-338.

Aman, A., S. Fofana et M. Keita (2001) Télédétection en milieu de savane: problème lié au changement d'échelle spatiale. Télédétection, Vol. 2, n° 2, p. 91-101.

Becker, F. et M. Raffy (1988) Modèles et modélisations en télédétection. Télédétection spatiale : aspects physiques et modélisation. Cépaduès-Éditions, École d'été internationale de physique spatiale, Toulouse (France). Les Éditions du CNES, 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 (France), 258 p.

César, 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 (Côte d'Ivoire), 50 p.

Estève, P., J. Fontès and J.P. Gastellu-Etchegorry (1998) Tropical dry modelling and monitoring from space. Ecological Modelling, vol. 108, p. 175-188.

Foody, G.M. (2003) Geographical weighting as a further refinement to regression modelling: an example focused on NDVI-rainfall relationship. Remote Sensing of Environment, vol. 88, p. 283-293.

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 (France), 168 p.

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

Goward, S. N. (1988) Satellite Bioclimatology. Journal of Climate, vol. 2, p. 710-720.

Graef, F. and J. Haigist (2001) Spatial and temporal rainfall variability in the Sahel and its effects on farmer's management strategies. Journal of Arid Environment, 48, p. 221-231.

Justice, C.O., J. G. R. Townshend, B.L. Holben and C. J. Tucker (1985) Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological data. International Journal of Remote Sensing, vol. 10, p. 1539-1561.

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, Toulouse (France), 189 p.

Le Barbé, L. and T. Lebel (1997) Rainfall climatology of HAPEX-Sahel region during the years 1950–1990. Journal of Hydrology, vol. 188-189, p. 43-73.

Poilecot, P. (1991) Un écosystème de savane soudanienne : le Parc national de la Comoé (Côte d'Ivoire). Projet UNESCO / PNUD n° IVC / 87 / 007, NT-2, Paris (France), 246 p.

Prince, S. D., (1991) Satellite and 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.

Ramstein, G. and M. Raffy (1989) Analysis of the structure of radiometric remotely-sensed images. International Journal of Remote Sensing, vol. 10, p. 1049-1073.

Roerink, G.J., M. Menenti and Z.S.U Soebboer (2003) Assessment of climate impact on vegetation dynamics by using remote sensing. Physics and Chemistry of the Earth, vol. 28, p. 103-109.

Ruelle, P., B. D. Salah et M. Vauclin (1986) Méthodologie d'analyse de la variabilité spatiale d'une parcelle agronomique. Application à l'échantillonnage. Agronomie, vol. 6, p. 529-539.

Serra, J. (1967) Un critère nouveau de découverte de structures: le variogramme. Science de la Terre, vol. 12, p. 275-299.

Strahler, A. H., C.E. Woodcock and J.A. Smith (1986) On the nature of models in remote sensing. Remote Sensing of Environment, vol. 20, p. 121-139.

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 (Congo), p. 55-93.

Tucker, J. C. (1979) Red and photographic infrared linear combinations for monitoring Vegetation. Remote Sensing of Environment, vol. 11, p. 149-157.

Tucker, J. C., C.L. Vanpraet, M. J. Sharman and G. Van Ittersum (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., J.A. Harringhton, S.D. Prince and I. Denda (1991) Satellite and ground-based pasture production assessment in Niger : 1986-1988. International Journal of Remote Sensing, vol. 12, n° 6, p. 1281-130.

Woodcock, C.E., A.H. Strahler and D.L.B. Jupp (1988) The use of variograms in remote sensing. II- Real digital images. Remote Sensing of Environment, vol. 25, p. 349-373.