

# validation d'un modèle de réflectance spectrale et directionnelle de sol

S. Jacquemoud, F. Baret, J.F. Hanocq  
INRA-Bioclimatologie, BP 91, 84143 Montfavet Cedex (France)

## Résumé

La réflectance spectrale et directionnelle de 26 sols a été mesurée en laboratoire à l'aide d'un spectroradiomètre (1000 bandes spectrales entre 450 nm et 2450 nm) et d'un radiomètre (5 bandes larges TM). Nous avons testé un modèle de transfert radiatif dont les paramètres d'entrée sont un albédo de simple diffusion ( $\omega$ ), une fonction de phase des particules  $P(g, g')$  et une variable caractéristique de la rugosité du sol ( $h$ ). Les paramètres du modèle d'Hapke ont été ajustés par inversion. Les résultats montrent que seul l'albédo de simple diffusion dépend de la longueur d'onde, les autres paramètres pouvant être considérés comme constants pour un sol donné.

## 1 INTRODUCTION

La plupart des modèles de réflectance des couverts végétaux admettent comme paramètres d'entrée les propriétés optiques des feuilles et la réflectance spectrale des sols. Les travaux de modélisation de la réflectance directionnelle des sols sont rares et n'ont pas été validés sur tout le spectre. La réflectance de la surface d'un sol dépend des propriétés spectrales intrinsèques des matériaux pédologiques (Refs. 2, 13), de la taille des agrégats du sol, de l'humidité et de la géométrie de mesure.

La rugosité est l'un des facteurs les plus importants influençant la réflectance directionnelle d'un sol nu. La description de cette rugosité et des phénomènes de diffusion de la lumière entre les agrégats du sol a fait l'objet de nombreuses études. Le modèle géométrique de Deering *et al.* (Ref. 6) dans lequel les effets spéculaires et de rétrodiffusion sont formulés séparément, a permis de simuler avec succès la réflectance directionnelle de sols désertiques. Cierniewski (Refs. 4,5) assimile la surface d'un sol à des sphères équidistantes de même rayon, disposées sur un plan de pente variable. Il suppose que la réflectance est fortement liée aux ombres créées par les agrégats, et dépend donc de la rugosité, des géométries d'éclairement et de visée. Cette hypothèse n'est que partiellement vérifiée car, comme le montre Escadafal (Ref. 7), la réflectance ne diminue pas aussi vite que le modèle le prévoit en supposant les ombres totalement sombres. Cette dérive est d'autant plus importante que l'albédo du sol est élevé. Il apparaît donc nécessaire de prendre en compte les réflexions d'ordre supérieur qui interviennent quand

les particules sont proches les unes des autres. Des modèles dérivés de la théorie du transfert radiatif ont été développés pour décrire quantitativement cette diffusion multiple (Refs. 3, 13). On peut les inverser afin d'estimer des caractéristiques du milieu à partir d'observations de télédétection. Hapke (Refs. 9, 10, 11, 12) a proposé une solution approchée de l'équation de transfert radiatif intégrant l'effet de "hot spot". Ce modèle à 5 paramètres permet de simuler aussi bien des mesures de réflectance au laboratoire que des observations de surfaces de planètes. Pinty *et al.* (Refs. 15, 16) ont appliqué ce modèle sur des sols nus.

La bibliographie montre que les études portant à la fois sur les propriétés spectrales et directionnelles des sols sont assez rares. Dans la plupart des cas, les deux aspects sont dissociés. Les travaux concernant la réflectance spectrale des sols se contentent le plus souvent de dresser un catalogue de spectres acquis dans certaines conditions de mesure. Bien qu'une telle démarche soit nécessaire dans un but de classification, elle reste toutefois liée aux facteurs externes au sol (géométrie d'éclairement et de visée). Nous proposons donc d'utiliser le modèle d'Hapke afin d'isoler les paramètres qui varient spectralement de ceux qui ne doivent pas dépendre de la longueur d'onde. Nous allons auparavant décrire le modèle et l'expérience mise en oeuvre dans cette étude.

## 2 LE MODELE

### 2.1 L'équation de transfert radiatif

Considérons une surface à l'altitude  $z = 0$ , contenant des particules sphériques irrégulières, orientées au hasard et dont la dimension est grande devant la longueur d'onde. Ce milieu est éclairé dans la direction  $(i, \phi)$  par un faisceau lumineux d'intensité  $J$  et est observé par un détecteur dans la direction  $(e, 0)$ . La radiance par unité de surface et d'angle solide du détecteur peut être considérée comme la somme d'une diffusion simple  $I_s$  et d'une diffusion multiple  $I_m$ :

$$I_s = \frac{J\omega}{4\pi} \frac{\cos i}{\cos i + \cos e} P(g) \quad (1)$$

$$I_m = \frac{J\omega}{4\pi} \frac{\cos i}{\cos i + \cos e} \{H(\cos i)H(\cos e) - 1\} \quad (2)$$

$$\text{avec } H(x) = \frac{1 + 2x}{1 + 2\sqrt{1 - \omega}x} \quad (3)$$

où  $\omega$  est l'albédo de simple diffusion et  $P(g)$  la fonction de phase. Chandrasekhar (Ref. 3) a montré que pour un milieu semi infini,  $I_m$  était moins sensible à la fonction de phase des particules que  $I_s$ . Le terme de diffusion simple est donc calculé exactement pour n'importe quelle fonction de phase  $P(g)$ , alors qu'on utilise une approximation pour la diffusion multiple ( $P(g) = 1$ ). L'équation générale de transfert radiatif s'écrit donc:

$$I = \frac{J\omega}{4\pi} \frac{\cos i}{\cos i + \cos e} \{P(g) + H(\cos i)H(\cos e) - 1\} \quad (4)$$

Nous avons modifié les équations formulées par Hapke (Ref. 9) et utilisées avec succès par Pinty et al. (Ref. 15) pour décrire la réflectance directionnelle de sols rugueux.

## 2.2 L'effet d'opposition

Hapke (Ref. 8) a montré que pour un angle de phase faible ( $g \leq 20^\circ$ ) la probabilité d'éclairement d'une particule et celle de fuite de la lumière vers le détecteur n'étaient pas indépendantes car la lumière choisit un chemin préférentiel pour s'échapper. Cette fuite, de probabilité 1, s'applique uniquement au terme de diffusion simple  $I_s$  et l'équation de transfert radiatif [4] prend la forme:

$$I = \frac{J\omega}{4\pi} \frac{\cos i}{\cos i + \cos e} ([1 + B(g)]P(g) + H(\cos i)H(\cos e) - 1) \quad (5)$$

où  $B(g)$  est la fonction de rétrodiffusion contrôlant l'effet d'opposition. Initialement, cette fonction dépendait de l'albédo de simple diffusion  $\omega$ , d'un terme d'amplitude du "hot spot"  $S(0)$ , de l'angle de phase  $g$  et d'un paramètre de rugosité  $h$ . Sous cette forme, les calculs aboutissent à des nonsens physiques. Nous l'avons donc simplifiée en:

$$B(g) = \frac{1}{1 + \frac{1}{h} \tan \frac{g}{2}} \quad (6)$$

## 2.3 La fonction de phase $P(g)$

Elle décrit la distribution spatiale de la lumière réfléchiée par une surface donnée. La littérature (Refs. 8, 9, 15) montre que l'expression de  $P(g)$  n'a souvent aucune justification théorique et qu'elle ne décrit qu'un seul type de diffusion. Nous proposons une fonction de phase moyenne  $P(g, g')$  approximée par des polynômes de Legendre et capable d'expliquer aussi bien la rétrodiffusion que l'effet spéculaire qui caractérise les sols lisses.

$$P(g, g') = 1 + b \cos g + c \frac{(3 \cos^2 g - 1)}{2} + b' \cos g' + c' \frac{(3 \cos^2 g' - 1)}{2} \quad (7)$$

$$\cos g = \cos i \cos e + \sin i \sin e \cos \phi \quad (8)$$

$$\cos g' = \cos i \cos e - \sin i \sin e \cos \phi \quad (9)$$

La réflectance directionnelle des sols s'écrit donc en fonction des 6 paramètres suivants:  $\omega, h, b, c, b'$  et  $c'$ . Le travail suivant consistera à les estimer à partir de notre jeu de données.

## 3 MATERIEL ET METHODES

Afin de nous affranchir des conditions naturelles d'éclairement, nous avons conçu une expérimentation au laboratoire. Des mesures de réflectance directionnelle et spectrale ont été réalisées sur un jeu de 26 sols très différents: un sable (3 humidités  $\times$  2 rugosités), un sol argileux (3 humidités  $\times$  3 rugosités), une tourbe (3 humidités  $\times$  3 rugosités), de la pouzzolane et des galets. Ces sols disposés dans des bacs de 50 cm de coté, présentent une large gamme de variation des paramètres du modèle d'Hapke (albédo et rugosité). Les échantillons sont éclairés par 5 projecteurs de 2000 W à faisceau lumineux étroit: 1 vertical, 2 dans le plan principal de mesure ( $i = 34^\circ, 60^\circ$ ) et 2 dans le plan perpendiculaire ( $i = 34^\circ, 60^\circ$ ). Nous avons utilisé deux types d'instruments: un radiomètre Barringer à 5 canaux (538 nm, 631 nm, 851 nm, 1768 nm, 2209 nm) pour la réflectance directionnelle dans le plan principal, et le spectroradiomètre Barringer "REFSPEC III" (1000 bandes spectrales entre 450 nm et 2450 nm) pour la réflectance spectrale. Les mesures directionnelles ont été acquises dans 42 positions différentes:

éclairage		visée					
$i$	$\phi$	$e$					
0	0	5	10	15	<u>30</u>	45	60
34	0	0	15	20	40	45	50 60
	90	0	15	<u>30</u>	45	60	
	180	15	<u>30</u>	34	40	55	70
60	0	0	15	30	40	45	50 65 70
	90	0	15	<u>30</u>	45	60	
	180	15	<u>30</u>	45	60	70	

Les spectres ont été acquis dans les cinq configurations soulignées. Les données ont été calibrées par rapport à un panneau de référence en halon (Refs. 1, 14).

## 4 INVERSION - VALIDATION

### 4.1 Données directionnelles

La première étape a consisté à inverser le modèle sur les données directionnelles. Nous n'avons formulé *a priori* aucune hypothèse sur la dépendance spectrale des paramètres du modèle. L'inversion a été effectuée sur un jeu de 26 sols  $\times$  5 canaux soit 130 échantillons de 42 mesures chacun. Le modèle permet de décrire aussi bien la réflectance de sols rugueux rétrodiffusants que celle de sols lisses caractérisés par un effet spéculaire important. Pour chaque sol, nous avons constaté comme Pinty et al. (Ref. 16) que les termes de fonction de phase ainsi que le paramètre  $h$  étaient peu sensibles

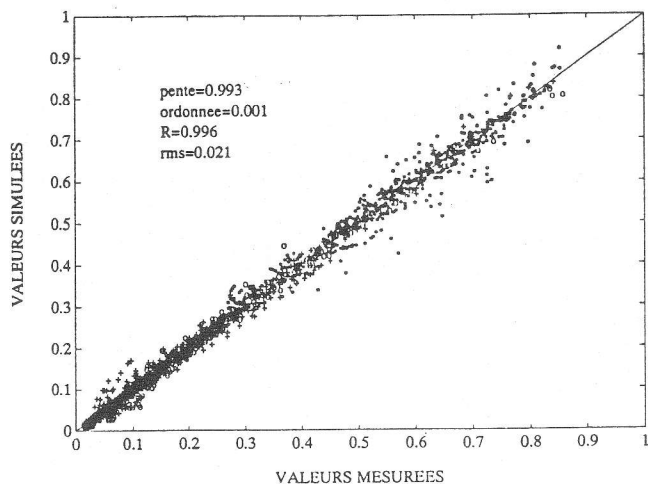


Figure 1: Réflectance observée et estimée par le modèle (+ sol argileux o terreau \* sable)

à la longueur d'onde. En effet, l'indice de réfraction des constituants des sols (Ref. 13) et surtout les propriétés mécaniques sont peu ou pas dépendants de la longueur d'onde. on peut considérer que les paramètres  $h, b, c, b'$  et  $c'$  sont constants pour un sol donné.

Le calcul suivant a consisté à ajuster ces paramètres globalement sur les 5 bandes spectrales correspondant à 5 albédos (210 mesures, 10 inconnues). Les bons résultats obtenus sur tous les sols nous ont conduits à formuler une hypothèse supplémentaire: si le sol se dessèche sans que ses propriétés mécaniques soient altérées, alors les valeurs de  $h, b, c, b'$  et  $c'$  ne devraient pas changer.

Pour un même sol à 3 humidités différentes, nous avons réajustés  $h, b, c, b'$  et  $c'$  en même temps que les 15 valeurs d'albédo (630 mesures, 20 inconnues). Les sols rugueux dont les propriétés de rétrodiffusion ne sont pas altérées par le dessèchement répondent bien à notre hypothèse (fig. 1). En revanche, les propriétés mécaniques de certains sols lisses changent: on passe d'un régime spéculaire lorsqu'ils sont humides à un régime de rétrodiffusion lorsqu'ils sont secs. Dans ce cas, nous avons dû séparer les niveaux d'humidité. Le seul paramètre qui varie spectralement de façon significative est l'albédo de simple diffusion  $\omega$ . Jusqu'à présent, nous étions limités à 5 bandes larges. L'étape suivante consistera à déterminer ses variations spectrales entre 450 nm et 2450 nm.

## 4.2 Données spectrales

Le spectre de l'albédo de simple diffusion  $\omega$  est estimé à partir des 5 spectres de réflectance mesurés dans les 5 géométries d'éclairément définies précédemment. Nous avons inversé le modèle en utilisant les valeurs déjà calculées des paramètres  $h, b, c, b'$  et  $c'$ . Ce spectre représente les propriétés optiques intrinsèques du sol: il est indépendant des conditions de mesure (éclairage et visée). Le sol argileux (fig. 2), le terreau (fig. 3) et le sable (fig. 4) présentent des caractéristiques classiques d'absorption avec une diminution de l'albédo de simple

diffusion entre le proche infrarouge et le visible; dans le moyen infrarouge, on remarquera trois pics principaux dus à l'eau (1450 nm, 1770 nm et 1950 nm).

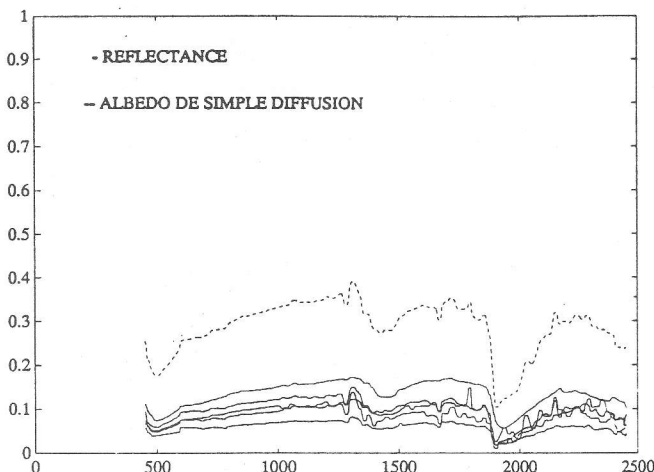


Figure 2: Albédo de simple diffusion  $\omega$

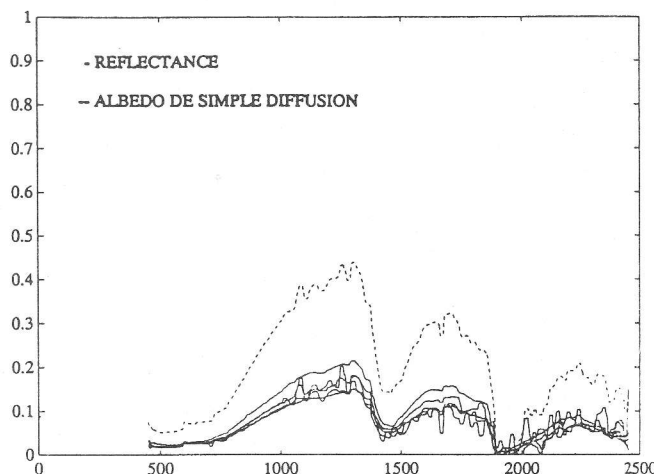


Figure 3: Albédo de simple diffusion  $\omega$

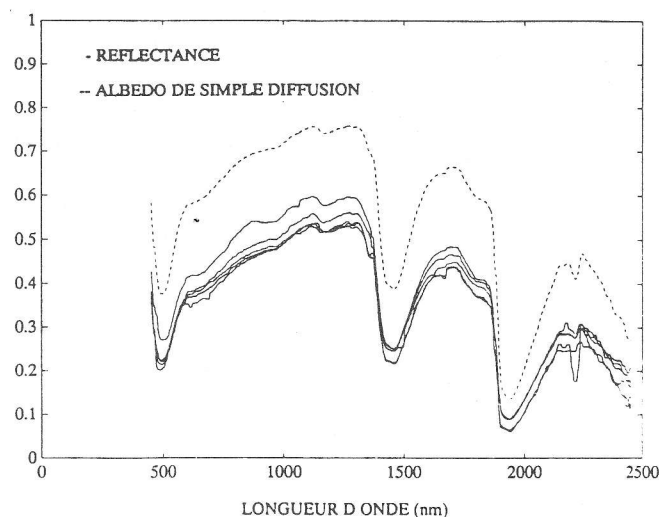


Figure 4: Albédo de simple diffusion  $\omega$

La forme de ces spectres varie d'un sol à l'autre selon la nature des constituants minéraux ou organiques et l'humidité. Ainsi le terreau riche en matière organique

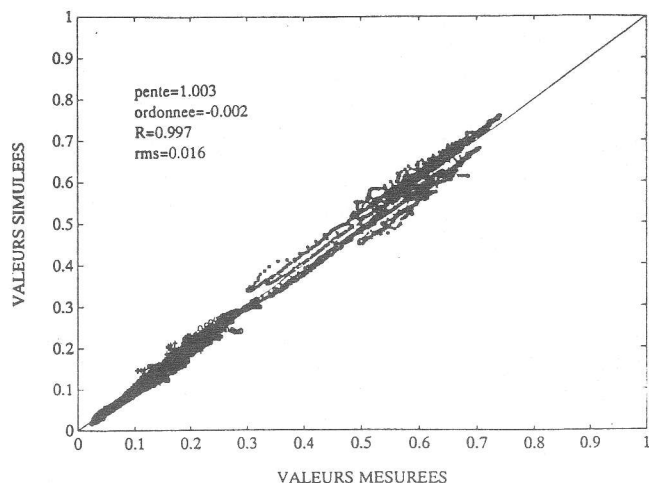


Figure 5: Réflectance observée et estimée par le modèle (+ sol argileux o terreau \* sable)

(fig. 3) réfléchit peu le visible alors que la réflectance s'accroît fortement dans le proche infrarouge (Ref. 2). Lors d'un dessèchement, on observe une augmentation de l'albédo de simple diffusion sur tout le spectre, qui se traduit visuellement par un "éclaircissement" du sol.

Il est désormais possible de simuler la réflectance spectrale et directionnelle des sols. La figure (5) montre la capacité du modèle à représenter de façon précise des spectres de réflectance de sols pour des situations de mesure très différentes.

## 5 CONCLUSION

Ce modèle permet de reconstituer avec une bonne précision des spectres de réflectance directionnelle de sols entre 450 nm et 2450 nm. On peut distinguer deux catégories de variables d'entrée: celles qui varient spectralement (albédo de simple diffusion  $\omega$ ) et celles qui sont indépendantes de la longueur d'onde (paramètre de rugosité  $h$  et paramètres de la fonction de phase  $b, c, b'$  et  $c'$ ). Ces derniers sont fonction de l'indice de réfraction des constituants du sol: leur variation spectrale est suffisamment faible pour qu'on puisse les considérer comme constants. Un des avantages du modèle est son inversibilité. On notera cependant la difficulté parfois rencontrée pour séparer le paramètre de rugosité  $h$  et les paramètres de fonction de phase.

Ce modèle nous permet de nous affranchir des conditions de mesure (géométrie d'éclairage et de visée) et de proposer des variables caractéristiques des propriétés optiques intrinsèques des sols. Il reste encore à relier le paramètre  $h$  à la rugosité du sol mesurée ainsi que le paramètre  $\omega$  à l'humidité du sol.

Enfin, les spectres ainsi modélisés vont être intégrés directement dans les modèles de réflectance des couverts végétaux. Ces travaux devraient améliorer notre connaissance de la réflectance spectrale et directionnelle des surfaces naturelles.

**Remerciements:** Ce travail a été financé en partie

par le CNES, le CNRS, l'INRA et l'IFREMER dans le cadre d'une "ATP Télédétection Spatiale 1990". Nous remercions P. Bertuzzi (INRA Science du sol, Montfavet) pour son aide lors des mesures au rugosimètre laser et B. Pinty (LERTS, Toulouse) pour ses conseils.

## 6 BIBLIOGRAPHIE

1. Baret F, Andrieu B, 1989, Calibration procedure used for the "frame" measurements during the 1989 Broom's Barn experiment, note interne INRA, Décembre 1989.
2. Baumgardner MF, Silva LF, Biehl LL, Stoner ER, 1985, Reflectance properties of soils, *Adv. Agron.*, 38:1-44
3. Chandrasekhar S, 1960, *Radiative Transfer*, Dover Publications
4. Cierniewski J, 1987, A model for soil surface roughness influence on the spectral response of bare soils in the visible and near infrared range, *Remote Sens. Environ.*, 23:98-115
5. Cierniewski J, 1989, The influence of the viewing geometry of bare soil surfaces on their spectral response in the visible and near infrared, *Remote Sens. Environ.*, 27:135-142
6. Deering DW, Eck TF, Otterman J, 1990, Bidirectional reflectances of selected desert surfaces and their three-parameter soil characterization, *Agric. Forest Meteorol.*, 52:71-93
7. Escadafal R, 1989, *Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection*, Editions de l'ORSTOM, Etudes et Thèses
8. Hapke B, 1963, A theoretical Photometric function for the lunar surface, *J. Geophys. Res.*, 68:4571-4586
9. Hapke B, 1981, Bidirectional reflectance spectroscopy. 1. Theory, *J. Geophys. Res.*, 86:3039-3054
10. Hapke B, Wells E, 1981, Bidirectional reflectance spectroscopy. 2. Experiments and observations, *J. Geophys. Res.*, 86:3055-3060
11. Hapke B, 1984, Bidirectional reflectance spectroscopy. 3. Correction for macroscopic roughness, *Icarus*, 59:41-59
12. Hapke B, 1986, Bidirectional reflectance spectroscopy. 4. The extinction coefficient and the opposition effect, *Icarus*, 67:264-280
13. Irons JR, Weismiller RA, Petersen GW, 1989, Soil reflectance, in *Theory and Applications of Optical Remote Sensing* (G. Asrar, Ed.), Wiley Interscience, 66-106
14. Jackson RD, Moran MS, Slater PN, Biggar SF, 1987, Field calibration of reference reflectance panels, *Remote Sens. Environ.*, 22:145-158
15. Pinty B, Verstraete MM, Dickinson RE, 1989, A physical model for predicting bidirectional reflectances over bare soils, *Remote Sens. Environ.*, 27:273-288
16. Pinty B, Verstraete MM, 1990, Extracting information on surface properties from bidirectional reflectance measurements, *J. Geophys. Res.* (in press)