Télédétection, 2000, Vol. 1, pp. 157-181
Des tirés à part sont disponibles auprès de l'éditeur
Droit de photocopie soumis à autorisation

© 2000 OPA (Overseas Publishers Association) N.V.
Publié sous licence par
Gordon and Breach Science Publishers
Imprimé en Malaisie

Impact des conditions internes et externes aux couverts forestiers sur les indices spectraux dérivés de simulations spectrales de AVHRR

ABDERRAZAK BANNARI[a*], PHILIPPE TEILLET[b], DONALD LECKIE[c†] et GUNAR FEDOSEJEVS[b]

[a]Laboratoire de télédétection et de géomatique, Département de géographie, Université d'Ottawa, C.P. 450, Succ. A, Ottawa (Ontario) K1N 6N5,
[b]Centre canadien de télédétection, 588, rue Booth, Ottawa (Ontario) K1A 0Y7 et
[c]Canadian Forestry Service, the Pacific Forestry Centre 506 West Burnside Road, Victoria (B.-C) V8Z 1M5

(soumis le 10 décembre 1998 ; révisé le 27 avril 1999 ; accepté le 02 août 1999)

Cette étude porte sur l'analyse de l'impact de la variabilité des conditions internes et externes aux couverts forestiers sur les indices spectraux dérivés des données simulées AVHRR. Seuls les indices conçus pour minimiser les effets perturbateurs et mieux rehausser le signal issu de la végétation ont été retenus. À cette fin, des mesures spectroradiométriques de sols nus de propriétés optiques différentes et d'un couvert forestier à différents degrés de défoliation ont été exploitées. Globalement, les indices considérés montrent des forces et des faiblesses contradictoires et aucun parmi eux ne satisfait les exigences de l'indice optimal pour le milieu forestier : si un indice se montre résistant à un effet, il devient sensible aux autres effets et vice-versa. Par contre, si les données sont adéquatement corrigées des effets atmosphériques, le MSAVI peut être l'indice optimal pour la description des paramètres biophysiques en milieu forestier. Bien qu'il ne soit pas linéaire, il se caractérise par un bon potentiel pour minimiser les effets des propriétés spectrales des sols nus, et il ne sature pas au moment de la présence d'un couvert très dense, ce qui permettra la distinction entre les différents taux de couverture et la détection des différents changements temporels qui peuvent avoir lieu.

Mots-clés: indice de végétation; milieu forestier; sols nus; atmosphère; AVHRR

* Correspondance auteur. Tél. (613) 562–5800 poste 1042, télécopieur : (613) 562–5145, C.E : abannari@uottawa.ca
† Tél. (613) 947–1251, télécopieur : (613) 947-, 1383 C.E. : phil.teillet@ccrs.nrcan.gc.ca

This study addresses the analysis of the impact of variation of conditions intrinsic and extrinsic to forest canopies on spectral indices derived from simulated AVHRR data. Only the indices designed to minimize disturbing effects and to increase the signal emitted by vegetation were considered. To this end, spectroradiometric measurements of bare soils with various optical properties and a forest canopy at various degrees of defoliation were used. As a whole, the indices considered show conflicting strengths and weaknesses and none of them meet the requirements of an optimal index for a forest environment : if one index is resistant to one effect, it becomes sensitive to the other effects and vice versa. However, if data are adequately corrected for atmospheric effects, MSAVI may be the optimal index for the description of biophysical parameters in a forest environment. While being non-linear, it shows a good potential for minimizing the effects of the spectral properties of bare soils and it does not saturate in the presence of a very dense canopy, which allows differentiation between the various stand density levels and the various phenological changes that can occur.

Keywords: vegetation indices; forest environment; bare soils; atmosphere; AVHRR

1. INTRODUCTION

En plus de leur importance économique, les couverts forestiers jouent un rôle important sur le plan de l'équilibre climatique et constituent une source importante de carbone organique de la biosphère terrestre (Tans *et al.*, 1990). Compte tenu de ces facteurs majeurs, les écosystèmes forestiers occupent une position centrale dans les programmes de changements à l'échelle du globe. D'ailleurs, le Sommet de la Terre des Nations-Unies tenu à Rio de Janeiro, au Brésil, en 1992, a montré la multiplicité des avantages et des fonctions des écosystèmes forestiers afin de sensibiliser la communauté internationale sur les enjeux qui les menacent (RNCSCF, 1996). Afin de progresser dans la compréhension du fonctionnement des différents écosystèmes forestiers à long terme, des observations complètes et globales sur une série de paramètres biophysiques doivent être recueillies, archivées et analysées. En raison de l'échelle des investigations nécessaires pour accéder à des territoires immenses, les données de télédétection sont devenues la principale source d'information pour la gestion et la cartographie des couverts forestiers (Ustin *et al.*, 1997). Actuellement, les données AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) de NOAA couvrant la totalité de la planète sur une base hebdomadaire constituent avec l'instrument VÉGÉTATION de SPOT-4 (lancé en mai 1998) les seuls moyens d'observation globale, répétitive et continue.

Par ailleurs, les indices spectraux dérivés des données de télédétection sont des modèles empiriques simples développés pour rehausser le signal issu

des couverts végétaux. Ils montrent une meilleure sensibilité que les bandes spectrales individuelles pour la détection de la biomasse. Ils permettent de mener des études à différentes échelles de temps et d'espace pour localiser les changements les plus importants dans le milieu forestier, tels que : le suivi de la croissance et de la productivité, l'évaluation des dommages causés par les feux, les maladies, les épidémies d'insectes, etc. Différents travaux ont montré l'utilité et l'intérêt des indices spectraux pour l'étude de l'évolution des couverts forestiers (Huete *et al.*, 1996, 1997; Kasischke and French, 1997; Royer *et al.*, 1997; Teillet *et al.*, 1997; Illera *et al.*, 1996; Chen, 1996). Toutefois, dans la littérature, plusieurs indices ont été développés pour différentes applications et dans des conditions bien particulières (Bannari *et al.*, 1995). L'utilisation de l'un ou de l'autre des indices pour caractériser les couverts forestiers peut être limitée par différents facteurs perturbateurs d'ordre physique qui dominent le signal au capteur (Bannari, 1996; Bannari et al., 1999). Par exemple, les réflectances spectrales dans le visible et le proche infrarouge varient d'une place à l'autre, selon le type de sol, sa couleur, sa brillance, sa rugosité et son humidité qui change temporellement (Huete, 1984, 1987; Guyot *et al.*, 1989; Baret *et al.*, 1993; Bannari *et al.*, 1996). Ainsi, la réflectance du sol est gouvernée par la composition chimique et des conditions expérimentales (Huete, 1989). Ces facteurs entraînent un accroissement ou une diminution des réflectances dans le rouge et le proche infrarouge et, par conséquent, ils engendrent des limitations assez sévères pour la détection des couverts végétaux à l'aide des indices spectraux. Bien entendu, dans le contexte forestier, les sols presque nus sont bien exposés au rayonnement solaire lorsque l'état phénologique du couvert est peu avancé, ou lorsque le couvert est épars et moyennement dense (figure 1), ou lorsque le degré de défoliation est plus ou moins fort. Alors que pour les couverts denses, le vent peut découvrir une portion plus ou moins importante des tiges et des sols nus sous-jacents en agitant les arbres ou en les couchant.

Par ailleurs, les conditions atmosphériques changent d'une image à l'autre et au cours des mesures *in situ* en perturbant le signal issu du couvert : pour la végétation le signal augmente dans le visible à cause de la diffusion par les aérosols et les molécules, alors qu'il diminue dans l'infrarouge à cause de l'absorption par la vapeur d'eau (Kaufman, 1988). Ces variations jouent un rôle crucial dans l'interprétation des valeurs des indices spectraux. Toutefois, si nous interposons l'atmosphère et si nous tenons compte à la fois des effets des sols nus et des effets atmosphériques, la

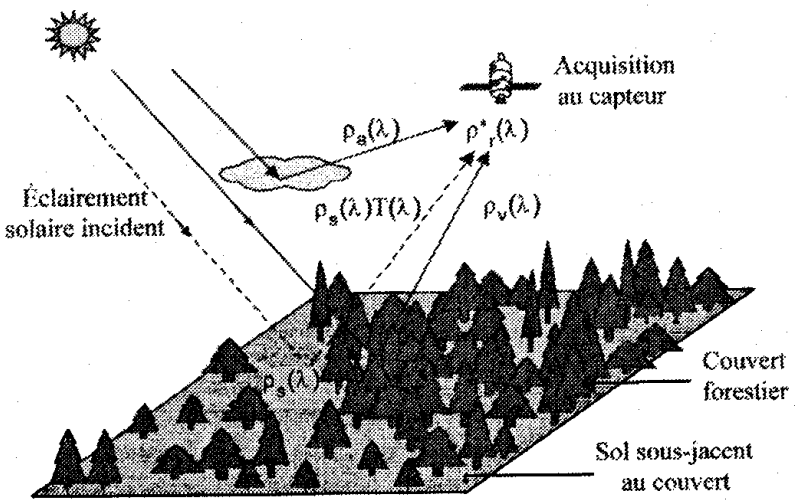


FIGURE 1 Géométrie du signal à travers le couvert / Signal geometry through the cover (voir photo couleur I à la fin de cette revue)

réflectance apparente mesurée au-dessus d'un couvert forestier au capteur $[\rho^*_r(\lambda)]$ s'exprime comme suit:

$$\rho^*_r(\lambda) = \bar{t}g(\lambda)\,\{\rho_a(\lambda) + T_{atm}(\lambda)\,[\rho_s(\lambda)T(\lambda) + \rho_v(\lambda)]\,\} \qquad \text{(éq. 1)}$$

où

$\rho^*_r(\lambda)$: la réflectance apparente mesurée au capteur,

$\rho_a(\lambda)$: la réflectance intrinsèque à l'atmosphère,

$T_{atm}(\lambda)$: la transmission atmosphérique totale (descendante et ascendante),

$\bar{t}g(\lambda)$: la transmission gazeuse moyenne,

$\rho_s(\lambda)$: la réflectance intrinsèque au sol nu sous-jacent au couvert,

$\rho_v(\lambda)$: la réflectance intrinsèque au couvert forestier,

$T(\lambda)$: la transmittance totale à travers le couvert.

Afin de relier les indices spectraux aux paramètres biophysiques (biomasse, taux de recouvrement, etc.) et d'interpréter quantitativement les résultats expérimentaux acquis sur la végétation forestière, il faut une bonne compréhension de l'impact de la variation du signal causée par les effets atmosphériques et les propriétés optiques des sols sous-jacents au couvert. Ces problèmes ont été attentivement analysés dans différentes études (Huete, 1988. 1989; Baret *et al.*, 1989; Myneni and Asrar, 1994; Qi *et al.*, 1994a; Teillet, 1994), mais en considérant seulement un ou deux indices. Toutefois, des nouveaux indices ont été développés ce qui néces-

site une étude comparative entre eux afin de faire une mise au point sur l'indice optimal. Dans cette étude, nous analysons l'influence de la variabilité des conditions internes (couleur, brillance, humidité et rugosité des sols sous-jacents) et externes (absorption et diffusion atmosphériques) aux couverts forestiers sur les indices spectraux dérivés des données simulées AVHRR. Seuls les indices conçus dans le but de minimiser les effets perturbateurs et de mieux rehausser le signal issu de la végétation ont été retenus. Nous avons exploité des mesures spectroradiométriques de sols nus ayant des propriétés optiques différentes et celles d'un couvert forestier à différents degrés de défoliation cumulative. Les mesures ont été rééchantillonnées dans les bandes spectrales, visible et proche infrarouge, du capteur AVHRR de NOAA-11. Le modèle de transfert radiatif 5S a été utilisé pour analyser la sensibilité des indices aux variations d'absorption par la vapeur d'eau (0,5, 2, 4 et 6 gcm^{-2}) et à la diffusion par les aérosols (visibilité égale à 5, 10 et 25 km) et par les molécules.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODE

2.1. Site d'étude et données spectrales

Le site d'étude est une région forestière de l'île du Cap Breton, Nouvelle-Écosse (46° 07′ N, 60° 50′ O). C'est une zone expérimentale utilisée depuis 1976 pour la mise au point de techniques de télédétection servant à évaluer la défoliation due à la tordeuse des bourgeons d'épinette. Le site se compose principalement d'une sapinière à sapin blanc à différentes densités et degrés de défoliation cumulative et à différents stades de maturité. Dans cette étude nous avons utilisé des spectres mesurés, au nadir, au-dessus des arbres à différents degrés de défoliation cumulative (0, 30, 50, 75 et 100 %) (figure 2). L'âge des arbres considérés varie de 30 à 35 ans, la hauteur de 6 à 8 m, et le diamètre de la couronne varie de 2 à 3 m. Les spectres ont été mesurés en septembre, moment où la végétation herbacée sous-jacente au couvert forestier est en phase de sénescence. Ainsi, toute végétation photo-synthétiquement active a été enlevée au-dessous des arbres mesurés. Teillet *et al.* (1985) et Leckie *et al.* (1988) donnent plus d'informations sur le site d'étude, les données spectrales et les conditions expérimentales. En outre, nous avons exploité les spectres de 15 sols nus mesurés, au nadir, au-dessus de différents types de sols (argile et sable fin

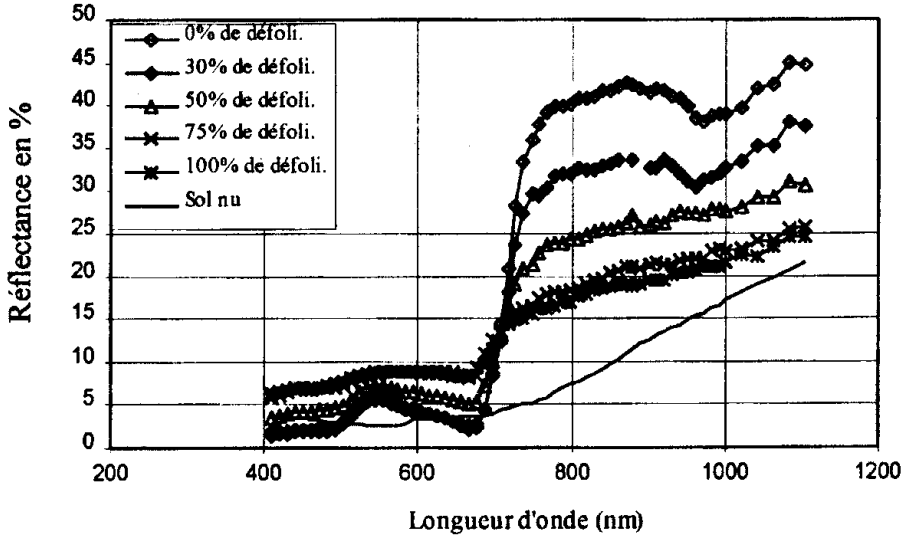


FIGURE 2 Spectres du couvert forestier à sapin blanc à différents degrés de défoliation cumulative / Spectral reflectance of balsam fir canopy at various degrees of cumulative defoliation

de silice) à différents degrés d'humidité (humide, moyennement humide et sec) et de rugosité (rugueux, moyennement rugueux et lisse) (figure 3). Les caractéristiques et les conditions de surface des 15 sols utilisés sont résumées sur le tableau I. Pour plus de détails sur ces sols et sur les conditions expérimentales, le lecteur peut consulter Baret *et al.* (1993). Finalement, toutes les mesures ont été intégrées dans les bandes spectrales du visible et du proche infrarouge du capteur AVHRR de NOAA-11.

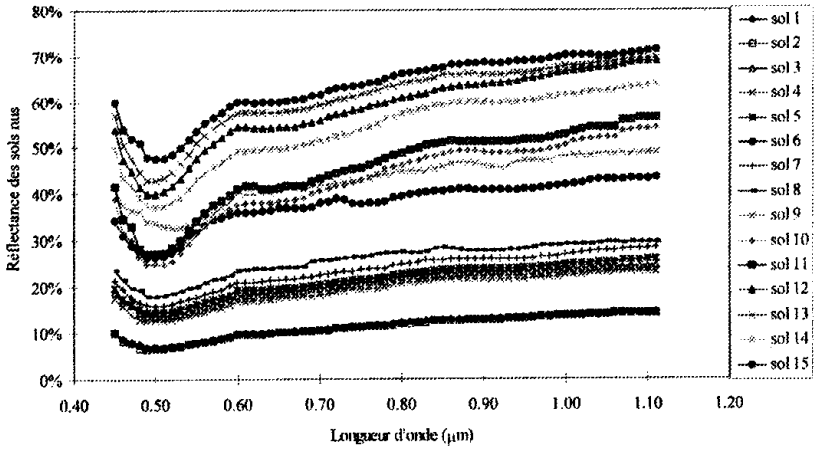


FIGURE 3 Spectres des échantillons de sols nus étudiés (identifiés sur le tableau I) / Spectral reflectance of bare soils samples (identify on table I) (voir photo couleur II à la fin de cette revue)

TABLEAU I Description des 15 échantillons de sols nus étudiés / Description of 15 bare soils samples

Sol no	*Type du sol*	*Conditions de surfaces*	
		Humidité	*Rugosité*
1	Argile	Humide	Rugueux
2			Moyenne
3			Lisse
4		Moyenne	Rugueux
5			Moyenne
6			Lisse
7		Sec	Rugueux
8			Moyenne
9			Lisse
10	Sable fine de silice	Humide	Rugueux
11			Lisse
12		Moyenne	Rugueux
13			Lisse
14		Sec	Rugueux
15			Lisse

2.2. Indices spectraux

Le *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) développé par Rouse *et al.* (1974) est l'indice le plus populaire et le plus utilisé dans diverses applications de la télédétection. Cet indice a fait l'objet de plusieurs transformations pour minimiser les effets des sols sous-jacents au couvert et les effets atmosphériques. En considérant les paramètres de la droite des sols nus, pente et origine, Richardson et Wiegand (1977) ont développé le PVI (*Perpendicular Vegetation Index*). Toutefois, Huete (1988) a démontré qu'il existait une certaine contradiction dans la façon dont les indices, NDVI et PVI, décrivent le comportement spectral de la végétation et du sol nu. Par conséquent, il a développé le SAVI *(Soil Adjusted Vegetation Index*) qui est un compromis entre les indices de type rapport (NDVI) et les indices de type orthogonal (PVI). L'originalité de cette transformation réside au niveau de l'établissement d'un modèle simple qui permet de décrire adéquatement le système sol-végétation. Afin de réduire l'effet de

la couleur et la brillance des sols sur le SAVI, Baret *et al.* (1989) ont proposé une nouvelle version de celui-ci qui considère les paramètres de la droite des sols nus, le TSAVI (*Transformed Soil Adjusted Vegetation Index*). Le but de cette transformation est de donner au TSAVI un caractère de globalité, autrement dit l'utilisation d'un seul indice dans différentes applications au lieu d'un indice spécifique à chaque application. Pour améliorer la sensibilité du SAVI à la présence de la végétation et augmenter son potentiel pour discriminer les sols nus, Qi *et al.* (1994b) ont proposé une version modifiée de l'indice, MSAVI (*Modified Soil Adjusted Vegetation Index*). Rondeaux *et al.* (1996) ont adapté le TSAVI spécialement pour les applications agricoles dans une nouvelle version nommée le OSAVI (*Optimized Soil Adjusted Vegetation Index*). Le OSAVI n'est qu'un cas particulier du TSAVI lorsque la pente (a) et l'origine (b) de la droite des sols sont égales à 1 et 0, respectivement. Développé spécialement pour le capteur AVHRR en exploitant uniquement les réflectances apparentes, le GEMI (*Global Environment Monitoring Index*) est un indice non linéaire qui a pour but une gestion globale des couverts végétaux en minimisant à la fois les effets des sols et les effets atmosphériques (Pinty and Verstraete, 1992). Précisons qu'aussi bien pour les sols nus que pour les couverts forestiers utilisés dans cette étude, le GEMI a été calculé à partir des réfiectances apparentes simulées à l'aide du modèle 5S pour une visibilité atmosphérique de 25 km, un modèle d'aérosols *continental* et un modèle atmosphérique *midlatitude summer*. Le RDVI (*Renormalized Difference Vegetation Index*) est une simple renormalisation du NDVI afin d'établir une relation linéaire avec les paramètres biophysiques de surface (Roujean and Breon, 1995). Quant au MSR (*Modified Simple Ratio*), c'est une version améliorée du RDVI pour l'extraction des paramètres biophysiques de la forêt boréale (Chen, 1996).

$$NDVI = \frac{(\rho_{PIR} - \rho_R)}{(\rho_{PIR} + \rho_R)} \qquad \text{(éq. 2)}$$

$$PVI = \frac{(\rho_{PIR} - a\rho_R - b)}{\sqrt{a^2 + 1}} \qquad \text{(éq. 3)}$$

$$SAVI = (1,5)\frac{(\rho_{PIR} - \rho_R)}{(\rho_{PIR} + \rho_R + 0,5)} \qquad \text{(éq. 4)}$$

$$MSAVI = \frac{[2\,\rho_{PIR} + 1 - \sqrt{(2\rho_{PIR} + 1)^2 - 8(\rho_{PIR} - \rho_R)}\,]}{2} \qquad \text{(éq. 5)}$$

$$TSAVI = \frac{[a(\rho_{PIR} - a\rho_R - b)]}{[\rho_R + a\ \rho_{PIR} - ab + 0,08\ (1 + a^2)]} \qquad \text{(éq. 6)}$$

$$OSAVI = \frac{(\rho_{PIR} - \rho_R)}{(\rho_R + \rho_{PIR} + 0,16)} \qquad \text{(éq. 7)}$$

$$RDVI = \frac{(\rho_{PIR} - \rho_R)}{\sqrt{\rho_{PIR} + \rho_R}} \qquad \text{(éq. 8)}$$

$$MSR = \frac{(\rho_{PIR}/\rho_R - 1)}{\sqrt{\rho_{PIR}/\rho_R + 1}} \qquad \text{(éq. 9)}$$

$$GEMI = \eta(1 - 0,25\,\eta) - \frac{(\rho_R^* - 0,125)}{(1 - \rho_R^*)} \qquad \text{(éq. 10)}$$

avec

$$\eta = \frac{[2\,(\rho_{PIR}^{*2} - \rho_R^{*2}) + 1,5\,\rho_{PIR}^* + 0,5\,\rho_R^*]}{(\rho_{PIR}^* + \rho_R^* + 0,5)}$$

où

ρ_R : réflectance au sol dans le canal rouge,

ρ_{PIR} : réflectance au sol dans le canal proche infrarouge,

ρ^*_R : réflectance apparente dans le canal rouge,

ρ^*_{PIR} : réflectance apparente dans le canal proche infrarouge,

a et b : pente et ordonnée à l'origine de la droite des sols nus.

2.3. Conditions de simulations atmosphériques

Le modèle de transfert radiatif 5S (Tanré *et al.*, 1990) dans une version améliorée par Teillet et Santer (1991) pour, entre autres, tenir compte de l'altitude de surface du sol et de l'altitude du capteur a été utilisé. Sur le tableau II, on résume les conditions de simulations considérées dans cette étude. Les bandes spectrales 1 (0,540–0,805 µm) et 2 (0,600–1,100 µm) du capteur AVHRR de NOAA-11 ont été sélectionnées. Sur la figure 4, on illustre la réponse spectrale propre à chacune des bandes. Nous avons fixé l'angle zénithal d'observation au nadir, alors que celui d'éclairement est égal à 45° avec un angle azimutal relatif de 30°. Le modèle atmosphérique *midlatitude summer* et le modèle d'aérosols *continental* dont la concentration des aérosols est exprimée en visibilité horizontale ont été retenus. Les visibilités considérées sont égales à 5, 10 et 25 km, ainsi qu'une atmos-

phère sans aérosols. En fixant la visibilité à 25 km, nous avons varié la concentration de la vapeur d'eau de 0,5; 3,0 et 6,0 gcm^{-2}. En outre, pour les conditions de surface, nous avons considéré un sol dépourvu de végétation et un couvert forestier de sapins blancs à différents degrés de défoliation cumulative : 0, 30, 50, 75 et 100 %. Nous avons cherché à mettre en évidence uniquement les effets de diffusion et d'absorption atmosphériques, en admettant que tous les autres effets sont nuls.

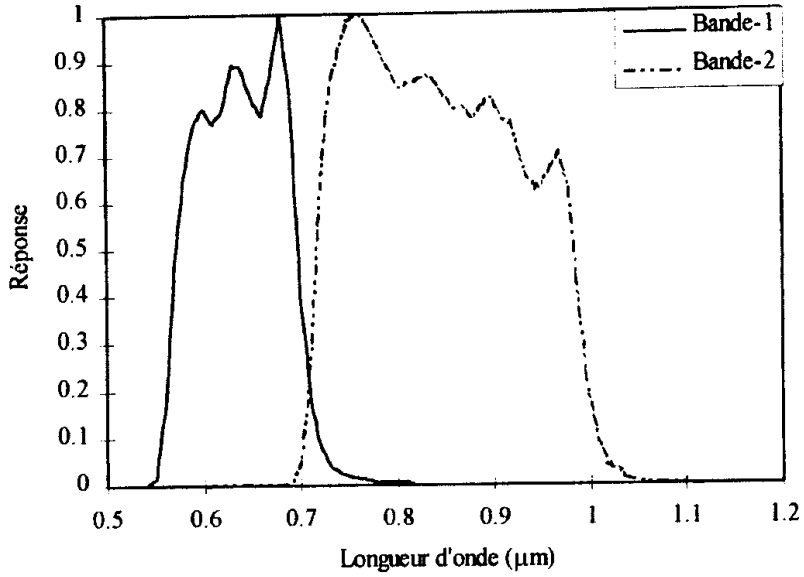


FIGURE 4 Réponse spectrale (profil) typique des bandes 1 et 2 du capteur AVHRR de NOAA-11 / AVHRR spectral response profiles for band 1 and band 2

3. ANALYSE DES RÉSULTATS

L'utilisation des données mesurées au sol dans des conditions connues et bien contrôlées permet une analyse comparative du potentiel de chacun des indices pour minimiser les effets perturbateurs, surtout lorsque l'instrument de mesure est bien étalonné, le signal ne traverse pas l'atmosphère dans son trajet retour, et l'effet de l'environnement est négligeable. Dans ces conditions, qu'il soit linéaire ou non, un indice de végétation sera d'autant plus performant pour la description des couverts forestiers lorsque celui-ci maximise le signal issu de la végétation et minimise les effets perturbateurs liés aux conditions des sols et aux variations atmosphériques.

TABLEAU II Conditions de simulations des effets atmosphériques (absorption et diffusion) / Simulation conditions of the atmospheric effects (absorption and scattering)

Données d'entrées au modèle de transfert radiatif 5S	
Élévation du terrain	0,5 km
Angle zénithal solaire	45°
Angle zénithal d'observation	0°
Angle azimuthal relatif	30°
Modèle atmosphérique	Mid-latitude summer
Modèle des aérosols	Continental
Conditions atmosphériques	i) v = 25 km
	ii) v = 10 km
	iii) v = 5 km
	iv) Rayleigh
	v) $UH_2O = 0,5$ g.cm^{-2}
	vi) $UH_2O = 3,0$ g.cm^{-2}
	vii) $UH_2O = 6,0$ g.cm^{-2}
Les bandes spectrales	Bandes 1 et 2 de AVHRR-NOAA-11
Conditions de surface	i) 0 % de défoliation
	ii) 30 % de défoliation
	iii) 50 % de défoliation
	iv) 75 % de défoliation
	v) 100 % de défoliation
	vi) Sol nu

3.1. Impact des conditions internes

Généralement, les couverts végétaux se distinguent par un comportement spectral très caractéristique parmi tous les autres éléments terrestres. Les radiations visibles du rouge sont absorbées par les chlorophylles tandis que les radiations du proche infrarouge sont fortement réfléchies par la structure cellulaire foliaire (figure 2). La réponse spectrale de la végétation dans le rouge est fortement corrélée avec la concentration en chlorophylle et la réponse spectrale dans le proche infrarouge l'est avec l'indice foliaire et la densité de la végétation verte. Par ailleurs, les sols nus secs présentent en général un spectre continu avec une croissance progressive de la réflectance lorsque la longueur d'onde augmente. Ainsi, l'humidité est l'un des

facteurs majeurs qui affectent la réflectance des sols. Dans le domaine spectral du visible et proche infrarouge, la réflectance est d'autant plus faible que le sol est plus humide (figure 3). En outre, la réflectance des sols, dans le visible et l'infrarouge, dépend des dimensions des particules qui le constituent. Pour un type de sol donné, plus les particules sont fines et plus la réflectance est élevée. En effet, lorsque les particules sont très fines, elles ont tendance à former une surface unie avec peu d'aspérité alors que, lorsqu'elles sont plus grosses, il existe des macro-aspérités qui jouent le rôle de piège à la lumière (Guyot, 1989). Par conséquent, lorsque la rugosité du sol augmente, sa réflectance diminue. Ainsi, la couleur et la brillance exercent une influence remarquable sur la réflectance des sols. Dans le visible comme dans l'infrarouge, la réflectance augmente brusquement lorsque le sol est brillant et de couleur claire (Bannari *et al.*, 1996). Il arrive dans certains cas que les variations de réflectance dues à l'état des propriétés optiques du sol soient très importantes pouvant même être supérieures à celles qui sont produites par la croissance d'un couvert végétal (Guyot, 1989).

Le comportement de chacun des indices aux variations des propriétés optiques des 15 sols retenus dans cette étude et à leurs conditions de surfaces est illustré par la figure 5. Dans l'espace spectral rouge versus indice de végétation, le bruit des sols nus peut être évalué par la distance qui sépare les valeurs des indices formant un nuage de points par rapport à la ligne théorique des sols nus. Un indice est d'autant plus efficace lorsque le nuage de points coïncide parfaitement avec la ligne théorique des sols nus, situation bien illustrée par les indices TSAVI et PVI. Or, malgré l'absence de la végétation, nous remarquons que généralement les valeurs des autres indices augmentent progressivement au fur et à mesure que le sol est brillant et de couleur claire. Par contre, elles diminuent remarquablement lorsque les sols sont de couleur sombre, sont humides ou rugueux.

La figure 5 résume de façon comparative l'incertitude moyenne qui entache les différents indices considérés à cause des bruits des sols nus. Calculé au sommet de l'atmosphère, le GEMI manifeste la plus forte dépendance vis-à-vis des propriétés optiques des sols. Pour un sol dépourvu de végétation, il donne l'impression d'un couvert végétal de 33 % de taux de couverture, ce qui fausse l'interprétation des résultats et l'estimation de la biomasse notamment lorsque le couvert forestier est épars ou moyennement dense ou lorsque le taux de défoliation est plus fort. L'amplitude de cette erreur varie entre 20 % et 40 %, respectivement,

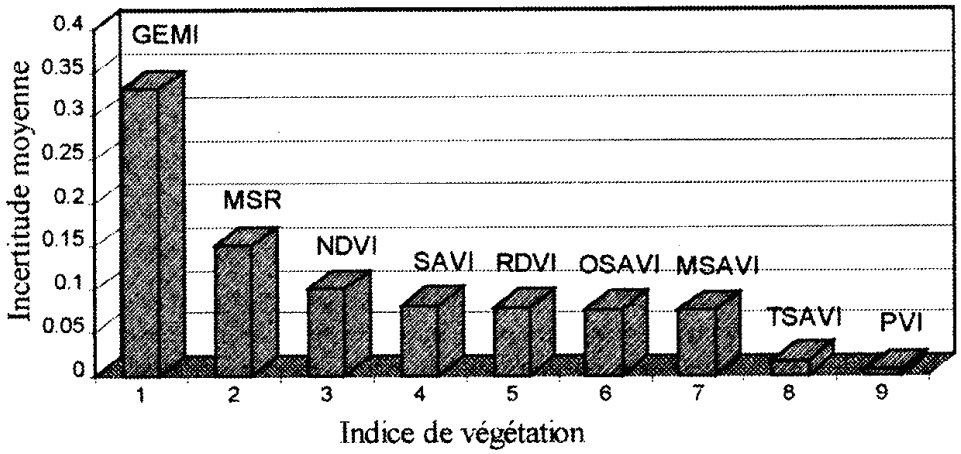


FIGURE 5 Incertitude moyenne causée par le bruit des sols nus sur les indices spectraux dérivés de AVHRR / Average error caused by the noise of bare soil background on spectral indices derived from AVHRR

pour un sol humide ou rugueux de couleur sombre et un sol sec de couleur claire et brillante (figure 6). Ces résultats sont en accord avec les travaux de Leeuwen *et al.* (1994), Qi *et al.* (1994a), Rondeaux *et al.* (1996) et Bannari *et al.* (1996).

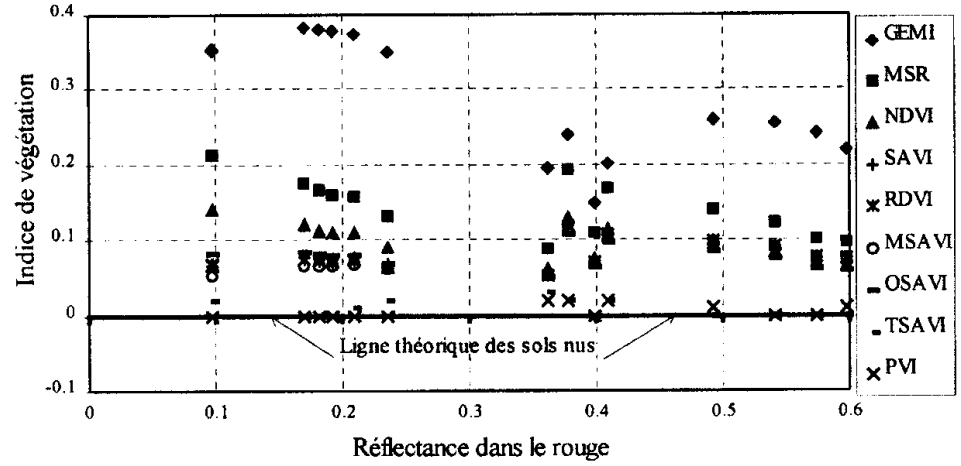


FIGURE 6 Sensibilité des indices spectraux dérivés de AVHRR aux variations spectrales des sols nus / Sensitivity of spectral indices derived from AVHRR to the various optical properties of bare soils background

Bien que le MSR soit destiné à la gestion de la forêt boréale (Chen, 1996), celui-ci montre une sensibilité non négligeable aux effets des sols sous-jacents aux couverts. Il occupe la seconde place après GEMI avec une incertitude moyenne de 15 % (figure 6). Ce bruit se manifeste remarquablement au fur et à mesure que la couleur du sol devient claire et brillante, dans ces conditions l'erreur atteint facilement 22 % (figure 5). Ce degré de sensibilité est indésirable du fait qu'il diminue le potentiel de l'indice à discriminer le végétal du minéral, notamment dans les zones moins denses où il y a une mixture spectrale, et augmente l'incertitude des résultats. Quant à l'indice le plus populaire, le NDVI, il normalise l'effet des sols mieux que le MSR, mais il reste quand même entaché d'une erreur moyenne significative, 10 % environ.

Par ailleurs, les indices ajustés par rapport au sol SAVI, OSAVI et MSAVI, ainsi que l'indice RDVI sont plus performants que ceux cités ci-dessus pour normaliser l'effet des propriétés optiques des sols et leur état de surface. Le comportement de ces quatre indices est relativement similaire. L'incertitude moyenne est de 7 % environ avec un écart insignifiant entre les sols de couleurs sombre et claire et ceux humides et/ou rugueux (figures 5 et 6). Quant aux indices qui englobent les paramètres de la droite des sols nus, TSAVI et PVI, ils montrent un comportement exemplaire vis-à-vis des sols indépendamment de leurs propriétés optiques et de leur état de surface. L'incertitude moyenne sur ces indices est négligeable, inférieure à 2 %. Mentionnons que cette précision est assurée lorsque nous considérons l'ensemble des échantillons de sols nus pour calculer les paramètres de la droite des sols ($a = 1{,}134$; $b = 0{,}022$ et $r^2 = 0{,}99$). Par contre, si nous considérons un seul sol pour calculer ces paramètres, l'incertitude devient assez significative (10 % à 15 % environ) sur le TSAVI et le PVI du fait qu'il existe autant de droites que de sols (Huete and Tucker, 1991; Baret *et al.*, 1993; Rondeaux *et al.*, 1996).

3.2 Impact des conditions externes

Sur la figure 7, on montre l'impact des perturbations atmosphériques sur les différents indices considérés. Les graphiques de la colonne gauche montrent le comportement des indices à l'absorption par la vapeur d'eau, alors que ceux de la colonne droite illustrent l'effet de la diffusion. Contrairement aux effets des sols qui se manifestent plus dans les couverts épars et moyennement denses, les variations atmosphériques (diffusion et

absorption) se manifestent progressivement au fur et à mesure que le degré de défoliation du couvert tend vers zéro. Ainsi, nous constatons que l'impact de la diffusion par les aérosols est assez remarquable sur tous les indices, suivi par l'effet de l'absorption et finalement la diffusion de Rayleigh.

En plus de sa sensibilité aux propriétés spectrales des sols nus, le MSR est l'indice le plus sensible aux variations atmosphériques, aussi bien à la diffusion qu'à l'absorption (figures 7a et 7b). Dans des conditions d'observation moyennes (visibilité de 25 km) au-dessus d'un couvert sans défoliation, l'erreur relative par rapport à la vérité terrain est de 40 %. Pour une atmosphère purement moléculaire ou une faible concentration de la vapeur d'eau dans l'atmosphère (0,5 gcm^{-2}), le MSR reste sensible et affiche une erreur relative de 35 %, alors que dans des conditions atmosphériques extrêmes (visibilité de 5 km), cas très rares, l'erreur atteint un maximum de 57 %. Nous constatons qu'en général, le RDVI (version originale du MSR) apparaît plus résistant que le MSR aux variations des propriétés optiques des sols nus et aux perturbations atmosphériques. Il est donc difficile de qualifier le MSR sans corrections atmosphériques comme un descripteur précis des paramètres biophysiques de la forêt boréale.

Par ailleurs, malgré l'avantage du MSAVI de réduire le bruit des sols, son potentiel est fortement limité pour une détection précise des couverts forestiers à cause des effets atmosphériques (figures 7c et 7d). Cet indice est deux fois plus sensible que le NDVI, lors de la présence d'une concentration moyenne d'aérosols dans l'atmosphère (visibilité de 25 km), l'erreur relative est de 31 % par rapport à la vraie valeur au sol, alors qu'elle est de 25 % pour une atmosphère Rayleigh. Cette erreur atteint 44 % dans des conditions atmosphériques assez dégradées. Indépendamment des caractéristiques spectrale et spatiale du capteur et du milieu d'application, le MSAVI montre toujours une forte dépendance vis-à-vis des effets atmosphériques (Bannari, 1996).

Les indices SAVI et RDVI montrent une sensibilité similaire aux effets de diffusion et d'absorption (figures 7e à 7h). Entre les vraies valeurs au sol et celles calculées d'en haut de l'atmosphère, l'écart augmente progressivement au fur et à mesure que les conditions d'observation deviennent dégradées et que la défoliation cumulative devient nulle. La magnitude de l'erreur relative est de 20 % environ pour effet Rayleigh ou une faible concentration de la vapeur d'eau dans l'atmosphère (0,5 gcm^{-2}), alors qu'elle est de 37 % pour une visibilité de 5 km.

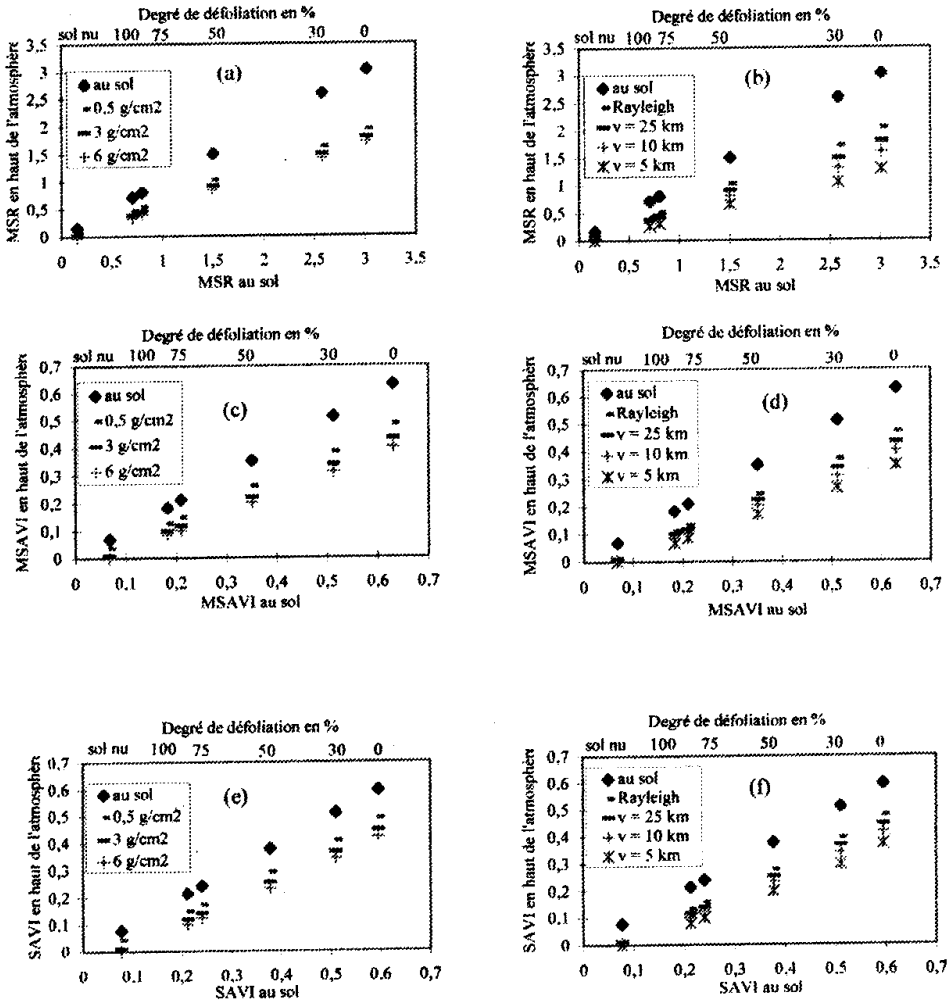


FIGURE 7 Impact des effets atmosphériques sur les indices spectraux dérivés de AVHRR (absorption à gauche et diffusion à droite) / Atmospheric effects on spectral indices derived from AVHRR (absorption on the left and scattering on the right) (voir photo couleur III à la fin de cette revue)

Du fait que les paramètres de la droite des sols intégrés dans les formules des indices TSAVI et PVI peuvent changer à cause des effets atmosphériques (Huete and Tucker, 1991; Bannari *et al.*, 1997), ils ont été calculés pour les différentes conditions atmosphériques considérées dans cette étude. Malgré leur pouvoir discriminant des bruits des sols, ces indices restent quand même sensibles aux variations atmosphériques. Ils montrent presque la même sensibilité (figures 7i à 7l) avec une erreur relative qui varie de 17 % à 32 %, respectivement, pour une atmosphère Rayleigh et

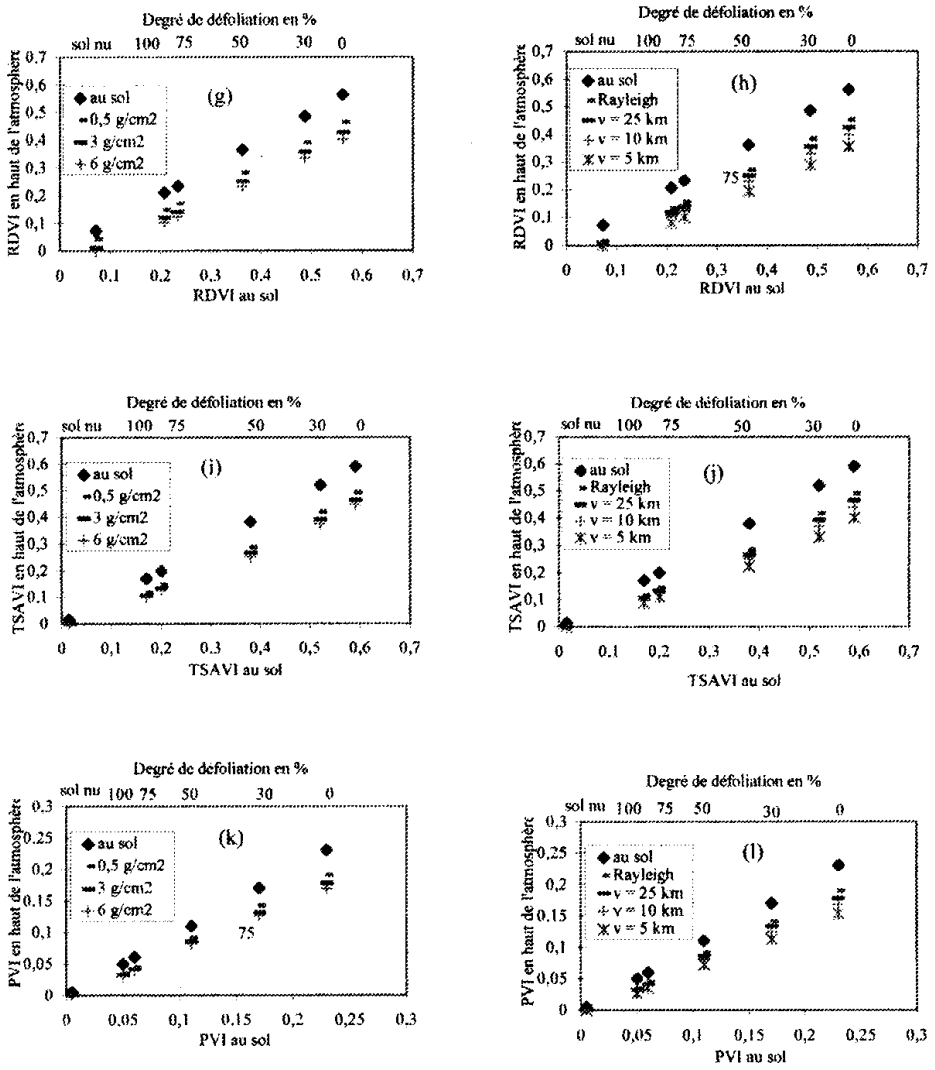


FIGURE 7 (suite) Impact des effets atmosphériques sur les indices spectraux dérivés de AVHRR (absorption à gauche et diffusion à droite) / Atmospheric effects on spectral indices derived from AVHRR (absorption on the left and scattering on the right) (voir photo couleur IV à la fin de cette revue)

une atmosphère Mie à forte concentration d'aérosols (visibilité de 5 km). Dans ce contexte forestier, le OSAVI montre la même sensibilité que le TSAVI aux variations de diffusion et d'absorption (figures 7m et 7n), ce qui est normal puisque cet indice est un simple cas particulier du TSAVI calculé avec une droite des sols nus dont la pente est égale à l'unité alors que l'origine est égale à zéro.

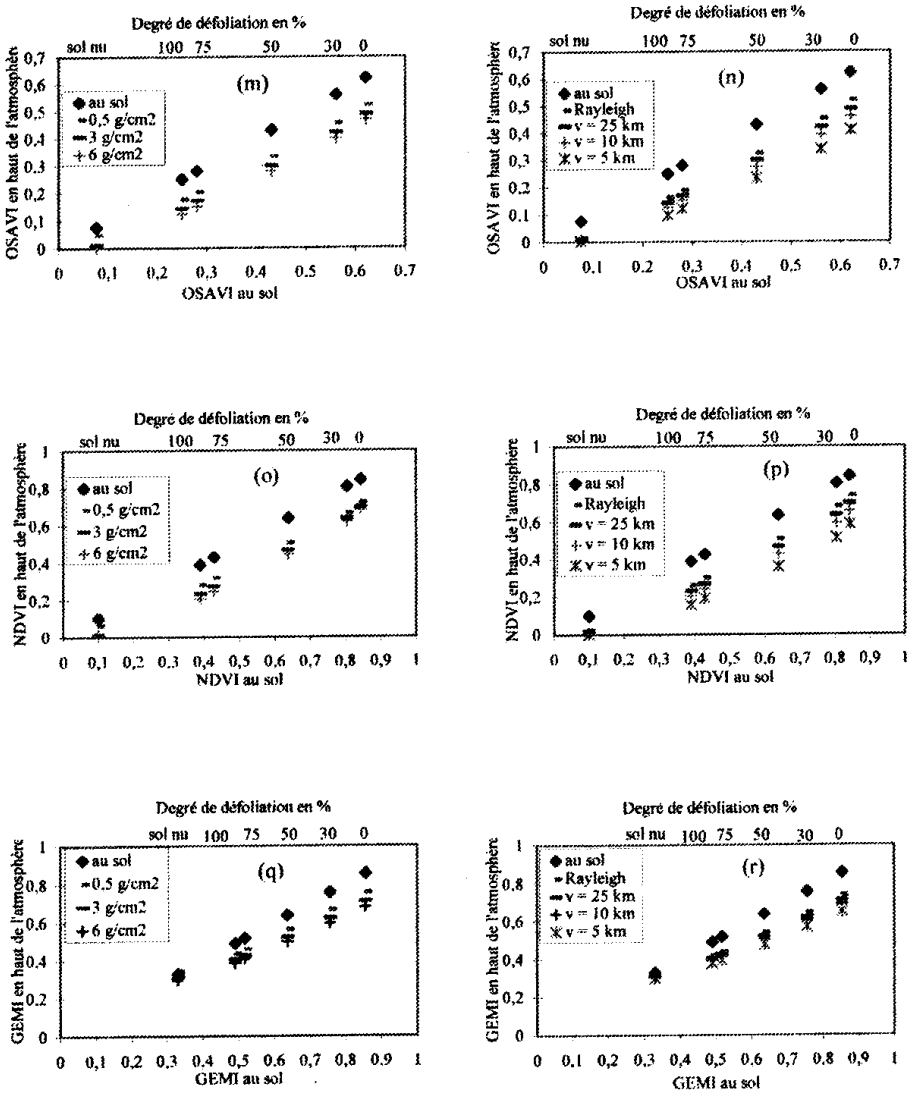


FIGURE 7 (suite) Impact des effets atmosphériques sur les indices spectraux dérivés de AVHRR (absorption à gauche et diffusion à droite) / Atmospheric effects on spectral indices derived from AVHRR (absorption on the left and scattering on the right) (voir photo couleur V à la fin de cette revue)

Finalement, les indices GEMI et NDVI sont moins sensibles aux effets atmosphériques que ceux discutés ci-dessus (figures 7o à 7r). Cependant, bien que GEMI soit développé sous l'hypothèse de minimiser les effets atmosphériques, celui-ci reste significativement sensible aussi bien à la diffusion qu'à l'absorption en affichant une sensibilité similaire à celle du

NDVI. L'erreur relative moyenne sur ces indices est de 13 % lors d'une atmosphère Rayleigh et de 17 % lors des conditions d'observations standards en télédétection (visibilité de 25 km). Ces erreurs sont assez significatives et perturbent l'analyse et l'interprétation des résultats lors des études multitemporelles. Comparativement au GEMI, le NDVI est plus intéressant du fait qu'il minimise 3,3 fois les perturbations liées aux sols nus, sa formule est plus simple, et il peut être calculé à partir des données radiométriques issues de différents capteurs, alors que le GEMI est conçu spécialement pour AVHRR.

4. DISCUSSION

À la lumière de cette analyse, nous constatons que les indices considérés montrent des forces et des faiblesses contradictoires et qu'aucun parmi eux ne satisfait les exigences de l'indice optimal pour le milieu forestier. Autrement dit, si un indice se montre résistant à un effet, il devient sensible aux autres effets et vice-versa. Bien entendu, il est souhaitable de généraliser un indice bien précis pour la gestion du milieu forestier indépendamment de la variation des conditions internes et externes aux couverts, mais une telle généralisation reste difficile à faire. Par exemple, si les données radiométriques ne bénéficient pas des corrections atmosphériques (*situation non désirable lors de la transformation des données radiométriques en indices spectraux et en télédétection de façon générale*) un sérieux problème se posera pour faire un choix judicieux. Mais, si nous avons à choisir entre le «moins bon» et le «pur», le NDVI peut être sélectionné dans ces conditions du fait qu'il normalise les variations atmosphériques mieux que les autres indices. Ainsi, sa sensibilité aux bruits des sols reste moins élevée que celle du GEMI et du MSR, et relativement plus élevée (3,5 % environ) que les indices qui s'ajustent par rapport aux sols. D'ailleurs, le NDVI est l'indice «fétiche» de la série AVHRR, il a souvent été utilisé pour étudier l'état phénologique des couverts végétaux durant les périodes de croissance, pour la cartographie et la classification de l'occupation des sols, et il occupe une position intéressante dans le programme des changements à l'échelle du globe (Justice *et al.*, 1985; Townshend *et al.*, 1991, 1994).

Bien entendu, indépendamment des variations internes et externes aux couverts, il est souhaitable d'avoir un indice qui fixe les valeurs entre 0 et

1, respectivement, pour un sol dépourvu de végétation et un couvert complètement recouvrant. Malheureusement, cette linéarité n'est assurée par aucun indice, d'une part à cause des problèmes discutés ci-dessus et, d'autre part, à cause du problème de saturation lorsque le couvert forestier devient très dense. Sur la figure 8, on montre une grande variation de sensibilité entre les indices en fonction de différents degrés de défoliation.

Malgré le potentiel exemplaire du PVI vis-à-vis des sols, en présence du couvert forestier, cet indice présente une faible dynamique et manque de vigueur pour une description précise du taux de couverture (figure 8a). Il sous-estime l'évaluation de la présence végétale, sa valeur ne dépasse pas 23 % pour un couvert sans défoliation (0 %). Contrairement à ce dernier, le MSR se distingue par une large dynamique qui varie entre 0,16 et 3,02, respectivement, pour un sol nu et un couvert sans défoliation (figure 8a). Or, malgré cette large dynamique, il est difficile d'interpréter correctement le comportement de cet indice vis-à-vis des couverts forestiers épars et moyennement denses ou lorsque le degré de défoliation est assez avancé à cause de sa sensibilité aux effets des sols sous-jacents. Précisons ici que cet indice a été validé pour la première fois à partir des données du capteur TM de Landsat (Chen, 1996), alors que les résultats obtenus dans cette étude à partir des données simulées AVHRR montrent que le RDVI peut être un aussi bon descripteur des paramètres biophysiques forestiers que le MSR.

La figure 8b montre que les indices GEMI et NDVI sont moins performants pour caractériser les paramètres biophysiques des couverts forestiers à défoliation plus ou moins forte (50 % ⟨ défoliation ⟨ 100 %) à cause de leur faible pouvoir discriminant entre les propriétés spectrales des sols nus et celles des couverts. Toutefois, lorsque le degré de défoliation est moins fort (défoliation ⟨ 30 %), le GEMI laisse voir qu'il s'approche de plus en plus de la réalité terrain, alors que le NDVI souffre d'un problème de saturation. Sa dynamique se sature et se stabilise à un maximum de 0,85 pour des couverts dont le degré de défoliation varie de 20 à 0 % (figure 8b), ce qui ne permettra pas la détection des changements temporels qui peuvent avoir lieu dans l'occupation du sol (Townshend *et al.*, 1991; Huete *et al.*, 1997).

À l'exception du OSAVI qui surestime les couverts épars et intermédiaires à cause de sa sensibilité aux effets des sols, tous les indices qui s'ajustent par rapport au sol (TSAVI, SAVI, MSAVI et RDVI) se montrent performants pour la description des couverts forestiers avec un degré de

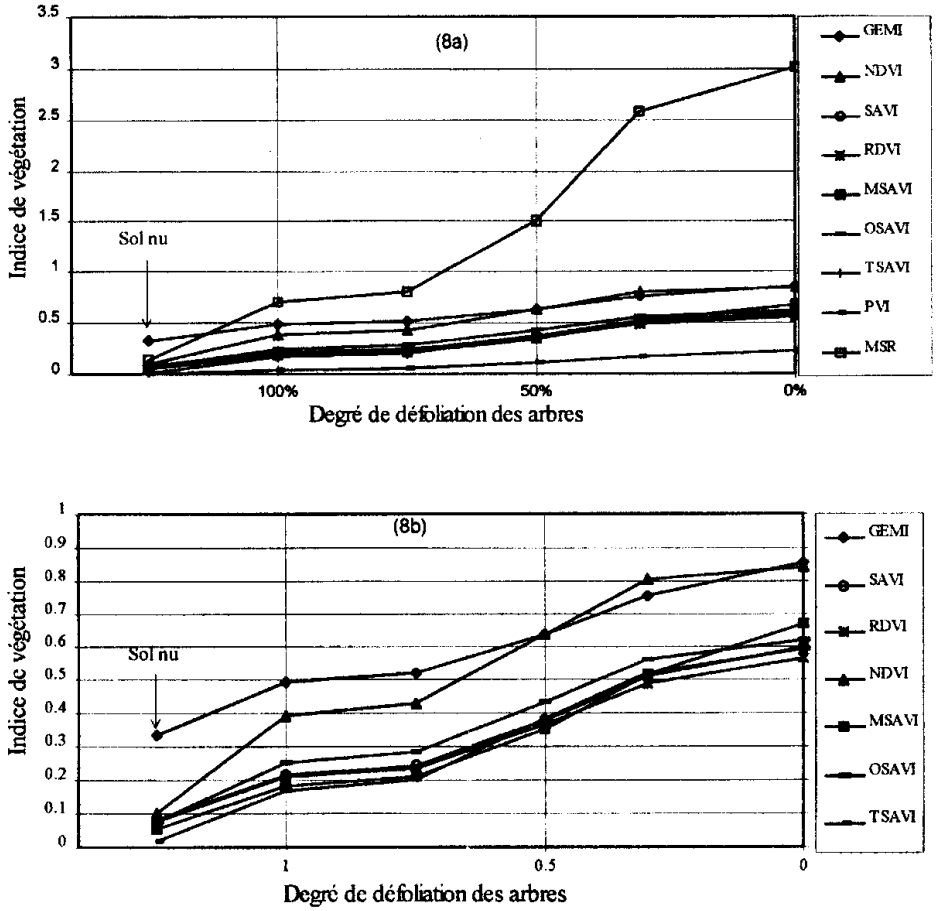


FIGURE 8 Sensibilité des indices spectraux dérivés de AVHRR aux couverts forestiers à différents degrés de défoliation cumulative / Sensitivity of spectral indices derived from AVHRR to the forest covers at different degrees of cumulative defoliation

défoliation qui varie entre 30 % et 100 %. Si le degré de défoliation du couvert est fort (75 % ⟨ défoliation ⟨ 100 %), le TSAVI est le plus convenable des indices. Toutefois, si les effets atmosphériques sont corrigés, indépendamment du degré de défoliation ou de la densité du couvert présent dans une scène, le MSAVI peut être généralisé pour le suivi et la gestion des couverts forestiers. Bien qu'il ne soit pas linéaire, c'est un indice qui ne sature pas au moment de la présence d'une forte densité du couvert et montre toujours un potentiel et une sensibilité qui permettent la distinction entre les différents taux de couvertures et la détection des changements temporels qui peuvent avoir lieu dans un environnement forestier.

5. CONCLUSION

Dans cette étude nous avons analysé l'impact de la variabilité des conditions internes (couleur, brillance, humidité et rugosité des sols sous-jacents) et externes (absorption et diffusion atmosphériques) aux couverts forestiers sur les indices spectraux dérivés des données simulées AVHRR de NOAA-11. Les résultats obtenus montrent qu'en fonction du degré de défoliation du couvert, si un indice se montre résistant à un effet, il devient sensible aux autres effets et vice-versa. Toutefois, même s'ils sont sensibles aux variations atmosphériques, les indices TSAVI, SAVI, MSAVI et RDVI normalisent bien l'effet des propriétés optiques des sols nus et se montrent performants pour la description des couverts forestiers avec un degré de défoliation qui varie entre 30 % et 100 %. Si le degré de défoliation du couvert est fort (75 % ⟨défoliation ⟨100%), le TSAVI est le plus convenable des indices. Par-contre, si les données sont adéquatement corrigées des effets atmosphériques et standardisées par un étalonnage radiométrique systématique et fiable du capteur, le MSAVI peut être l'indice optimal pour la description des paramètres biophysiques en milieu forestier à partir des données de AVHRR. Cet indice se caractérise par un bon potentiel pour minimiser les propriétés optiques des sols nus et se distingue des autres indices qui s'ajustent par rapport au sol par une légère sensibilité aux couverts très denses. Bien qu'il ne soit pas linéaire, il ne sature pas au moment de la présence d'une très forte densité végétale ce qui permettra la distinction entre les différents taux de couvertures et la détection des changements temporels qui peuvent avoir lieu dans un environnement forestier.

Par ailleurs, nous constatons que globalement les indices spectraux manquent de robustesse dans les méthodes de conception. Les bandes spectrales sont combinées de façon «rigide» pixel par pixel afin de dériver un indice spectral donné. Cette façon ne s'occupe guère du problème de l'hétérogénéité du pixel considéré (mélange spectral), ce qui entraîne inévitablement une perte d'information puisque chaque pixel ne peut être attribué qu'à une seule classe d'occupation du sol : végétal, minéral ou eau. Afin d'éviter les problèmes ardus du mélange spectral dans un même pixel dans les milieux hétérogènes (notamment lors du traitement des images de faible résolution spatiale), et améliorer la précision des indices spectraux une nouvelle méthode de conception appropriée est requise.

Remerciements

Nous remercions le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG) du Canada pour l'appui financier et Dr Frédéric Baret (l'INRA d'Avignon, France) pour sa collaboration bien appréciée.

Références

Bannari, A. (1996) La télédétection et les indices de végétation pour la détection de la végétation éparse et moyennement dense. Thèse de doctorat, Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Canada, 235 p.

Bannari, A., Teillet, P.M. et Richardson, G. (1999) Nécessité de l'étalonnage radiométrique et standardisation des images numériques de télédétection. Journal canadien de télédétection, vol. 25, no 1, p. 45–59.

Bannari, A., Royer, A. et Morin, D. (1997) Un nouvel indice de végétation le TSARVI : Transformed Soil Atmospherically Resistant Vegetation Index. Septième Symposium international des mesures physiques et signatures en télédétection, Courchevel, France, p. 677–684.

Bannari, A., Huete, A.R., Morin, D. et Zacolski, F. (1996) Effets de la couleur et de la brillance du sol sur les indices de végétation. International Journal of Remote Sensing, vol. 17, no 10, p. 1885–1906.

Bannari, A., Morin, D., Huete, A.R. and Bonn, F. (1995) A review of vegetation indices. Remote Sensing Reviews, vol. 13, p. 95–120.

Baret, F., Guyot, G. and Major, D.J. (1989) TSAVI : A vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. Proceedings of the 12th Canadian Symposium on Remote Sensing, Vancouver, Canada, p. 1355–1358.

Baret, F., Jacquemoud, S. and Hanocq, J.F. (1993) The Soil Line Concept in Remote Sensing, Remote Sensing Reviews, vol. 7, no 1, p. 65–82.

Chen, J.M. (1996) Evaluation of vegetation indices and a modified simple ratio for boreal applications. Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 22, no 3, p. 229–242.

Guyot, G. (1989) Les signatures spectrales des surfaces naturelles. Télédétection spatiale, no 5, Paradigme, Caen, 178 p.

Guyot, G., Guyon, D. and Riom, J. (1989) Factors Affecting the Spectral Response of Forest Canopies : A Review. Geocarto International, vol. 3, p. 3–18.

Huete, A.R. (1989) Soil influences in remotely sensed vegetation-canopy spectra. In G. Asrar (ed.) : Theory and Application of Optical Remote Sensing, Chapter 4. Wiley Interscience, p. 107–141.

Huete, A.R. (1988) A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment, vol. 25, p. 295–309.

Huete, A.R. (1987) Soil-dependant spectral response in a developing plant canopy. Agronomy Journal, vol. 79, p. 61–68.

Huete, A.R. (1984) Soil spectral effects on vegetation discrimination. Ph.D. Thesis, Department of Soils, Water and Engineering, University of Arizona, 208 p.

Huete, A.R. and Tucker, C.J. (1991) Investigation of soil influences in AVHRR red and near-infrared vegetation index imagery. International Journal of Remote Sensing, vol. 12, no 6, p. 1223–1242.

Huete, A.R., Justice, C. and Van-Leeuwen, W. (1996) MODIS Vegetation Index (MOD13), Algorithm Theoretical Basi Document. NASA, Goddard Space Flight Center Greenbelt, Maryland (www.eopo.gsfc.nasa.gov/atbd/modistables.html), 115 p.

Huete, A.R., Liu, H.-Q., Batchily, K. and Van-Leeuwen, W. (1997) A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. Remote Sensing of Environment, vol. 59, p. 440–451.

Illera, P., Fernandez, A. and Delgado, J.A. (1996) Temporal evolution of the NDVI as an indicator of forest danger. International Journal of Remote Sensing, vol. 17, no 6, p. 1093–1105.

Justice, C.O., Townshend, J.R.G., Holben, B.N. and Tucker, C.J. (1985) Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. International Journal of Remote Sensing, vol. 6, p. 1271–1318.

Kasischke, E. S. and French, N.H.F. (1997) Constraints on using AVHRR composite index imagery to study patterns of vegetation cover in boreal forests. International Journal of Remote Sensing, vol. 18, no 11, p. 2403–2426.

Kaufman, Y.J. (1988) Atmospheric effects on spectral signature measurements and corrections. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 26, no 4, p. 441–450.

Leckie, D.G., Teillet, P.M., Fedosejevs, G. and Ostaff, D.P. (1988) Reflectance characteristics of cumulative defoliation of balsam fir. Canadian Journal of Forest Research, vol. 8, no 8, p. 1008–1016.

Leeuwen-van, W.J.D., Huete, A.R., Duncan, J. and Franklin, J. (1994) Radiative transfer in shrub savanna sites in Niger : preliminary results from HAPEX-Sahel. 3. Optical dynamics and vegetation index sensitivity to biomass and plant cover. Agricultural and Forest Meteorology, vol. 69, p. 276–288.

Myneni, R.B. and Asrar, G. (1994) Atmospheric Effects and Spectral Vegetation Indices. Remote Sensing of Environment, vol. 17, p. 390–402.

Pinty, B. and Verstraete, M.M. (1992) GEMI : a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. Vegetatio, vol. 101, p. 15–20.

Qi, J., Kerr, Y. and Chehbouni, A. (1994a) External factor consideration in vegetation index development. Proceedings of the sixth International Symposium Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, Val d'Isère, France, p. 723–730.

Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A.R., Kerr, Y. and Sorooshian, S. (1994b). A modified soil adjusted vegetation index. Remote Sensing of Environment, vol. 47, p. 1–25.

Richardson, A.J. and Wiegand, C.L. (1977) Dintinguishing vegetation from soil background information. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 43, p. 1541–1552.

RNCSCF (Ressources Naturelles Canada Service Canadien des Forêts) (1996) L'état des forêts au Canada. Ottawa, 112 p.

Rondeaux, G., Steven, M. and Baret, F. (1996) Optimization of Soil-Adjusted Vegetation Indices. Remote Sensing of Environment, vol. 55, p. 95–107.

Roujean, J.-L. and Breon, F.M. (1995) Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. Remote Sensing of Environment, vol. 51, p. 375–384.

Rouse, J.W., Haas, R.W., Schell, J.A., Deering, D.W. and Harlan, J.C. (1974) Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Greenwave effect) of natural vegetation. NASA/GSFC Type-III Final Report, Greenbelt, Maryland, U.S.A., 164 p.

Royer, A., Goita, K., Ansseau, C., Faizoun, A. and Saint, G. (1997) Analysis of boreal forest dynamics using the global vegetation index. Remote Sensing Reviews, vol. 15, p. 265–282.

Tanré, D., Deroo, C., Duhaut, P., Herman, M., Morcrette, J.J., Perbos, J. and Deschamps, P.Y. (1990). Description of a computer code to simulate satellite signal in the solar spectrum : The 5S Code. International Journal of Remote Sensing, vol. 14, no 4, p. 659–668.

Tans, P.P., Fung, I.Y. and Takahashi, T. (1990) Observational constraints on the global atmospheric CO_2 budget. Science, vol. 247, p. 1431–1438.

Teillet, P.M. (1994) Vegetation Index Monitoring: Radiometric Considerations. Remote Sensing in Canada, vol. 22, no 1, p. 8–9.

Teillet, P.M. and Santer, R.P. (1991) Terrain elevation and sensor altitude dependence in semi-analytical atmospheric code. Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 17, no 1, p. 36–44.

Teillet, P.M., Staenz, K. and Williams, D.J. (1997) Effects of spectral, spatial, and radiometric characteristics on remote sensing vegetation indices of forested regions. Remote Sensing of Environment, vol. 61, p. 139–149.

Teillet, P.M., Leckie, D.G., Ostaff, D., Fedosejevs, G. and Ahern, F.J. (1985) Spectral Measurements of Tree Defoliation. Proceedings of the 3 rd International Colloquium on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing, Les Arcs, France, p. 511–516.

Townshend, J.R.G., Justice, C., Li, W., Gurney, C. and McManus, J. (1991) Global land cover classification by remote sensing : present capabilities and future possibilities. Remote Sensing of Environment, vol. 35, p. 243–256.

Townshend, J.R.G., Justice, C.O., Skole, D., Malingreau, J.P., Cihlar, J., Teillet, P.M., Sadowski, F. and Ruttenberg, S. (1994) The 1 km resolution global data set : needs of International Geosphere Biosphere Programme. International Journal of Remote Sensing, vol. 15, p. 3417–3441.

Ustin, S.L., Smith, M.O., Jacquemoud, S., Verstraete, M.M. and Govaerts, Y. (1997) Geobotany : Vegetation Mapping Earth Sciences. Chapter 4 *In* A. Rencz (ed.) Manual of Remote Sensing (http://cstars.ucdavis.edu/papers/susting/geobotany/ paper.html), 19 p.