

Contribution du sol dans la réflectance proche infrarouge de la forêt tropicale sur images SPOT

Robert Riou et Frédérique Seyler

C.R. Acad. Sci. Paris,
t. 320, série II a,
p. 1079 à 1086,
1995

ORSTOM, Maison
de la Télédétection,
500, rue J.-F. Breton,
34093 Montpellier Cedex 05,
France.

Résumé Cinq scènes SPOT situées sur les plateaux forestiers du Sud Cameroun entre 2 et 5° de latitude Nord, ont été utilisées pour étudier les variations de la luminance en fonction de la nature et de la densité du couvert forestier. Une analyse détaillée du canal proche infrarouge prenant en compte la géométrie d'acquisition, la date de prise de vue et les caractéristiques spatiales de la surface, met en évidence des variations de luminance qui ne peuvent s'expliquer que par des variations d'humidité de la surface du sol. Ainsi, la contribution du sol à la luminance totale enregistrée par le satellite SPOT sur une zone de forêt dense semble établie.

Mots-clés : Sol, Forêt tropicale, Proche infrarouge, Satellite SPOT, Texture d'image.

Abstract The effect of soil on rain forest canopy NIR reflectance on SPOT oblique imagery

Five SPOT scenes located within the South Cameroon forested plateaus between 2° and 5°N latitude, have been used to depict luminance variations related to forest type and canopy density. For the given acquisition geometry (high oblique angle), recording date (end of the rainy season) and surface spatial characteristics, it can be assessed that NIR luminance variations of the canopy record moisture variations of the soil surface. Therefore, soil contributes to the bidirectional reflectance of a rain forest canopy on SPOT images.

Keywords: Soil, Tropical rain forest, Near infrared, SPOT satellite, Image texture.

Abridged English Version INTRODUCTION

Increasing interest in tropical forest ecosystems has induced studies on the visible and near infrared response of the canopies (Rock *et al.*, 1994). Theoretical studies on bidirectional reflectance allow modelling of this response as a function of viewing incidence angle, solar zenithal angle and illumination direction (Deering *et al.*, 1994; Jackson *et al.*, 1990), vegetation geometry and water content (Li and Strahler, 1992). However, soil spatial variations and drainage pattern are rarely taken into account in the models. Large-scale field studies demonstrate the complexity of the relationships between soil and vegetation in tropical ecosystems (Lescure and Boulet,

1985). However, on a regional scale, AVHRR sensor data imply that in forested areas part of canopy reflectance could reflect the drainage pattern of soils (Levine *et al.*, 1993).

SPOT high incident-angle images have been used to show the variations of NIR luminance as a function of forest type, off-nadir angle and recording date. It is aimed at the evaluation of soils contribution to the spectral response of the forest.

MATERIALS AND METHODS

Recording data

Five SPOT scenes located within the South Cameroon forest between 2 and 5°N latitude have been analysed (figure 1 and

29 DEC. 1995

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

N° : 42921 ex 1

Cote : B

Note

présentée par
Georges Pédro.

remise le 31 janvier 1995,
acceptée après révision
le 13 mars 1995.

ORSTOM Documentation



010001009

1250-8050/95/03201079 • \$ 2.00 © Académie des Sciences

1079

table). These scenes are crossing the main vegetation types including, from North to South, savanna, semi-deciduous and evergreen forests.

RESULTS

Analysis of luminance variations

1. Variations related to recording geometry

Curves of figure 2 depict bidirectional reflectance of the vegetated area for a solar zenith angle of 35°, after data from Jackson *et al.* (1990). These curves outline the non-lambertian behaviour of the vegetation when ground incidence angle exceeds 20°. The shape of the curves is dependent on sun-leaves orientation and on mutual shadowing effects. However, this dependence is stronger for the red than for the NIR.

Comparison between East- and West-looking scenes shows that relative spatial variations of the canopy reflectance are not influenced by the sensor viewing direction. The West-viewing records enhance the NIR reflectance variations related to height contrasts between forest types and give the best contrast on homogeneous forested areas.

2. Variations related to vegetation

High luminance and coarse texture of the semi-deciduous forest are related to the thickness of the lower arborescent shrubs strata and to the density of the emergent trees (up to 100 per ha, corresponding to 4 trees per SPOT pixel) according to statistical studies by Letouzey (1968). Inversely, lower luminance and finer texture of the evergreen forest reflect the dominant contribution of the very dense middle canopy strata (height: 25-30 m) with more dispersed emergent trees. Very high luminance and coarser texture of secondary forests and agricultural lands are attributed to forest regrowth mainly controlled by *Musanga cecropioides*. Most of the swampy and flooded forests can be picked out from other solid ground forest types by a lower luminance.

3. Variations related to soil moisture or free water

Under forest, footpaths are in most cases undetectable on aerial photographs. On SPOT

green and red channels (XS1, XS2), their dry sections stand out from the surrounding forest by a high bidirectional reflectance. On the NIR channel (XS3) their detection is strongly dependent on the recording date. On the image of the end of the rainy season, their wet sections are well defined from adjacent forest by very low NIR reflectance values (figure 3 A and D). However, on the image recorded during the dry season, these paths cannot be distinguished from the forest (figure 3 B).

4. Variations within homogeneous forest

Homogeneous solid ground or flooded forest types display a fine, periodic, linear texture on the NIR channel. It consists of arrays of hectometric, low reflectance bands with a kilometeric extension and organized direction changes (figure 4 D). This texture is more contrasted in evergreen than in semi-deciduous forest. It is not visible in savanna and only partially detectable within secondary forest (figure 4 C). Texture sharpness is not dependent on the recording conditions of the image (incidence versus solar illumination direction). It is only locally visible on the image from the dry season.

INTERPRETATION AND DISCUSSION

Luminance values in visible and NIR have been used to detect physical changes on the ground hidden by more than 40 m of dense forest. This result casts doubt on the assessment that soil does not contribute to the total luminance of a dense forested area (Howard, 1991).

SPOT oblique viewing through canopy allows detection of footpaths by using high reflectance of tropical soils in the visible spectral range (XS1 and XS2) for their dry sections and strong absorption of NIR (XS3) by moisture for their swampy sections.

Soil moisture variability can also account for the fine, linear textural pattern recorded within homogeneous forest types. Direction changes frequently exceeding 10° on a kilometeric scale exclude interpretation of this linear texture as: (i) lineage of SPOT satellite, (ii) heliotropic behaviour of the vegetation or (iii) mosaic organization of the canopy.

Conditions for this texture to be preserved include the presence of a dense forest canopy

and the reduction of the lower vegetation strata. Indeed, the best textural records are found within swampy and dense evergreen moist forests.

Experimental studies on ferrallitic soil spectral characteristics versus moisture content (Bedidi *et al.*, 1992) suggest that differences of water content in microporosity of the soils could account for the reported NIR luminance variations.

CONCLUSION

Remote sensing in the optical domain is only rarely applied to tropical rain forest studies, due to the permanence of a cloudy cover. This study shows that the NIR *SPOT* channel records major information on the soils contribution to the bidirectional reflec-

tance of tropical rain forest. The main results are summarized as follows.

- Part of the solar energy transmitted through dense forest canopies can be reflected toward the sensor. In the NIR spectral domain, luminance variations of the canopy reflect differences in moisture content of the soil under forest. Thus, NIR differential absorption by ferrallitic soils accounts for the periodic linear textural pattern detected on different rain-forests.

- The soil's contribution to the total luminance is dependent on the presence of a dense canopy cover that preserves subsurface moisture variability and on the absence or reduction of lower shrubs and herbaceous strata.

These results give new perspectives for soil moisture characterization and mapping in tropical rain-forests.

INTRODUCTION

L'intérêt grandissant pour les écosystèmes forestiers et la nécessité de spatialiser leurs variations sont à l'origine d'études sur la réflectance de la voûte forestière dans le visible et l'infrarouge proche et moyen (Rock *et al.*, 1994). L'étude de la réflectance bidirectionnelle d'un seul arbre ou de couverts théoriques a permis de modéliser cette réponse en fonction des variations de l'angle d'incidence et de la direction d'illumination (Deering *et al.*, 1994; Jackson *et al.*, 1990; Ranson *et al.*, 1994), des caractéristiques géométriques de la végétation (Li et Strahler, 1992), et de la teneur en eau du couvert (Penuelas *et al.*, 1993). Cependant, peu d'études prennent en compte la globalité des paramètres tels que les variations du sol et du couvert forestier, le contrôle lithologique ou le drainage, et leur application à des images réelles de large extension spatiale, dans les zones couvertes de forêts tropicales (Caillon et Borzeix, 1992).

Les études de détail ont montré la complexité des relations qui existent entre le sol et la végétation dans les zones forestières tropicales, ainsi que la difficulté de modéliser les variations de la canopée à partir des caractères physico-chimiques du sol (Lescure et Boulet, 1985). Des études effectuées sur des

images AVHRR montrent l'existence de liens entre la réflectance de la canopée et le mode de drainage des sols à l'échelle régionale (Levine *et al.*, 1993). Les images *SPOT*, du fait de leur résolution à 20 m, de la bonne réponse de la végétation sur le canal proche-infrarouge (XS3), ainsi que par les possibilités de visée oblique qu'elles offrent, permettent d'étudier la réflectance bidirectionnelle de la canopée à une échelle compatible avec celle du modelé.

Ce travail présente les résultats d'une étude des variations de la luminance PIR (proche-infrarouge) de la forêt tropicale en fonction de la nature du couvert forestier, de l'angle d'incidence, et de la date de prise de vue. Le but est d'évaluer la participation du sol dans la réponse spectrale de la forêt.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Paramètres d'acquisition des scènes

Cinq scènes *SPOT* couvrant la forêt Sud Camerounaise entre 2° et 5° de latitude Nord ont été analysées (figure 1). Les paramètres d'acquisition des scènes, ainsi que les caractéristiques géologiques et les grands types de forêts de la zone étudiée sont résumés dans le tableau. Cette bande d'images *SPOT* traverse toute la zone forestière du

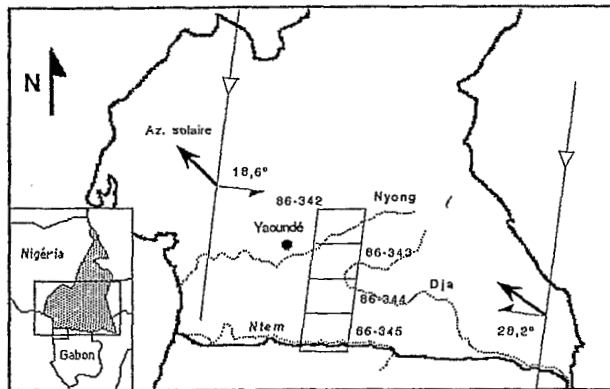


Figure 1

Figure 1 Localisation des scènes, numéros (J-K) et traces de SPOT sur les plateaux forestiers du Sud Cameroun.

Location of the scenes, (J-K) numbers and SPOT tracks on South Cameroon rain-forest plateaus.

Figure 2 Courbes de réflectance bidirectionnelle PIR-R (rouge) d'une canopée pour différents angles d'incidence au sol (exemples: 21°E et 32°O) et un angle zénithal solaire de 35° (S), d'après (Jackson *et al.*, 1990).

NIR-R (red) bidirectional reflectance curves of a canopy for different ground incidence angles (examples: E21° and W32°) and 35° solar zenith angle (S), after Jackson *et al.*, 1990.

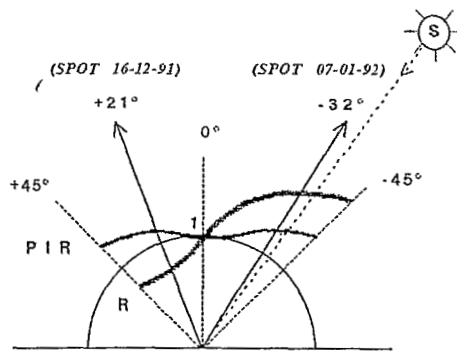


Figure 2

Sud Cameroun, depuis la zone de transition entre la savane et la forêt semi-décidue au Nord et la forêt sempervirente au Sud. Les sols sont en majorité ferrallitiques à horizon supérieur meuble rouge, dans toute la zone concernée. A l'exception de l'image d'Akonolinga prise en visée est, toutes les images ont été acquises en visée ouest avec un angle d'incidence élevé. Une comparaison entre une situation de fin de saison humide et une autre de fin de saison sèche a été possible pour l'image de Sangmélina (scène 86-344).

RÉSULTATS

Analyse des variations de luminance

1. Variations liées aux conditions de prise de vue

D'un point de vue théorique, la réflectance bidirectionnelle d'un couvert végétal est dépendante de la valeur de l'angle d'illumination solaire et de l'angle de prise de vue. Les courbes de réflectance pour le rouge et

le PIR (figure 2) ont été calculées pour un angle zénithal solaire de 35° (Jackson *et al.*, 1990), proche des conditions d'illumination des images étudiées (tableau). L'angle entre la direction d'illumination solaire et la direction de visée par le capteur varie, selon les scènes, de 4° pour les visées ouest à 53° pour les visées est. L'allure des courbes de réflectance traduit le comportement non lambertien de la végétation, quand l'incidence dépasse 20°.

Dans le cas d'un couvert uniforme de hauteur constante, la dissymétrie de ces courbes reflète l'influence des phénomènes d'ombrage. Cependant, dans les conditions d'enregistrement des scènes étudiées, cet effet est négligeable pour le PIR.

Dans le cas d'un couvert caractérisé par plusieurs strates de végétation, l'amplitude de la réponse dans le PIR est également fonction de la densité et du nombre de ces strates (Howard, 1991) : une forêt caractérisée par de grands arbres émergents dispersés aura une réponse plus faible et plus variable qu'une forêt dans laquelle les émergents sont jointifs.

(a) Effet de l'angle d'incidence

Dans les zones de recouvrement entre deux scènes acquises selon deux géométries opposées, on peut vérifier que la valeur de l'angle d'incidence n'a pas d'influence sur les variations relatives de la réflectance PIR.

Les conditions de prise de vue particulières aux scènes 86-343 à 345 sont celles d'une transmission et d'une réflexion maximum du PIR (figure 2). Dans les zones de forêt homogène, cela se traduit par une plus grande amplitude de la valeur de la réflectance et provoque une amélioration du contraste de l'image dans cette longueur d'onde. Par contre, en raison de l'incidence élevée, les phénomènes d'absorption par les couches denses de l'atmosphère rendent les canaux visibles (XS1 et XS2) inutilisables pour ces images.

(b) Effet de la géométrie de la surface

Compte tenu de l'incidence élevée de prise de vue, certaines variations de luminance peuvent être reliées à des facteurs mor-

phologiques ou géométriques. Tous les objets situés dans un plan perpendiculaire à la direction d'illumination solaire se caractérisent par des valeurs élevées de réflectance. C'est le cas pour les contacts entre des associations végétales de hauteurs différentes (ex : contact entre forêt galerie et savane ou entre forêt de terre ferme et raphiales, figure 3 D). Ces effets sont accentués dans le cas de la visée vers l'Ouest.

2. Variations liées à la végétation

Dans le domaine du visible et du PIR, les variations de luminance des couverts forestiers denses sont généralement interprétées en termes d'absorption, réflexion ou transmission au niveau des couronnes foliaires de la strate arborescente. Ces variations de la luminance sont généralement reliées à l'architecture de la canopée, à la forme de la cime et à la densité du feuillage des espèces émergentes (Sader *et al.*, 1989), ou à des caractéristiques foliaires comme le port des feuilles et leur orientation, ou leur structure interne (Li et Strahler, 1992; Abuelgasim et Strahler, 1994).

Sur les images étudiées, des caractéristiques texturales et spectrales permettent de distinguer les forêts denses humides de type semi-décidu et de type sempervirent, ainsi que certains peuplements monospécifiques de terre ferme ou de zone inondable.

– La forêt semi-décidue se caractérise par une texture grossière et une luminance élevée. Cette texture reflète une canopée dominée par la présence de grands arbres émergents régulièrement répartis avec une densité de 80 à 100 individus par hectare (Letouzey, 1968) et une strate arbustive très dense.

– La forêt sempervirente se distingue de la forêt semi-caducifoliée par une texture plus fine et une luminance plus basse. Dans ce type de forêt, la réponse spectrale est essentiellement assurée par la strate moyenne de la canopée (hauteur : 25-30 m) avec une contribution réduite des grands émergents, dont la densité est quatre fois plus faible que dans la forêt semi-décidue (Letouzey, 1968).

– Les forêts dégradées se distinguent des forêts primaires par une texture plus grossière

N° de scène SPOT	86-342	86-343	86-344	86-345	86-344
Région de :	Akonolinga	Bengbis	Sangmélima	Oveng	Sangmélima
Date d'acquisition	16/12/91	07/01/92			22/02/90
Période climatique	saison humide				saison sèche
Azimut de visée Angle de visée Angle d'incidence	N98,3° 18,6° Est 21°	N81,7° 28,2° Ouest 32,1°			N81,7° 21,6° Ouest 24,3°
Azimut solaire Angle zénithal	N147,7° 32,5°	N135,8° 36,7°	N135,2° 36,4°	N134,6° 36,1°	N116,2° 31,1°
Direction d'incidence / Dir. d'illumination	Opposée	Parallèle			
Géologie	Zone mobile Panafricaine Gneiss, micaschistes		Craton Archéen d'Afrique Centrale granite, gneiss		
Occupation du sol	Forêt dense humide Guinéo-Congolaise				
	Contact forêt / savane	semi-décidu	transition semi-décidu / sempervirent	sempervirent	transition semi-décidu / sempervirent

re et une luminance plus élevée (figures 3 A et 4 C). Une confrontation avec des photographies aériennes permet d'attribuer cette augmentation de luminance à l'abondance des recrues forestiers dominés par des espèces pionnières comme *Musanga cecropioides*.

– A l'intérieur de ces deux grands types de forêts, les variations de luminance permettent également de distinguer des peuplements caractéristiques des zones humides comme *Gilbertiodendron dewevrei*, ou marécageuses comme *Raphia sp.* (figures 3 et 4 A et B), *Uapaca paludosa* ou *Sterculia subviolacea*. (figure 4 C et D). Malgré des variations liées à l'architecture des branches ou au port des feuilles de certaines espèces d'arbres, les forêts marécageuses se caractérisent généralement par une luminance plus basse que celle des forêts de terre ferme.

3. Variations liées à l'humidité du sol ou à la présence d'eau libre

L'eau libre se traduit dans toutes les images par les valeurs de luminance les plus

Tableau Dates et paramètres d'acquisition des scènes étudiées.

Date and acquisition parameters for the studied scenes.

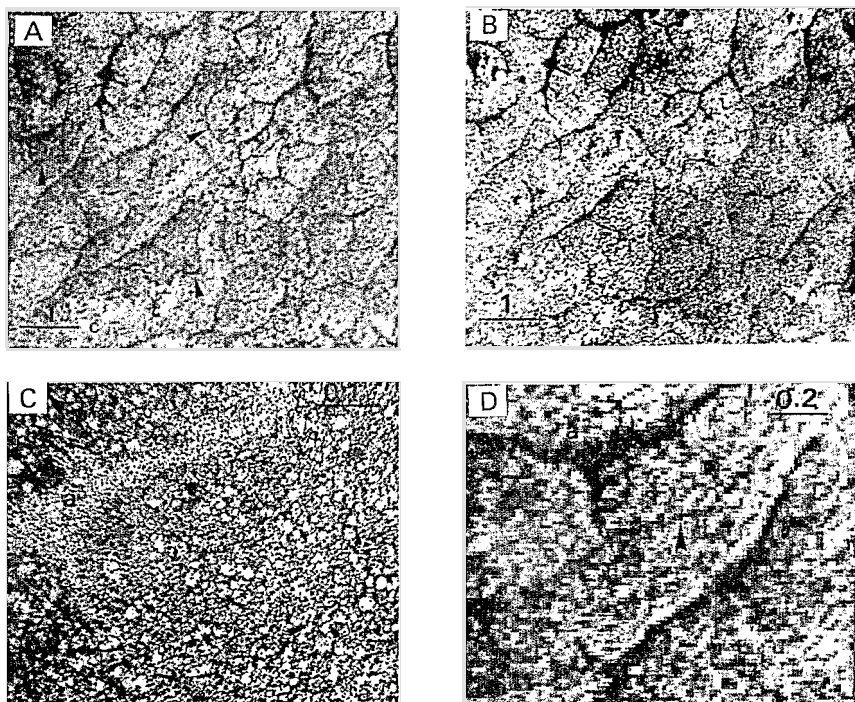


Figure 3 Comparaison de la photographie aérienne et des images SPOT de la zone de Mekok (scène 86-344, canal XS3, © CNES 1990 et 1992).

A et D: image du 07-01-92, B: image du 22-02-90, C: détail d'une photographie aérienne panchromatique (CAM-89029, L28, 191, 1/20 000). a: raphiales, b: forêt de terre ferme de type mixte, c: forêt dégradée. Les flèches (—>) indiquent les chemins (échelle graphique en kilomètres).

Comparison between aerial photograph and SPOT images (scene 86-344, XS3 channel, © CNES 1990 and 1992). A and D: image from 07-01-92, image from 22-02-90, C: detail from an aerial panchromatic photograph (CAM-89029, L28, 191, 1/20, 000). a: palm trees (*Raphia* sp.), b: mixed land forest, c: secondary forest. Arrows (—>) indicate footpaths (scale bar is in kilometres).

basses (par absorption du proche infrarouge). La valeur de la luminance est fonction de la largeur du cours d'eau: les valeurs les plus basses sont relevées dans les chenaux libres du Nyong et du Dja (de largeur supérieure à 60 m); des valeurs plus élevées sont trouvées, dès que le point élémentaire est mixte.

Sous couvert forestier continu, les pistes anciennes sont généralement indétectables sur les photographies aériennes (figure 3 C). Dans les zones bien drainées, ces pistes peuvent être facilement suivies sur les canaux visibles de SPOT par des valeurs élevées de luminance. Dans les zones mal drainées, ces pistes sont toujours invisibles sur les canaux XS1 et XS2 et n'apparaissent que temporairement sur le canal XS3. Elles sont nettement dessinées par des valeurs de basse luminance sur les images PIR de fin de saison humide (figure 3 A). En revanche, elles sont totalement invisibles sur les images PIR de fin de saison sèche (figure 3 B).

4. Variations observées dans des zones de forêt homogène

Toutes les zones de forêt homogène possèdent une texture fine et linéaire, constituée par une alternance de bandes sombres

et claires, discontinues, de largeur hectométrique, pouvant se suivre avec des changements de direction sur plusieurs kilomètres à l'intérieur de l'image (figure 4). Cette texture caractérise à la fois les peuplements forestiers de terre ferme et ceux des zones inondées ou marécageuses, avec une remarquable continuité dans l'orientation (N40-50° vers l'Est sur la figure 4 D). Elle est plus apparente dans la forêt sempervirente que dans la forêt semi-caducifoliée (figure 4 A et C). Elle est atténuée en forêt dégradée (figure 4 C) et n'apparaît pas dans les zones de savane. Sa reconnaissance est beaucoup plus difficile sur les images de fin de saison sèche, car elle n'est perceptible que par endroit dans les zones mal drainées (figure 3 A et B).

La comparaison des différentes scènes montre que l'amplitude des variations qui caractérisent cette texture augmente avec l'angle d'incidence, mais n'est pas influencée par la direction de visée, vers l'Est ou vers l'Ouest, du capteur.

INTERPRÉTATIONS ET DISCUSSION

Le repérage d'objets situés au niveau du sol sous une voûte forestière de plus de 40 m de hauteur, à partir des valeurs de luminance dans le visible et le PIR, remet en cause l'hypothèse selon laquelle le sol ne contribuerait pas à la luminance totale d'un couvert forestier dense (Howard, 1991).

L'observation des chemins forestiers anciens sur des images SPOT en visée oblique implique que la lumière incidente soit transmise à travers la voûte supérieure et que le sol participe efficacement à la luminance totale dans les domaines du visible et du proche-infrarouge. Les portions sèches de ces chemins, constituées de sol nu, réfléchissent fortement dans le rouge et sont visibles sur le canal XS2. Au contraire, les zones humides ou inondées sont très clairement visibles sur le canal XS3, par le fait qu'elles absorbent l'infrarouge beaucoup plus que la végétation des alentours. La disparition de ces zones de basse luminance sur le canal XS3 de l'image prise en saison sèche montre que ce sont bien des variations

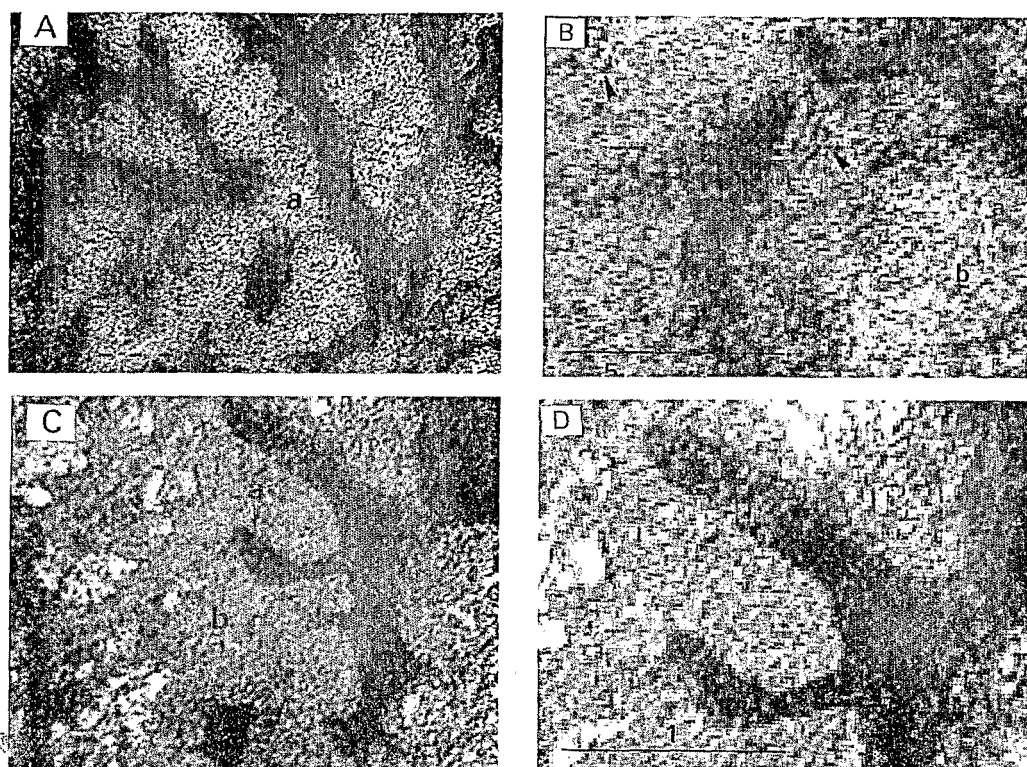


Figure 4 Textures orientées dans des forêts denses (SPOT XS3, id. à la figure 3).

A et B: scène 86-345 du 07-01-92 ; Sud d'Oveng. (a) raphiales, (b) forêt sempervirente. C et D: scène 86-342 du 16-12-91; N-E d'Ayos. (a) forêt inondée à *Sterculia subviolacea*, (b) forêt semi-caducifoliée, (c) forêt dégradée à *Musanga cecropioides* (échelle graphique en kilomètres).

Linear textured pattern in rain-forest (SPOT XS3, id. to figure 3).

A and B: scene 86-345 from 07-01-92; South of Oveng. (a) raphia swamp forest, (b) moist evergreen forest. C and D: scene 86-342 from 16-12-91; N-E of Ayos. (a) flooded swamp forest with *Sterculia subviolacea*, (b) moist semi-deciduous forest, (c) secondary forest with *Musanga cecropioides*.

d'humidité au niveau du sol qui sont enregistrées sur l'image de fin de saison humide.

La texture orientée observée dans tous les groupements forestiers homogènes sur le canal XS3 de l'image de saison humide peut également être interprétée de la même façon. En effet, ces alignements réguliers de zones de basse réflectance ne correspondent pas avec les directions de lignage connues du satellite SPOT. De plus, des variations d'orientation pouvant atteindre plusieurs dizaines de degrés à l'intérieur d'une même image, indépendamment de l'angle d'incidence et de la direction de visée, ne sont pas non plus compatibles avec un comportement héliotrope ou une organisation en maille géométrique du couvert végétal. Le contrôle de la luminance PIR du couvert forestier par des variations dans l'état d'humectation de la surface du sol est la seule interprétation qui tienne compte de l'ensemble des caractères observés.

Dans les zones de forêt des plateaux du Sud Cameroun, la contribution du sol à la luminance totale est dépendante de la présence d'un couvert forestier. En effet, cette

texture ne s'observe jamais dans les savanes herbeuses à *Imperata cylindrica*, alors qu'elle est nette dans les forêts galeries qui bordent ces savanes. Les différences dans l'amplitude des variations de luminance peuvent être reliées à des différences dans l'architecture de la canopée et à la présence de sous-strates denses dans certains types de forêts (forêt dense humide semi-décidue), qui limitent la contribution du sol à la luminance totale.

Les études expérimentales sur les caractéristiques spectrales des sols ferrallitiques en fonction de l'humidité montrent que la réflectance diffuse diminue brutalement entre l'état sec et l'état humide, pour des valeurs de pF supérieures à 4,2 (Bedidi *et al.*, 1992). Les variations nettes et relativement importantes de la luminance PIR qui caractérisent la texture des scènes étudiées pourraient donc traduire la présence ou l'absence d'eau dans la microporosité du sol en surface. Cependant, la non linéarité de la réflectance en fonction de l'augmentation de l'humidité pour un sol riche en hydroxydes de fer (Bedidi *et al.*, 1992) interdit toute estimation de la teneur en eau du

sol à partir de la valeur de la luminance infrarouge.

CONCLUSION

La télédétection dans le domaine optique est peu utilisée dans les études sur la forêt tropicale, à cause de la couverture nuageuse quasi permanente. La visée oblique permet d'augmenter les chances d'acquisition de scènes sans nuages, mais s'accompagne d'une dégradation de la qualité spectrale des canaux visibles. Ces images sont donc la plupart du temps négligées. Le canal infrarouge, utilisé seul, contient des informations fondamentales sur la réflectance bidirectionnelle des couverts forestiers tropicaux. Les principaux résultats de cette étude peuvent être résumés par les points suivants.

– Une partie du rayonnement solaire diffusée à travers un couvert forestier continu

est réfléchi par le sol et peut être enregistrée sur une image satellite. Dans le proche infrarouge, les variations observées dans les secteurs forestiers homogènes reflètent essentiellement des variations de l'état d'humectation du sol par effet d'absorption différentielle dans ce domaine spectral. Ces variations entre un état sec et un état humide se traduisent par une texture orientée qui a été reconnue dans tous les types de forêts.

– La condition d'observation de cette texture est la présence d'un couvert forestier continu qui préserve les variations d'humectation de la surface du sol. La netteté de la texture dépend de la densité des sous-strates herbacée et arbustive qui ont pour effet de diminuer la part du sol dans la luminance totale.

Les résultats obtenus dans cette étude ouvrent de nouvelles perspectives pour le suivi et la cartographie de l'humidité de surface du sol.

Remerciements : Les images SPOT utilisées dans cette étude ont été acquises dans le cadre du projet « Caractérisation des sols des plateaux forestiers du Sud Cameroun », recherche conjointe de l'ORSTOM (L'Institut de Recherches Scientifiques pour le Développement en Coopération) et l'IRGM (L'Institut de Recherches Géologiques et Minières du Cameroun). Les auteurs remercient B. Cervelle pour ses remarques sur la première version de cette note.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABUELGASIM, A. A., et STRAHLER, A. H., 1994. Modeling bi-directional radiance measurements collected by the Advanced Solid-State Array Spectroradiometer (ASAS) over Oregon transect conifer forests, *Remote Sens. Environ.* 47, p. 261-275.
- BEDIDI, A., CERVELLE, B., MADEIRA, J. et POUGET M., 1992. Moisture effects on visible spectral characteristics of lateritic soils, *Soil Science*, 153, 2, p. 129-141.
- CAILLON, L. et BORZEIX, J., 1992. Reconnaissance à partir des données de SPOT 1 de linéaments géologiques sous couvert végétal dense. Exemple d'application sur des îles volcaniques tropicales, *Photointerprétation*, 1991/92, 5-6, p. 233-244.
- DEERING, D. W., MIDDELTON, E. M. et ECK, T. F., 1994. Reflectance anisotropy for spruce-hemlock forest canopy, *Remote Sens. Environ.*, 47, p. 242-260.
- HOWARD, J. A., 1991. *Remote sensing of forest resources*, Chapman et Hall, New York, 420 p.
- JACKSON, R.D., TEILLET, P. M., SLATER, P. N., FEDOSEJEVS, G., JASINSKI, M. F., HAASE, J.K. et MORAN, M. S., 1990. Bidirectional measurements of surface reflectance for view angle corrections of oblique imagery, *Remote Sens. Environ.*, 32, p. 189-202.
- LESCURE, J. P. et BOULET, R., 1985. Relationships between soil and vegetation in a tropical rain forest in French Guiana, *Biotropica*, 17, 2, p. 155-164.
- LETOUZEY, R., 1968. *Etude phytogéographique du Cameroun*, Le Chevallier, Paris, 508 p.
- LEVINE, E. R., RANSON, K. J. et SMITH, J. A., 1993. Forest ecosystem dynamics: linking forest succession, soil process and radiation models, *Ecol. Model.*, 65, p. 199-219.
- LI, X. et STRAHLER, A. H., 1992. Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of the discrete crown vegetation canopy: Effect of crown shape and mutual shadowing, *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing*, 30, n°2, p. 276-292.
- ROCK, B. N., WILLIAMS, D. L., MOSS, D. M., LAUTEN, G. N. et KIM, M., 1994. High spectral resolution field and laboratory reflectance measurements of red spruce and eastern hemlock needles and branches, *Remote Sens. Environ.*, 47, p. 176-189.
- SADER, S. A., WAIDE, R. B., LAWRENCE, W. T. et JOYCE, A. T., 1989. Tropical forest biomass and successional age class relationships to a vegetation index derived from Landsat TM data, *Remote Sens. Environ.*, 28, p. 143-146.