

Diffusion de la lumière par des particules minérales

Ali BEDIDI, Bernard CERVELLE

Laboratoire de physique et mécanique des géomatériaux,
université de Marne-la-Vallée,
2, rue de la Butte-Verte, 93166 Noisy-le-Grand cedex.

RÉSUMÉ

Cet article traite de la diffusion et de l'absorption de la lumière visible par une particule minérale isolée de diamètre variant de 0,01 μm à 50 μm . La particule est supposée sphérique et d'indice de réfraction égal à celui de l'hématite (indice ordinaire). En effet, l'hématite, avec la goéthite, est responsable du comportement spectral particulier des sols latéritiques sous l'effet de l'humidité. Les efficacités de diffusion et d'absorption optique ainsi que l'angle d'ouverture ont été calculés. Différents scénarios ont été envisagés : (1) la particule dans l'air ; (2) la particule complètement immergée dans l'eau ; et (3) la particule entourée d'une couche d'eau d'épaisseur finie. Tous les spectres (400-770 nm) ainsi calculés ont été classés en trois groupes granulométriques (0,01-0,1 ; 0,2-2 ; 5-50 μm). Le comportement des spectres calculés (2^e et 3^e scénarios) dépend à la fois du diamètre de la particule et de la longueur d'onde. Un modèle de Hapke simplifié a ensuite été utilisé pour simuler les spectres de réflectance de poudres d'hématite. Le résultat le plus important est la mise en évidence d'une cellule optique élémentaire d'arrangement des particules minérales d'un sol.

MOTS CLÉS : Réflectance — Modèle — Diffusion — Humidité.

ABSTRACT

SCATTERING OF LIGHT BY MINERAL PARTICLES

The interpretation of reflectance spectra requires spectral reflectance models that can be inverted to determine the more fundamental physical properties of these surfaces. This paper deals with the study of the scattering and absorption of light by a single mineral particle where diameter ranges from 0.01 to 50 μm . The particles are assumed to be spherical, and their complex refractive index is assumed to be equal to that of hematite (ordinary indices). Hematite and goethite are responsible for the nonlinear and wavelength-dependent behavior of lateritic soils reflectance spectra upon moistening. The absorption and scattering efficiencies and opening angle were computed for a single sphere. Different scenarios were considered : first, a sphere in the air, second, a sphere in water, and third, a sphere surrounded by a water layer of different thickness. All the computed spectra (400-700 nm) are classified into three diameter groups (0.01-0.1, 0.1-2, and 2-50 μm). The behavior of the calculated spectra (second and third scenarios) depends both on the particle diameter and the wavelength. A simplified Hapke's model was then used to simulate the reflectance spectra of powders of hematite and goethite. The main result is the existence of an optical elementary arrangement cell which is for the soil what a unit cell is for a crystal.

KEYWORDS: Reflectance — Model — Scattering — Moisture.

INTRODUCTION

La spectroscopie en réflectance diffuse est un outil non destructif pour l'étude des surfaces planétaires (télétection) et des surfaces minérales (laboratoire). L'interprétation des spectres de réflectance requiert le développement de modèles analytiques facilement inversibles qui permettraient de déterminer les propriétés physiques fondamentales des surfaces étudiées. De tels modèles peuvent également être utilisés pour la correction de données acquises par télédétection afin de les confronter directement aux données de laboratoire, ou inversement. Plusieurs modèles existent dans la littérature ; parmi ceux-ci, on peut citer le modèle de Kubelka-Munk (FREI et MACNEIL, 1973) et, plus récemment, le modèle de Hapke (1981).

Les spectres de réflectance des surfaces planétaires et des échantillons de laboratoire (poudres minérales, échan-

tillons de sols) dépendent, d'une part, de paramètres intrinsèques comme leur composition minéralogique, et, d'autre part, de paramètres extrinsèques comme la rugosité et l'humidité. Une étude récente (BEDIDI *et al.*, 1992) a montré que l'effet de l'humidité sur les spectres de réflectance de sols latéritiques est non linéaire et dépend de la longueur d'onde. Parmi les effets de l'humidité sur les spectres de réflectance des sols latéritiques étudiés, on note : (1) l'apparition d'une inflexion non présente sur le spectre de l'échantillon sec ; (2) l'accentuation de certaines bandes d'absorption, et (3) le déplacement en longueur d'onde des extréma de réflectance (fig. 1 a et 1 b). En effet, la dépendance en longueur d'onde de l'effet de l'humidité sur les spectres de réflectance des sols latéritiques a été attribuée à la présence de minéraux absorbants (dans le visible, domaine étudié) dans ces sols : hématite et goethite (BEDIDI *et al.*, 1992).

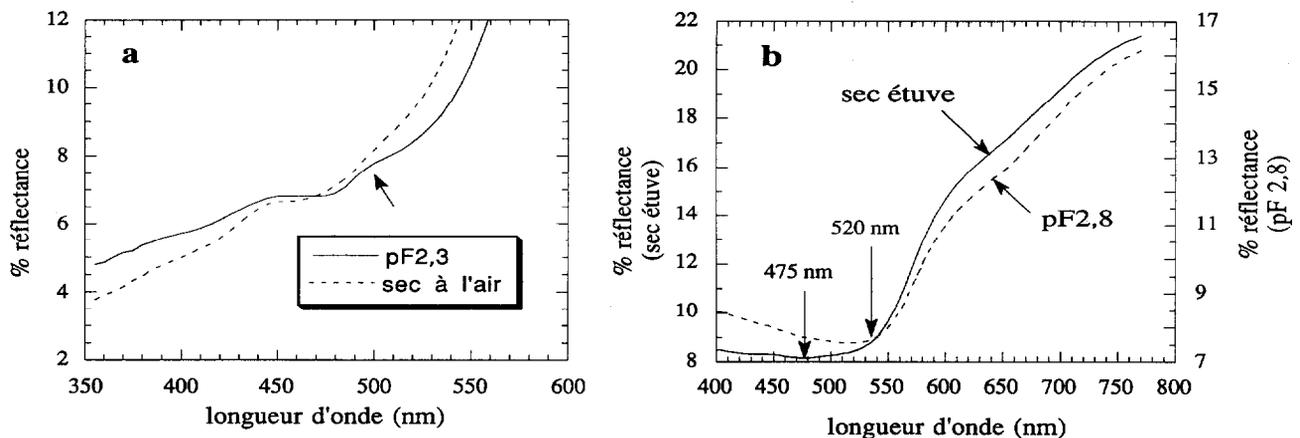


FIG. 1. — (a) Apparition d'une inflexion à 500 nm sur le spectre de réflectance d'un sol latéritique humide. Elle est absente du spectre du sol sec. (b) Déplacement du minimum de réflectance d'un sol latéritique sous l'effet de l'humidité.

(a) Appearance of a shoulder at 500 nm, in a reflectance spectrum of a wet lateritic soil. The shoulder is not visible on the dry soil. (b) Displacement of the minimum of reflectance upon moistening.

Quand un faisceau lumineux rencontre une particule, il perd une partie de son énergie. Il y a atténuation du faisceau. Ce phénomène, appelé extinction, est dû à la fois à la diffusion et à l'absorption. L'absorption signifie que l'énergie lumineuse est transformée en une autre forme d'énergie (énergie calorifique par exemple). La diffusion concerne l'énergie redistribuée dans les différentes directions de l'espace en différentes proportions.

L'une des hypothèses les plus courantes dans les modèles de réflectance consiste à assimiler un sol ou une poudre minérale à une collection de particules ou d'agrégats auxquels sont attribuées des propriétés optiques moyennes. Vérifier cette hypothèse représente un grand intérêt puisque l'organisation d'un sol est une variable importante dont l'effet sur les spectres de réflectance ne peut *a priori* être négligé. Le but de cet article est l'étude de

la diffusion et de l'absorption de la lumière par une particule minérale de diamètre variant de 0,01 μm à 50 μm . Cette granulométrie correspond à celle généralement rencontrée dans les sols et les poudres minérales obtenues par broyage. Les particules sont supposées sphériques, et leur indice de réfraction complexe est pris égal à celui de l'hématite (indice ordinaire). Ce minéral est en partie responsable de l'effet non linéaire de l'humidité sur les spectres de réflectance des sols latéritiques. Les sections efficaces d'absorption et de diffusion ainsi que l'angle d'ouverture ont été calculés en utilisant la théorie de Mie (VAN DE HULST, 1957) dans différents cas : la particule dans l'air (sols secs), la particule dans l'eau (sols saturés en eau) et la particule entourée d'une couche d'eau d'épaisseur variable (sols humides). Les grandeurs calculées, sections efficaces de diffusion et d'absorption ainsi que le dia-

gramme de diffusion aussi appelé fonction de phase (résultats non montrés), ont ensuite été utilisés comme paramètres d'entrée d'un modèle de Hapke simplifié, ceci afin de simuler le spectre de réflectance d'une poudre d'hématite.

THÉORIE

La théorie de la diffusion de la lumière par une sphère étant connue (MIE, 1908), nous avons choisi une particule de forme sphérique. Il est utile de rappeler quelques définitions. Quand la lumière arrive sur une particule, une partie est absorbée et une autre diffusée dans toutes les directions de l'espace. La quantité d'énergie absorbée par cette particule est calculée par l'intermédiaire de la section efficace d'absorption (S_{abs}), surface plane qui, placée perpendiculairement au faisceau incident, intercepte une quantité d'énergie égale à celle absorbée par la particule. De la même manière, on définit la section efficace de diffusion (S_{dif}). On a défini un paramètre (θ_0) appelé angle d'ouverture : il correspond au demi-angle au sommet d'un cône dont l'axe est confondu avec la direction du faisceau incident et contenant 50 % de l'énergie diffusée. Ce cône est ouvert dans la direction de propagation du faisceau incident. θ_0 a été introduit pour la raison suivante : si l'on considère que la lumière est diffusée en moyenne dans une direction perpendiculaire à la direction d'incidence, alors un photon incident rencontrera en moyenne deux particules avant d'émerger d'un milieu particulaire. Mais si l'angle moyen de diffusion vaut 30° , alors le photon rencontrera en moyenne six particules avant d'émerger (BOHREN, 1987). On voit ainsi que la probabilité pour le photon d'être absorbé est multipliée par trois.

À la section efficace de diffusion, qui a la dimension d'une surface, nous allons préférer l'efficacité de diffusion (E_{dif}), rapport de la section efficace de diffusion à la section géométrique de la particule (πR^2 , avec R le rayon de la particule). On définira également l'efficacité d'absorption (E_{abs}) au lieu de la section efficace d'absorption.

L'indice de réfraction complexe de l'hématite a été calculé à partir des formules de Koenigsberger (CERVELLE *et al.*, 1970) et des spectres de réflectance spéculaire de l'hématite mesurés sur un cristal d'hématite placé une première fois dans l'air et une seconde fois dans une huile d'indice de réfraction calibré (*Cargile oil*). Les données des spectres de réflectance spéculaire de l'hématite sont publiées dans *The Data File for Ore Minerals* (CRIDDLE et STANLEY, 1986).

Le modèle de Hapke (1981) donne l'expression de la réflectance diffuse, rapport de l'énergie réfléchie par une surface dans toutes les directions à l'énergie incidente dans une direction fixe, en général perpendiculaire à la surface. La réflectance diffuse ainsi définie dépend de deux paramètres : l'albédo de simple diffusion et le diagramme de

diffusion. L'albédo de simple diffusion est le rapport de la section efficace de diffusion à la somme des sections efficaces de diffusion et d'absorption, le diagramme de diffusion décrit la manière dont l'énergie diffusée est distribuée dans les différentes directions de l'espace. Ce modèle fait aussi intervenir un terme correctif empirique pour tenir compte de l'effet d'opposition. Ce terme a été négligé dans notre étude. On désignera par le modèle de Hapke simplifié le modèle de Hapke sans le terme correctif :

$$R_d = \frac{W}{2} \int_0^1 \frac{\mu}{1+\mu} [p(\mu) + H(1) H(\mu) - 1] d\mu$$

où

R_d : réflectance diffuse ;

w : albédo de simple diffusion ;

p : fonction de phase ou diagramme de diffusion ;

et H est la fonction de Chandrasekhar (voir HAPKE, 1981).

RÉSULTATS

Deux variables représentent un intérêt : le diamètre de la particule (d) et la longueur d'onde (λ). Par conséquent, dans la suite, les résultats seront présentés sous forme de spectres (dépendance de λ) pour chaque diamètre considéré.

Efficacité de diffusion E_{dif}

La figure 2 a montre les spectres de l'efficacité de diffusion (E_{dif}) calculés pour la particule placée dans l'air. Ces spectres peuvent être groupés en trois classes :

(1) les petits diamètres (0,01-0,1 μm) pour laquelle E_{dif} croît avec le diamètre de la particule, suivant une loi en $1/\lambda^{4,25}$ pour $d = 0,01 \mu\text{m}$ et en $1/\lambda^5$ pour $d = 0,1 \mu\text{m}$; cependant E_{dif} reste inférieur à 1 ;

(2) les diamètres intermédiaires (0,2-1 μm) : E_{dif} montre de fortes variations en amplitude et en fonction de la longueur d'onde, atteignant une valeur de 3,5 dans le vert et le rouge ;

(3) les grands diamètres pour lesquels E_{dif} est pratiquement constant (1,30-1,38) sur tout le spectre.

Pour comparer ces résultats à ceux obtenus pour une sphère immergée dans l'eau, nous avons calculé le rapport R_{dif} de l'efficacité de diffusion de la sphère placée dans l'eau à l'efficacité de diffusion de la même sphère placée dans l'air (fig. 2 b). Alors que pour les petits diamètres, placer la sphère dans l'eau résulte en une augmentation de son efficacité de diffusion ($R_{dif} \approx 2$), pour les grands diamètres il résulte une légère diminution de l'efficacité de diffusion ($R_{dif} \approx 0,93$). Pour les diamètres intermédiaires, R_{dif} oscille fortement autour de 1.

La figure 2 c montre les variations de E_{dif} lorsque la sphère est entourée par une couche d'eau, l'ensemble étant placé dans l'air. Le résultat principal est que les variations de E_{dif} en fonction de l'épaisseur de la couche d'eau ne

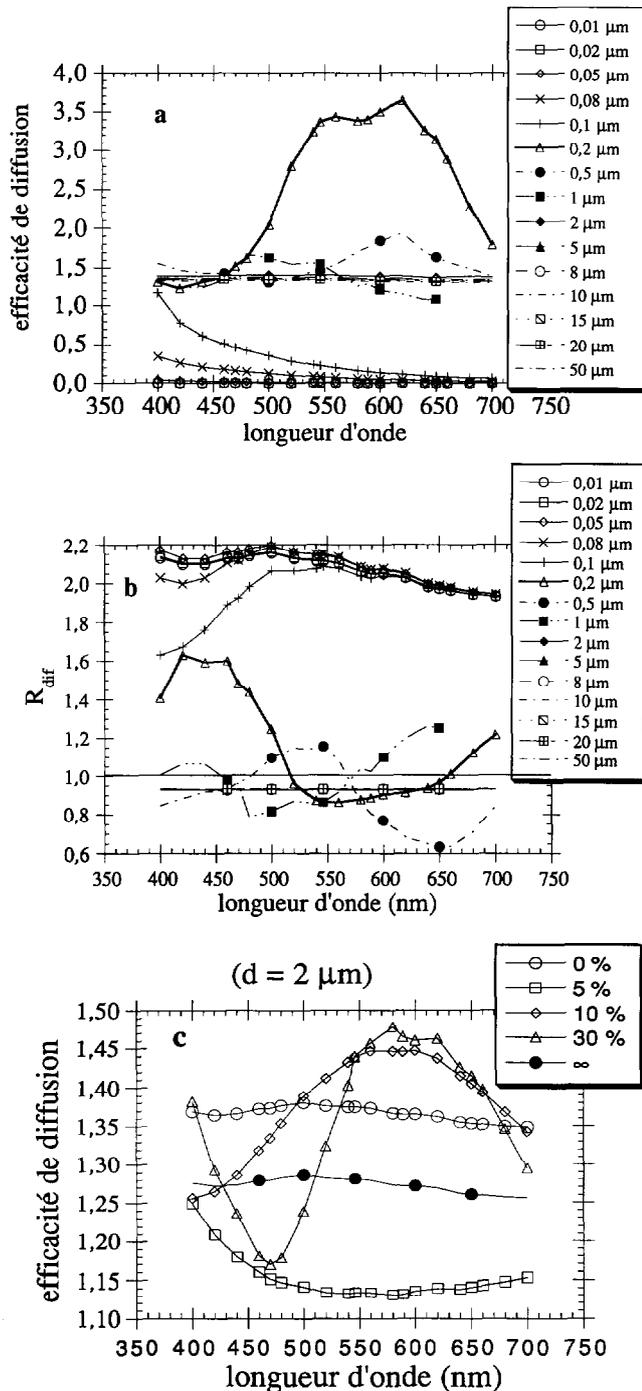


FIG. 2. — (a) Spectre de l'efficacité de diffusion en fonction du diamètre de la particule. (b) R_{air} , rapport de l'efficacité de diffusion calculée pour la particule dans l'eau à l'efficacité de diffusion calculée pour la particule dans l'air. (c) Efficacité de diffusion d'une particule de 2 μm de diamètre entourée d'une couche d'eau. L'épaisseur de la couche d'eau est donnée comme une fraction du diamètre : 0 % (pas de couche d'eau), 5 %, 10 %, 30 % et ∞ (particule complètement immergée dans l'eau).

sont pas monotones. Ceci explique, en partie, la variation non monotone des spectres de réflectance des sols latéritiques sous l'effet de l'humidité.

Efficacité d'absorption E_{abs}

La figure 3 a montre les spectres de l'efficacité d'absorption calculés pour la particule dans l'air ; ici également, on retrouve trois classes : (1) les petits diamètres (0,01-0,1 μm) pour lesquels E_{abs} croît avec le diamètre ; les bandes d'absorption sont accentuées et E_{abs} reste inférieur à 0,5 ; (2) les diamètres intermédiaires pour lesquels E_{abs} montre de fortes oscillations, atteignant une valeur de 1,9 dans le bleu et le rouge pour un diamètre de 0,2 μm ; (3) les grands diamètres pour lesquels E_{abs} reste pratiquement constant sur tout le spectre (0,79-0,87 pour $d = 5 \mu\text{m}$ et 0,71-0,75 pour $d = 50 \mu\text{m}$).

Pour comparer ces résultats à ceux obtenus pour la sphère dans l'eau, le rapport R_{abs} de l'efficacité d'absorption de la sphère placée dans l'eau à l'efficacité d'absorption de la sphère placée dans l'air (fig. 3 b) a été calculé. L'efficacité d'absorption augmente ($R_{\text{abs}} \approx 1,8$) pour les petits diamètres. Pour les grands diamètres, il y a aussi une augmentation de l'efficacité d'absorption, néanmoins plus faible ($R_{\text{abs}} \approx 1,1$). Pour les diamètres intermédiaires, R_{abs} oscille autour de 1 quand la longueur d'onde varie.

La figure 3 c montre les variations du spectre de E_{abs} lorsque la particule est entourée d'une couche d'eau de différentes épaisseurs. Le résultat principal est que les variations de E_{abs} ne sont pas monotones en passant progressivement de la particule dans l'air à la particule complètement immergée dans l'eau. Cette progression s'accompagne également d'une accentuation des caractéristiques spectrales, ce qui est à rapprocher des effets observés sur les spectres de sols latéritiques mouillés (fig. 1 a et 1 b).

Angle d'ouverture θ_0

L'angle d'ouverture décroît quand le diamètre de la particule croît (fig. 4). Il passe de 90° pour $d = 0,01 \mu\text{m}$ à 15° pour $d = 0,5 \mu\text{m}$. Pour de plus grands diamètres, θ_0 est inférieur à $0,5^\circ$ (pas du calcul : $0,5^\circ$). L'angle d'ouverture décroît lorsque la longueur d'onde décroît. Cette diminution aux courtes longueurs d'onde peut expliquer, en partie, la faible réflectance des sols latéritiques à ces longueurs d'onde. On peut aussi montrer que, lorsque la particule est placée dans l'eau, θ_0 décroît et que cette décroissance est relativement plus importante pour les grands diamètres que pour les petits diamètres.

(a) The scattering efficiency spectrum versus the diameter of the particle. (b) R_{air} , the ratio of the scattering efficiency computed for the particle in water to the scattering efficiency computed for the particle in the air. (c) Scattering efficiency of a particle (2 μm diameter) covered by a water layer. The layer thickness is indicated as a percent of the particle diameter : 0 % (no water layer), 5 %, 10 %, 30 %, and ∞ (the particle is completely submerged in water).

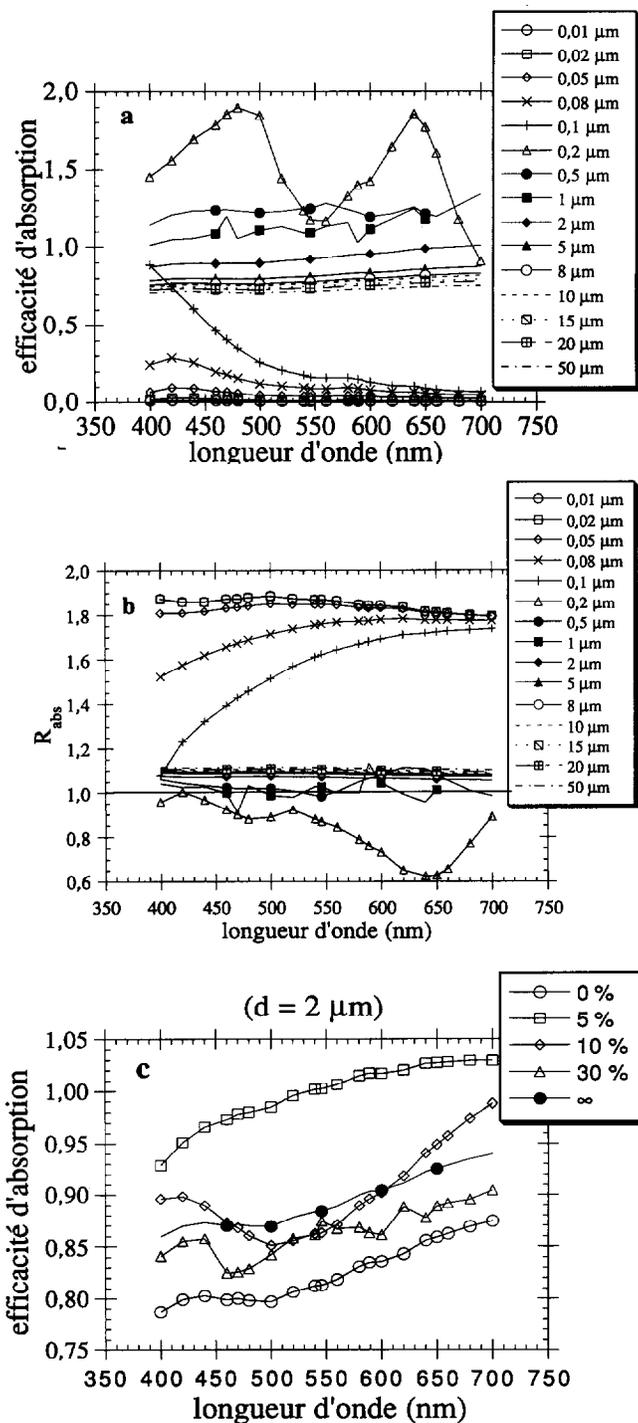


FIG. 3. — (a) Spectre de l'efficacité d'absorption en fonction du diamètre de la particule. (b) R_{abs} , rapport de l'efficacité d'absorption calculée pour la particule dans l'eau à l'efficacité d'absorption calculée pour la particule dans l'air. (c) Efficacité d'absorption d'une particule de $2 \mu\text{m}$ de diamètre entourée d'une couche d'eau. L'épaisseur de la couche d'eau est donnée comme une fraction du diamètre : 0 % (pas de couche d'eau), 5 %, 10 %, 30 % et ∞ (particule complètement immergée dans l'eau).

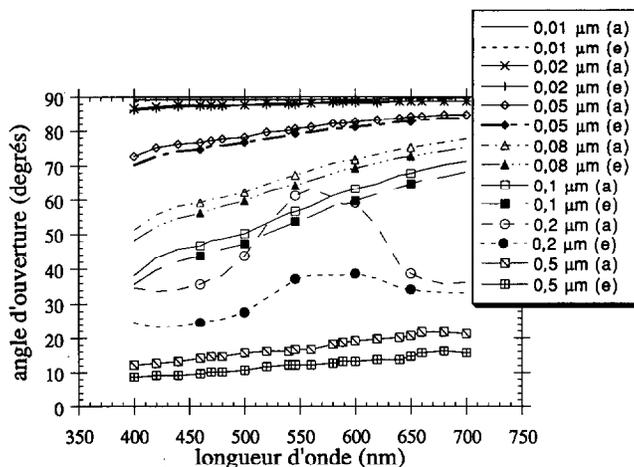


FIG. 4. — Spectre de l'angle d'ouverture calculé pour des particules de différents diamètres. Les particules sont entourées d'air (a) ou d'eau (e).

The opening angle spectrum computed for particles of different diameters. The particles are supposed to be placed in air (a) and in water (e).

SIMULATION DES SPECTRES DE RÉFLECTANCE

Pour un albédo de simple diffusion (rapport de l'efficacité de diffusion à la somme des efficacités de diffusion et d'absorption) constant, une diminution de l'angle d'ouverture entraînerait une diminution de la réflectance, comme cela a été expliqué plus haut. De la même manière, pour un angle d'ouverture constant, une décroissance de l'albédo de simple diffusion entraînerait une diminution de la réflectance. On a vu que ces deux paramètres dépendent à la fois de la longueur d'onde et du diamètre de la particule : il existe donc une relation entre les deux qui est fonction du diamètre de la particule considérée et de la longueur d'onde. Pour comprendre l'effet des variations de l'albédo de simple diffusion ainsi que de l'angle d'ouverture (ou du diagramme de diffusion) sur le spectre de réflectance d'une poudre minérale ou à fortiori d'un sol, il faudrait utiliser un modèle de réflectance. En l'occurrence, le modèle de Hapke a été utilisé pour simuler la réflectance diffuse d'une poudre d'hématite. Les calculs montrent que le spectre simulé est très différent du spectre mesuré (fig. 5) bien que certains comportements, tel le croisement des spectres des échantillons sec et humide, aient été retrouvés sur les spectres simulés.

(a) The absorption efficiency spectrum versus the diameter of the particle. (b) R_{abs} , the ratio of the absorption efficiency computed for the particle in water to the absorption efficiency computed for the particle in air. (c) Absorption efficiency of a particle ($2 \mu\text{m}$ diameter) covered by a water layer. The layer thickness is indicated as a percent of the particle diameter : 0 % (no water layer), 5 %, 10 %, 30 %, and ∞ (the particle is completely submersed in water).

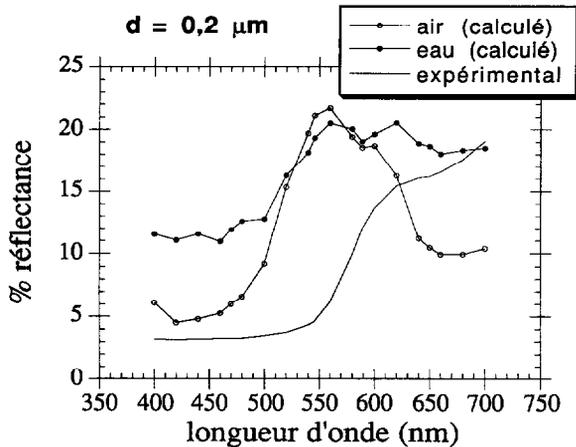


FIG. 5. — Spectres de réflectance de poudres d'hématite. Air (calculé) : spectre simulé d'une poudre de particules sphériques de $0,2 \mu\text{m}$ de diamètre placées dans l'air. Eau (calculé) : spectre simulé d'une poudre de particules sphériques de $0,2 \mu\text{m}$ de diamètre placées dans l'eau. Expérimental : spectre expérimental d'une poudre d'hématite synthétique.

Reflectance spectra of hematite powders. Air (calculé) : computed spectrum of spherical particles powder ($0.2 \mu\text{m}$ diameter) placed in the air. Eau (calculé) : computed spectrum of spherical particles powder ($0.2 \mu\text{m}$ diameter) placed in water. Expérimental : experimental spectrum of a powder of synthetic hematite.

DISCUSSION

Le diamètre de la particule

Pour une petite particule dont le diamètre varie de $0,01 \mu\text{m}$ à $0,1 \mu\text{m}$, on peut considérer que la particule est soumise à un champ électrique quasi uniforme et quasi statique. D'une part, le temps que met l'onde électromagnétique pour se propager à travers la particule est de l'ordre de $\tau_1 = nd/c$, où n est la partie réelle de l'indice de réfraction de la particule, d son diamètre et c la vitesse de la lumière. La période de l'onde est $\tau = 1/2\pi f$, où f est la fréquence de l'onde ; donc, si $\tau_1 \ll \tau$ ($2\pi nd/\lambda \ll 1$), toutes les régions de la particule reçoivent l'information du champ électrique quasiment en même temps. D'autre part, si la partie imaginaire k de l'indice de réfraction est tel que $2\pi kd/\lambda \ll 1$, alors le champ électrique peut être considéré comme uniforme à l'intérieur de la particule. Ces deux conditions s'écrivent $|m| d \ll \lambda$, où $m = n+ik$ est l'indice de réfraction imaginaire, et le produit $|m| d$ est appelé la dimension optique. Dans ces conditions, la particule peut être considérée comme un dipôle et la diffusion de la lumière suit les lois de Rayleigh : la section efficace de diffusion est proportionnelle à $1/\lambda^4$, et la diffusion se fait de manière symétrique relativement à l'axe du dipôle qui est perpendiculaire à la direction de l'onde incidente. En effet, la classe des « petits diamètres » suit des lois proches

de celles de Rayleigh, l'écart étant dû au fait que ces diamètres ne sont pas optiquement assez petits.

Pour les particules de diamètre intermédiaire ($0,2-2 \mu\text{m}$), la dimension optique est de l'ordre de la longueur d'onde ce qui entraîne des phénomènes d'interférences complexes. Par exemple, pour la particule de diamètre $0,2 \mu\text{m}$, le rapport de la dimension optique à la longueur d'onde est compris entre 0,67 et 1,1 sur tout le domaine spectral du visible, ce qui explique les fortes oscillations observées sur les spectres de E_{dir} et E_{abs} .

Les particules à grand diamètre ont une dimension optique grande devant la longueur d'onde. L'optique géométrique peut être appliquée et la grande diffusion vers l'avant ($\theta_0 < 0,5^\circ$) peut être expliquée simplement par la diffraction.

Opacité de l'hématite

Contrairement à une idée reçue qui dit que les matériaux absorbants diffusent la lumière vers l'arrière, les calculs présentés ci-dessus montrent clairement que les particules d'hématite absorbantes diffusent la lumière plutôt vers l'avant. Il y a souvent confusion entre la diffusion par une particule de petite dimension et la réflexion par un plan. En effet, la réflexion par un plan d'un matériau absorbant diffuse bien la lumière vers l'arrière comme peuvent le montrer facilement les lois de Fresnel.

Simulation des spectres

Le modèle de Hapke lie la réflectance d'une poudre minérale à ses propriétés moyennes w et p . Il suppose donc que ces deux propriétés moyennes existent. Ce modèle a été validé pour les sols par PINTY *et al.* (1989). Plusieurs travaux (JACQUEMOUD *et al.*, 1991 ; MUSTARD et PIETERS, 1989 ; HELFENSTEIN et VEVERKA, 1987) confirment l'existence de ces propriétés moyennes. En effet, ces travaux montrent que la procédure suivante donne de bons résultats :

1) on prend les spectres de réflectance de deux poudres minérales et on inverse le modèle de Hapke pour calculer les albédos moyens de simple diffusion (w_1 et w_2) et les diagrammes de diffusion moyens (p_1 et p_2) des deux poudres ;

2) on calcule l'albédo de simple diffusion moyen (w) et le diagramme de diffusion moyen (p) d'un mélange des deux poudres. w et p sont les moyennes pondérées de w_1 , w_2 et de p_1 , p_2 respectivement ;

3) on simule le spectre de réflectance du mélange à partir de w et p en utilisant le modèle de Hapke.

Les spectres ainsi simulés sont en bon accord avec les spectres expérimentaux des mélanges. On en déduit également que les propriétés moyennes d'un mélange de poudres minérales sont les moyennes pondérées des propriétés moyennes des poudres le constituant.

HAPKE (1981) considère que ces propriétés moyennes d'une poudre sont les moyennes pondérées des propriétés des particules individuelles la constituant. Or les spectres simulés, à partir du modèle de Hapke, d'une poudre de particules sphériques ayant l'indice de réfraction de l'hématite diffèrent fortement des spectres expérimentaux de telles poudres. On en déduit que cette dernière hypothèse est incorrecte. Cependant cela permet de conclure à l'existence dans une poudre d'un domaine de cohérence auquel on attribuera les propriétés moyennes w et p de la poudre. En d'autres termes, la diffusion et l'absorption de la lumière se fait d'une manière cohérente à l'intérieur de ce domaine, c'est-à-dire que l'on doit tenir compte de la phase et de la polarisation de la lumière. En revanche, les différents domaines constituant la poudre sont optiquement indépendants entre eux.

De même pour un sol, on en déduit qu'il existe une cellule élémentaire d'arrangement des particules minérales qui serait pour le sol ce que la maille élémentaire est pour un cristal. Cette conclusion est confirmée par l'observation expérimentale suivante : des sols ayant pratiquement la même composition minérale peuvent avoir des couleurs différentes, certains sols latéritiques changeant même de couleur lorsque les agrégats le constituant sont désagrégés.

CONCLUSION

Les efficacités de diffusion et d'absorption calculées dépendent du diamètre de la particule considérée. Il y a trois classes de diamètres : (1) les petits diamètres

($\leq 0,1 \mu\text{m}$) pour lesquels l'efficacité de diffusion augmente avec le diamètre et suit une loi proche de la loi de Rayleigh ($1/\lambda^{4.25-5}$); (2) les diamètres intermédiaires ($0,2-2 \mu\text{m}$) pour lesquels E_{dif} et E_{abs} varient fortement en fonction de la longueur d'onde ; et (3) les grands diamètres ($>2 \mu\text{m}$) pour lesquels E_{dif} et E_{abs} varient faiblement en fonction et du diamètre et de la longueur d'onde.

Sous l'effet de l'humidification, c'est-à-dire quand le milieu d'immersion est l'eau, E_{dif} et E_{abs} subissent des variations qui sont fonction et du diamètre et de la longueur d'onde. Ces variations ne suivent pas de lois simples.

Des particules ayant l'indice de réfraction de l'hématite diffusent la lumière pratiquement vers l'avant, et cette diffusion vers l'avant dépend fortement du diamètre des particules mais très peu de la longueur d'onde.

Les spectres simulés pour une poudre d'hématite diffèrent fortement des spectres expérimentaux. Néanmoins, certaines caractéristiques (croisement des spectres correspondant aux poudres sèche et humide, et dépendance en longueur d'onde de l'effet de l'humidité) observées sur les spectres expérimentaux ont été retrouvées sur les spectres simulés.

Une cellule optique élémentaire d'arrangement des particules existe, elle est pour un sol ce que la maille est pour un cristal. L'albédo de simple diffusion moyen ainsi que le diagramme de diffusion moyen, généralement calculés par inversion du modèle de Hapke, peuvent être attribués à cette cellule optique élémentaire.

Manuscrit accepté par le Comité de rédaction le 30 janvier 1995.

BIBLIOGRAPHIE

- BEDIDI (A.), CERVELLE (B.), MADEIRA (J.), POUGET (M.), 1992. — Moisture effects on visible spectral characteristics of lateritic soils. *Soil Sci.*, 153 (2) : 129-141.
- BOHREN (C.F.), 1987. — *Clouds in a glass of beer*. New York, John Wiley.
- CERVELLE (B.), CAYE (R.), BILLARD (J.), 1970. — Détermination de l'ellipsoïde complexe des indices de cristaux uniaxes fortement absorbants : application à la pyrrhotite hexagonale. *Bull. Soc. Fr. Minéral. Cristallogr.*, 93 : 72-82.
- CRIDDLE (A.J.), STANLEY (C.J.), 1986. — *The quantitative data file for ore minerals, of the commission on ore microscopy of the International Mineralogical Association*. London, British Museum, National History, second issue.
- FREI (R.W.), MACNEIL (J.D.), 1973. — *Diffuse Reflectance in Environmental Problem-Solving*. Cleveland, Ohio, CRC Press.
- HAPKE (B.), 1981. — Bidirectional reflectance spectroscopy, 1, Theory. *J. Geophys. Res.*, 86 (B4) : 3039-3054.
- HELFFENSTEIN (P.), VEVERKA (J.), 1987. — Photometric properties of lunar terrains derived from Hapke's equation. *Icarus*, 72 : 342-357.
- JACQUEMOUD (S.), BARET (F.), HANOCQ (J.F.), 1991. — « Validation d'un modèle de réflectance spectrale et directionnelle de sol ». In : *Proceedings of the 5th International Colloquium — Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, ESA SP-319 : 427-430.

- MIE (G.), 1908. — Beiträge zur optic trüber medien speziell kolloidaler metallösungen. *Ann. Phys.*, 25 : 377.
- MUSTARD (J.), PIETERS (C.M.), 1989. — Photometric phase functions of common geologic minerals and application to quantitative analysis of mineral mixture reflectance spectra. *J. Geophys. Res.*, 94 (B10) : 13619-13634.
- PINTY (B.), VERSTRAETE (M.M.), DICKINSON (R.E.), 1989. — A physical model for predicting bidirectional reflectance over bare soil. *Remote Sens. Environ.*, 27 : 273-288.
- VAN DE HULST (H.C.), 1957. — *Light scattering by small particles*. New York, John Wiley & Sons.