

## Le spectroradiomètre de terrain : un outil de la télédétection et de la pédologie

Richard ESCADAFAL (1), Christophe GOUINAUD (2), Renaud MATHIEU et Marcel POUGET (3)

(1) Orstom, BP 434, 1004 El Menzah, Tunisie.

(2) Laboratoire Image, ENST, 46, rue Barrault, 75634 Paris cedex 13, France.

(3) Orstom, Cas. 53390, Correo Central, Santiago, Chili.

### RÉSUMÉ

*Les différences de réflectance spectrale entre sols permettent de les discriminer plus ou moins bien depuis l'espace, selon les capteurs utilisés. La réflectance est une donnée essentielle en télédétection, mais sa mesure était jusqu'à présent réalisée surtout en laboratoire. Les relations entre la réflectance spectrale, la couleur et la composition des sols passées en revue dans cet article montrent l'intérêt de son étude d'un point de vue pédologique. Les nouveaux instruments de terrain que sont les spectroradiomètres portables permettent de mesurer facilement cette grandeur in situ, améliorant la caractérisation spectrale pour les applications à la télédétection. Mais ils permettent aussi de mesurer la couleur des sols et l'intensité d'absorptions caractéristiques de certains composants tels les oxy-hydroxydes de fer, ouvrant de nouvelles perspectives dans l'étude des couvertures pédologiques en place et dans le suivi de leur évolution. Deux essais de faisabilité illustrent cet apport potentiel de la spectroradiométrie aux études pédologiques de terrain.*

**MOTS CLÉS :** Spectroradiométrie — Propriété spectrale des sols — Couleur — Composition des sols — Prospection pédologique.

### ABSTRACT

THE FIELD SPECTROMETER: A TOOL FOR REMOTE SENSING AND FOR SOIL SCIENCE

*Differences in spectral reflectance allow to discriminate soils from space, more or less successfully according to the type of sensor used. Spectral reflectance is currently mainly measured in the laboratory. Relationships with colour and soil composition reviewed in this paper show that spectral reflectance has also a strong significance for soil science. New portable spectroradiometers allow to measure it in the field, improving the soil spectral characterization for remote sensing purposes. But they also allow to measure precisely soil colour as well as absorption features related to specific soil components such as iron oxides. This opens new prospects in the field study of soil mantles and in the monitoring of soil changes. Two feasibility trials illustrate this potential of field spectroradiometry for ground-based soil studies.*

**KEYWORDS:** Spectroradiometry — Soil spectral properties — Colour — Soil composition — Soil survey.

## INTRODUCTION : L'ÉTUDE DE LA RÉFLECTANCE SPECTRALE

La principale source d'information que nous avons sur les objets qui nous entourent est la façon dont ils réfléchissent la lumière solaire : leur clarté, leur couleur, leur aspect. L'œil est notre capteur dédié à cette fonction, mais des instruments de mesures nous permettent de quantifier le pourcentage de rayonnement réfléchi en fonction de la longueur d'onde, notamment. C'est la réflectance spectrale, qui est en lien direct avec la couleur et peut nous renseigner sur la composition des objets, notamment des sols, comme nous allons le voir.

Les spectroradiomètres sont une nouvelle génération d'instruments qui permettent maintenant de réaliser facilement des mesures de réflectance sur le terrain, ouvrant de nouvelles perspectives en télédétection et en pédologie.

### Notion de signature spectrale

L'utilisation la plus immédiate d'une image de télédétection (photographie aérienne ou satellite) est l'identification d'objets par leur contour en deux dimensions (rivière, piste d'aéroport). Dès que la forme n'est plus un critère suffisant, l'existence de différents canaux apporte une information spectrale qui permet parfois la détermination directe de classes d'objets. C'est le cas par exemple des images en fausses couleurs où la végétation active apparaît en rouge vif. En dehors de ces exemples bien connus, de nombreuses situations intermédiaires se rencontrent dans la nature. Bien souvent, les objets de la surface terrestre ne peuvent être identifiés dans les images qu'en combinant les critères de forme, texture et contenu spectral.

L'étude des signatures spectrales est basée sur la propriété qu'ont des objets différents d'interagir avec le rayonnement électromagnétique de façon différente, propriété qui peut être utilisée pour les discriminer, notamment depuis l'espace. Dans le cas des sols, qui ne sont généralement pas identifiables par une texture d'image particulière, la signature spectrale est un critère très important, qui a fait l'objet de travaux récents, notamment à l'Orstom (voir les travaux de ESCADAFAL, MADEIRA, MOUGENOT, POUGET, cités dans la suite de l'exposé).

Dans cet article nous nous intéressons à la caractérisation des signatures spectrales dans le domaine du rayonnement solaire réfléchi par la surface de la Terre (visible à moyen infrarouge). C'est dans ce domaine optique que l'on dispose actuellement du plus grand nombre de données de télédétection.

De plus, si l'étude de spectres de réflectance de sols est issue de la télédétection, la possibilité récente de la réaliser directement grâce aux spectroradiomètres portables ouvre également de nouvelles applications pour la caractérisation des sols sur le terrain.

## Signatures spectrales des sols

Les spectres de sols ont été étudiés dès les débuts de la télédétection quantitative et la forme générale en a été bien décrite par CONDIT (1970) à partir de mesures en laboratoire sur une large série d'échantillons de sols variés. Les différents travaux qui ont suivi ont confirmé ces observations, nous en rappelons les principaux résultats (STONER *et al.*, 1980 ; COURAULT *et al.*, 1988 ; ESCADAFAL, 1990). La figure 1 présente des exemples de courbes de sols observées dans le domaine visible à proche infrarouge (VIS-PIR).

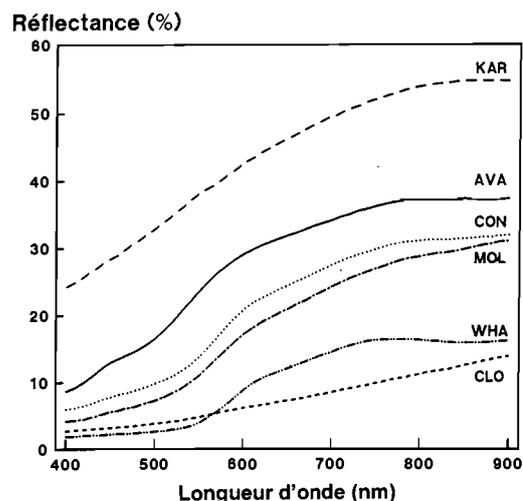


FIG. 1. — Exemples de courbes de réflectances spectrales de sols dans le domaine visible à proche infrarouge. (KAR : sol sableux clair ; AVA, CON, MOL : sols riches en fer ; WHA : sol organique à oxydes de fer ; CLO : sol très organique ; d'après ESCADAFAL et HUETE, 1992).

*Examples of soil reflectance spectra observed in the visible to near-infrared range. (KAR : light colored sandy soil ; AVA, CON, MOL : iron-rich soils ; WHA : organic soil with iron oxides ; CLO : highly organic soil ; after ESCADAFAL et HUETE, 1992).*

Globalement, la réflectance des sols varie beaucoup en amplitude moyenne. En effet, il existe toute la gamme des situations entre les sols très clairs qui réfléchissent fortement le rayonnement solaire (très sableux, très calcaires, ou encore gypseux...) et les sols très foncés qui absorbent la majorité du rayonnement (très argileux, riches en matières organiques).

### COULEUR ET FORME DES SPECTRES

La notion de couleur peut paraître un peu « artistique » dans le contexte d'une approche scientifique ; en fait il n'en est rien, puisqu'elle a suscité le développement d'une branche particulière de l'optique, la *colorimétrie*, dont les équations complexes sont intensément utilisées, tant dans

l'industrie des colorants et peintures qu'en photographie, vidéo, télévision, imprimerie, etc. (voir le volumineux traité de WYSZECKI et STILES, 1982). En appliquant quelques-uns de ses principes, nous avons pu mettre en évidence des relations simples entre couleurs et propriétés spectrales des sols (ESCADAFAL *et al.*, 1988).

Pour résumer, la coloration d'un objet est la sensation visuelle d'une absorption. En effet, un corps qui reflète la lumière dans toutes les longueurs d'onde de manière égale est incolore (blanc ou gris). La coloration est donc liée à la forme « non plate » du spectre. Nous verrons au paragraphe traitant de la *détermination précise de la couleur* (p. 26) une des applications de la colorimétrie, qui est le calcul de la couleur d'un objet à partir de la réflectance spectrale.

#### SPECTRE VISIBLE ET COMPOSITION DES SOLS

Si la première source de variation de la réflectance des sols est la présence de minéraux clairs ou au contraire de matières organiques absorbant la lumière, il y a également d'autres sources de variations : en règle générale, la réflectance décroît avec la rugosité et l'humidité. La clarté n'est donc un critère suffisant pour déterminer si un sol est organique ou calcaire que dans les cas extrêmes. La forme du spectre est un critère supplémentaire riche en information ; par exemple, les sols organiques ont une courbe concave, alors que les autres ont une courbe plutôt convexe. Par analyse statistique, COURAULT *et al.* (1988) ont montré que l'on peut définir des grands types de sols (organiques, calcaires, riches en fer) en utilisant des classes de forme et de clarté.

Cette première classification n'est cependant pas une détermination de la composition ; les techniques de spectrométrie ont précisément pour objectif de trouver les bandes d'absorption caractéristiques permettant d'identifier des composants particuliers. Ainsi, des catalogues de spectres mesurés au laboratoire sur des échantillons des principaux minéraux sont actuellement disponibles, dont ceux des minéraux courants dans les sols : quartz, carbonates, sulfates, oxydes de fer, minéraux argileux (HUNT, 1977 ; CLARK *et al.*, 1990 ; GROVE *et al.*, 1992).

Parmi ceux-ci, le quartz ou l'illite souvent abondants dans les sols n'ont pas de caractéristiques particulières. Au contraire, les oxy-hydroxydes de fer présentent des absorptions très caractéristiques dans le VIS-PIR. Bien que généralement peu abondants, ils sont responsables des grandes ondulations des spectres de sol et des couleurs qui en découlent. La goethite et l'hématite sont les plus ubiquistes, leurs spectres à l'état pur sont reproduits sur la figure 2. L'hématite doit sa couleur rouge à une forte absorption entre 400 et 580 nm (longueurs d'onde du bleu au vert), alors que la goethite qui absorbe surtout le bleu (400-500 nm) apparaît plus jaunâtre. Les formes des courbes discriminant ici la présence d'hématite et de goethite,

les dérivées de spectres de sols sont une technique pour mettre en évidence ces différences de forme (p. 26).

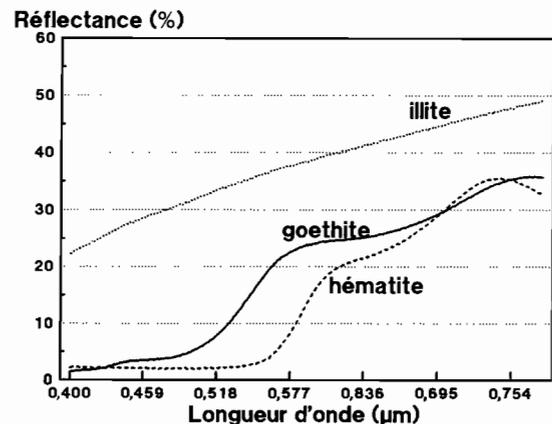


FIG. 2. — Courbes de réflectance dans le domaine visible d'échantillons d'hématite et de goethite comparées à celle de l'illite (données de laboratoire sur minéraux purs, d'après GROVE *et al.*, 1992).

*Reflectance spectra of pure samples of hematite and goethite versus illite (laboratory data on pure minerals, after GROVE *et al.*, 1992).*

#### LES PROPRIÉTÉS SPECTRALES DES SOLS DANS LE MOYEN INFRA-ROUGE (MIR)

Cinq grands types de spectres de sols ont été distingués dans le MIR par COURAULT *et al.* (1988), leur variabilité est plus élevée que dans le visible. Les pics d'absorption observés dans le MIR sont dus essentiellement aux molécules d'eau et aux groupements hydroxyles. L'eau libre présente deux bandes d'absorption autour de 1 400 et 1 900 nm, ce qui ouvre la possibilité de mesurer l'humidité des sols, mais cela a aussi pour effet de rendre l'atmosphère — qui est riche en vapeur d'eau — opaque à ces longueurs d'onde ; on ne peut donc espérer détecter ces absorptions depuis l'espace. Dans le cas de l'eau adsorbée ou incluse, les bandes d'absorption se décalent et s'élargissent, ainsi les minéraux argileux et le gypse présentent plusieurs bandes caractéristiques (fig. 3).

D'après cette figure, on constate que des minéraux fréquents dans les sols sont bien distingués par leur spectre MIR. Ceci n'est pas vraiment une surprise dans la mesure où c'est à cause de son intérêt pour la discrimination des différents minéraux que le développement de la télédétection dans ce domaine spectral a été fortement poussé par la communauté des sciences de la Terre, plus spécifiquement pour la détection de gisements d'intérêt minier (altérations hydrothermales, p. ex.).

Si cet aspect minéralogique a été relativement bien étudié, les caractéristiques spectrales de la matière organique

des sols dans le MIR sont mal connues. Elles ont été peu abordées jusqu'à présent, et il ne semble pas y avoir de bandes d'absorption spécifiques. Avec l'amélioration de

la technologie des instruments de terrain et l'intérêt de la communauté scientifique pour le carbone des sols, on peut prévoir qu'on en saura bientôt davantage...

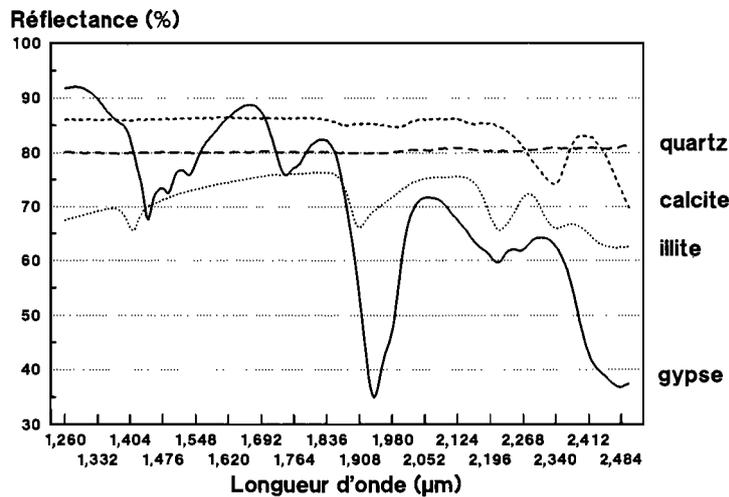


FIG. 3. — Exemples de spectres de minéraux présents dans les sols, mesurés dans le moyen infrarouge (MIR) (données de laboratoire, d'après GROVE *et al.*, 1992).

*Examples of reflectance spectra of minerals present in soils measured in the mid-infrared range (MIR) (laboratory data, after GROVE *et al.*, 1992).*

## MESURES DES PROPRIÉTÉS SPECTRALES DES SOLS

Plusieurs techniques sont actuellement disponibles, on peut les diviser en deux types selon que les mesures sont faites sur de petits échantillons préparés, ou *in situ* ; chacune d'elle a ses limitations. Ne sont évoqués ici que les instruments commercialisés, les agences spatiales (la NASA et le CNES, par exemple) ont par ailleurs développé des prototypes non diffusés.

### Mesures au laboratoire

Comme la plupart des déterminations de caractéristiques de sols, l'approche la plus fiable consiste à prélever des échantillons du sol à étudier, à les préparer selon une procédure standardisée et à leur appliquer un traitement selon un protocole parfaitement contrôlé et reproductible.

Pour assurer cette rigueur, la mesure exacte des propriétés spectrales se fait au laboratoire avec un spectrophotomètre. Un échantillon séché à l'air et tamisé à 2 mm est placé dans un porte-échantillons à l'entrée d'un port de la sphère intégratrice de l'appareil. Grâce à cette sphère, le rayonnement monochromatique qui illumine l'échantillon est diffus. La longueur d'onde de cette source est incrémentée au cours de la mesure (de 360 à 2400 nm avec un pas constant de 1 nm, p. ex.) et le rayonnement réfléchi par l'échantillon est mesuré simultanément. Le rapport du rayonnement réfléchi au rayonnement incident donne le

coefficient de *réflectance spectrale diffuse*. Cette méthode standardisée est utilisée en routine dans l'industrie ; elle a été appliquée aux sols par plusieurs équipes dont les publications contiennent les précisions techniques non détaillées ici (COURAULT, 1986 ; FERNANDEZ et SCHULZE, 1987 ; BEDIDI *et al.*, 1992). STONER *et al.* ont même publié en 1980 un atlas de spectres de sols, mais réalisé à partir de mesures en conditions non standardisées : sols humectés et éclairage non diffus. MOUGENOT (1994) présente des exemples de spectres obtenus au laboratoire sur des mélanges expérimentaux de sol sableux et de sels.

La mesure en laboratoire a le grand avantage d'être strictement reproductible, très précise (résolution de 1 nm) et de couvrir la totalité du spectre solaire jusqu'au moyen infrarouge (MIR). La mesure elle-même est relativement lente, la préparation des échantillons est assez fastidieuse, et surtout elle altère l'organisation originelle du sol. Pour se rapprocher des conditions naturelles, il faut passer aux mesures *in situ*.

### Mesures sur le terrain

Avec l'évolution rapide de la technologie d'acquisition et de stockage des mesures, plusieurs types d'instruments sont actuellement disponibles. Dans la mesure où la date de l'observation de terrain est la plus proche possible de celle du passage du satellite, la mesure *in situ* permet de caractériser le sol tel que le satellite l'observe, dans le même état de rugosité, avec les mêmes éléments grossiers,

débris à la surface, etc. Cependant, ici l'illumination de la surface n'est pas contrôlée. Bien qu'il soit envisageable d'éclairer le sol avec une source artificielle stabilisée et de faire les mesures de nuit, l'éclairage utilisé est toujours le soleil pour des raisons pratiques évidentes et pour se placer dans les conditions de mesure du satellite.

#### LES RADIOMÈTRES PORTABLES

C'est la première génération des instruments de terrain. Un ou plusieurs détecteurs sont équipés de filtres qui permettent la mesure du rayonnement dans différentes parties du spectre (bandes spectrales). Bien entendu, les filtres les plus utilisés sont ceux qui reproduisent les bandes spectrales des satellites courants (3 bandes de Spot pour le radiomètre CIMEL et bandes *Thematic Mapper* pour le radiomètre Barringer, par exemple ; voir description dans BONN et ROCHON, 1992). Ces instruments robustes et simples d'emploi sont couramment utilisés. Ils ont l'inconvénient de ne faire des mesures que dans un nombre limité de bandes correspondant à un type de satellite particulier.

#### LES SPECTRORADIOMÈTRES

L'idéal est de collecter le spectre entier sur le terrain et ensuite de le rééchantillonner si nécessaire dans les bandes spectrales de n'importe quel capteur, présent, futur ou imaginaire. Le spectre complet permet également de faire des calculs colorimétriques, de la spectroscopie dérivative, comme nous le verrons ci-dessous. Cela suppose de caractériser le spectre du sol non plus dans un nombre réduit de bandes, mais par plus de 2000 points si on vise la résolution obtenue au laboratoire...

La première solution technique à ce problème a été de transporter des spectromètres de laboratoire sur le terrain en les adaptant à la mesure en illumination naturelle. Très utiles pour les calibrations fines de sites, ces instruments lents, lourds et encombrants sont totalement inadaptés à la réalisation de campagnes de mesures rapides sur de nombreux sites tests (cas typique d'une banale application de cartographie thématique).

La technologie récente des barrettes de détecteurs, des câbles à fibre optique et la miniaturisation des matériels informatiques a permis de concevoir de nouveaux instruments. Plusieurs couvrent le spectre visible et proche infrarouge, en acquérant simultanément les données dans un nombre élevé de bandes (variant suivant le nombre de détecteurs et le type de barrette qui les équipe). Rapides et légers, ils sont interfacés avec des micro-ordinateurs portables pour le stockage des spectres (cf. p. ex. GOETZ *et al.*, 1991). La technologie progresse actuellement pour réaliser des prouesses techniques comparables dans le MIR, où le signal est beaucoup plus bruité et sensible à la température (faible éclairage solaire dans cette partie du spectre).

Pour les deux types d'instruments, le rayonnement incident peut être mesuré simultanément par un deuxième appareil identique (ou un deuxième capteur inclus dans le boîtier et pointant vers le ciel, cas du CIMEL), ou plus généralement par intervalles avec le même instrument pointant vers une cible de référence (panneau réfléchissant parfaitement rugueux et blanc). La réflectance est alors calculée en divisant les valeurs obtenues sur la surface du sol par celles relevées sur le panneau de référence (pour les détails opératoires, voir p. ex. HUETE et ESCADAFAL, 1991).

Plus précisément, la grandeur mesurée est le *facteur de réflectance bidirectionnelle* (FRB), caractérisé par deux directions, celle de l'éclairage (élévation et azimut solaire) et celle de la visée (MILTON, 1987). Dans le cas d'une surface idéalement diffusante (réflecteur *lambertien*), la valeur du FRB serait constante quels que soient ces angles, et directement reliée à celle de la réflectance diffuse. En réalité, du fait de la rugosité de la surface des sols, ce n'est généralement pas le cas. En se basant sur les phénomènes physiques de diffusion de la lumière par les sols (BEDIDI et CERVELLE, 1994) et sur la géométrie de la visée et de la mesure, plusieurs modèles permettent de rendre compte des variations du FRB (voir les articles récents de CIERNIEWSKI et COURAULT, 1993 ; JACQUEMOUD *et al.*, 1994). À noter pour terminer que la proportion d'éclairage direct et diffus dépend des conditions atmosphériques, ces dernières peuvent donc modifier les valeurs de FRB. En considérant la *forme* des spectres, on peut s'affranchir d'un certain nombre de ces sources de variation et comparer des mesures prises dans des conditions différentes.

#### PRATIQUE DE LA SPECTRORADIOMÉTRIE DE TERRAIN

##### Le spectroradiomètre utilisé

L'instrument que nous utilisons actuellement est le *Personal Spectrometer* de la société Analytical Spectral Devices. Notre choix s'est porté sur cet appareil bien qu'il ne couvre que le domaine VIS-PIR, car il présente le grand avantage d'être très peu encombrant et facile d'emploi (ceci ne constitue pas pour autant une recommandation par les auteurs). Les mesures citées en dernière partie ont été obtenues avec cet appareil.

Il est constitué d'un petit boîtier autonome contenant le détecteur alimenté par une batterie amovible rechargeable. Un câble optique à fibres de verre anhydres capte le rayonnement de l'objet mesuré et le conduit dans le boîtier où il est dispersé par un réseau sur le détecteur à barrette de 512 éléments. Le champ de visée du capteur est modifiable (de 18° à 1°) par un jeu de tubes interchangeables, placés à l'extrémité libre du câble de fibres optiques (fig. 4).

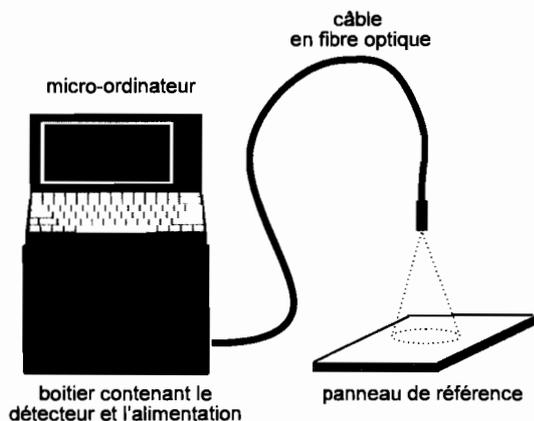


FIG. 4. — Schéma du spectroradiomètre portable utilisé. Les mesures sont faites alternativement sur le panneau de référence et sur la surface du sol.

*Schematic diagram of the portable spectrometer used. Measurements are performed alternately over the reference panel and over the soil surface.*

Le signal mesuré est envoyé dans un micro-ordinateur qui pilote le détecteur et enregistre les mesures entre 340 et 1100 nm environ (les valeurs exactes sont précisées après calibration). Un logiciel dédié fourni par le constructeur permet de modifier les paramètres d'acquisition et d'enregistrement. En sortie on obtient ici des valeurs de luminance de l'objet mesuré exprimé en comptes numériques, sous la forme de fichiers binaires (format propriétaire).

### Principe des mesures des réflectances

#### CONDITIONS DE MESURES

Pour limiter les effets directionnels, nous avons cherché à reproduire les conditions de prise de vues des images satellite, qui sont pour la plupart en visée quasi-nadirale (à la verticale  $\pm 5^\circ$ ) et prises vers 10 h du matin (élevations solaires moyennes).

La mesure du rayonnement incident, indispensable au calcul de la réflectance, ne peut être simultanée à celle de la surface étudiée, l'appareil utilisé ne permettant qu'une mesure à la fois. Il faut donc choisir de travailler par temps clair, où l'éclairement solaire peut être considéré comme stable pendant la durée de la séquence de mesures (ou tout au moins la variation peut en être aisément calculée). Il faut particulièrement se méfier des nuages de haute altitude (type cirrus) qui ne sont pas toujours visibles à l'œil nu, mais qui ont un effet certain sur l'intensité et la composition du rayonnement atteignant le sol. Le meilleur moyen de s'assurer de la stabilité de l'éclairement est de surveiller, sur l'écran du micro-ordinateur pilotant le spectromètre, la forme du spectre de luminance mesuré en temps réel sur le panneau de calibration.

#### PANNEAUX DE CALIBRATION

Pour mesurer le rayonnement incident, nous utilisons des panneaux de référence, présentant un produit blanc en surface, réfléchissant la totalité du rayonnement incident (idéalement). Les mesures sur l'échantillon de sol et sur le panneau sont faites dans les mêmes conditions de visée verticale, le calcul de la réflectance s'en trouve par la suite simplifié (fig. 4). En pratique, des enduits à base de sulfate de baryum permettent de fabriquer des panneaux de calibration à un coût modeste. Nous en avons utilisé un de ce type sur le terrain, comme calibration secondaire. Un panneau formé de carreaux de halon, spécialement conçu à cet usage, plus lourd et plus onéreux mais plus proche de l'idéal de 100 % de réflexion et calibré en laboratoire, a été utilisé comme calibration primaire. Il nous a permis de mesurer les caractéristiques exactes du panneau secondaire (fig. 5) et d'en tenir compte dans les calculs (voir annexe).

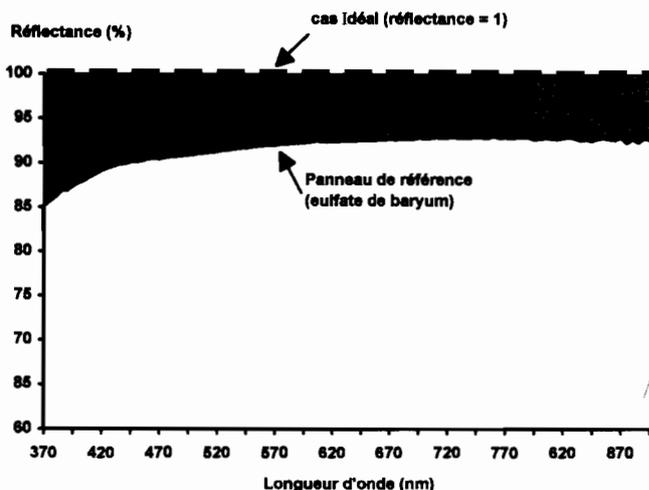


FIG. 5. — Courbe de réflectance spectrale du panneau de référence, couvert de sulfate de baryum utilisé sur le terrain. L'écart observé par rapport au cas idéal est pris en compte dans les calculs réalisés par le logiciel dédié (SpecPro).

*Reflectance spectrum of the baryum sulphate-coated panel used as reference in the field. The deviation from ideal reflectance of 1 is taken into account while processing data with the dedicated software (SpecPro).*

#### TYPES DE MESURES NÉCESSAIRES

D'après ce qui précède, deux mesures sont nécessaires pour pouvoir calculer la réflectance d'un échantillon de surface : mesure de luminance sur panneau, et mesure de luminance sur échantillon (fig. 6). Dans la pratique, pour améliorer le rapport signal/bruit on est amené à faire des répétitions sur chaque objet mesuré et à calculer des moyennes. La luminance est mesurée au début et à la fin de chaque série de mesures, et sa variation est prise en compte dans les calculs (voir annexe).

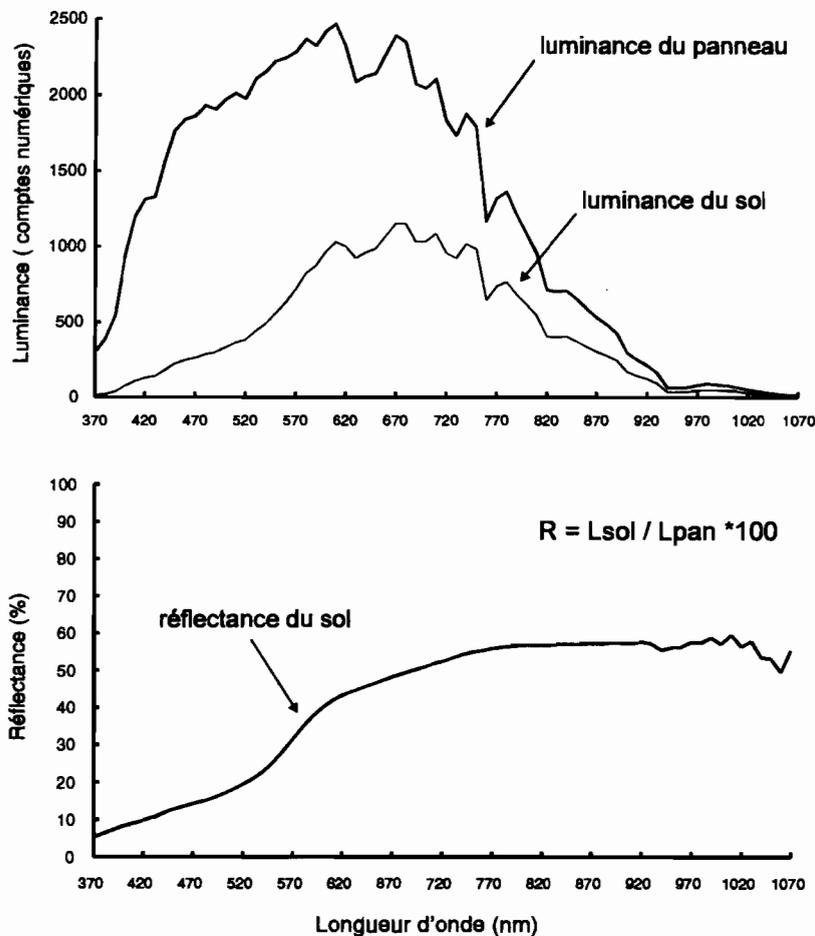


FIG. 6. — Calcul de la réflectance à partir des luminances mesurées sur le sol et sur la cible de référence. À noter, le spectre de réflectance est bruité dans le domaine spectral où la luminance est faible (940-1070 nm).  
*Computing reflectance from radiances measured over the soil and over the reference panel. The reflectance spectrum is affected by noise in the spectral range where radiances are low (940-1070 nm).*

**Stratégie de mesures**

En pratique, la première étape d'une campagne de spectroradiométrie est le choix des sites. Selon les objectifs des mesures, différents critères peuvent être pris en compte : représentativité, accessibilité, précision du repérage, homogénéité du milieu... Dans chaque site, l'ensemble des données sur le milieu et les conditions de mesure est récapitulé sur une fiche.

Les mesures sont réalisées en visée nadirale, le capteur étant au-dessus de la surface du sol. La taille de la surface soumise à la mesure est fonction de l'angle de visée et de la hauteur du capteur. Il est également possible de mesurer la signature spectrale d'un échantillon de surface plus vaste en répétant les mesures le long d'un transect. Les noms des fichiers correspondants aux différents objets mesurés sont reportés dans un tableau.

Les mesures sur chacun de ces objets peuvent être une série de répétitions. Chaque mesure individuelle est enre-

gistrée dans la mémoire de masse du micro-ordinateur sous la forme d'un fichier unique. Le logiciel d'acquisition demande le nom de fichier, puis incrémente l'extension automatiquement d'une valeur après chaque mesure (elle peut varier de 000 à 999).

Le tableau I présente un exemple simple de séquence de mesures, il servira à illustrer le principe du traitement des données.

Dans cet exemple, les mesures sont répétées cinq fois sur chaque objet, pour en calculer une valeur moyenne par la suite. La séquence commence ainsi par cinq mesures au-dessus du panneau de calibration, puis cinq mesures au-dessus d'une surface de sol nu, cinq mesures au-dessus d'une surface couverte de végétation, puis 30 mesures de transect, et enfin cinq mesures sur le panneau de calibration pour terminer. Cette série de 50 spectres de luminance bruts individuels, enregistrés dans les fichiers *site\_1.000* à *site\_1.049*, donnera après traitement trois spectres de-

TABLEAU I  
Exemple de séquence de mesures de terrain  
*Example of measurements sequence*

nom_fichier	ext.deb	ext.fin	Type de mesures	Objet
c:\site_1	000	004	Calibration	Panneau
c:\site_1	005	009	Spectre individuel	sol nu
c:\site_1	010	014	Spectre individuel	plante
c:\site_1	015	044	Transect	steppe
c:\site_1	045	049	Calibration	Panneau

réflectance, un pour le sol, un pour la végétation et un pour le transect.

Mis à part ces calculs de moyennes, plusieurs autres traitements doivent être appliqués aux données brutes pour obtenir les valeurs de réflectance sous une forme exploitable.

## TRAITEMENT DES DONNÉES

### Caractéristiques des mesures

#### LE FORMAT DES DONNÉES

Après une séquence de mesures, l'ensemble des données brutes est déchargé du micro-ordinateur du spectroradiomètre vers un ordinateur PC de bureau. Un utilitaire fourni par le constructeur permet de convertir ces fichiers binaires dans un format texte, rendant les valeurs lisibles. En reprenant l'exemple précédent, on se retrouve ainsi avec 50 fichiers de ce type, qu'il faut manipuler (moyennes, rapports) pour obtenir trois courbes de réflectance

spectrale dans les 512 bandes du capteur. Par ailleurs, la largeur spectrale de ces bandes est telle que le spectre est représenté selon des valeurs non entières de longueur d'onde. Ceci complique la présentation des résultats et, surtout, les calculs ultérieurs dont celui de la réflectance dans les bandes des satellites ; il faut donc prévoir un rééchantillonnage suivant un pas adapté.

#### LE PROBLÈME DU SIGNAL DE FOND

Une autre caractéristique de l'instrument utilisé est de délivrer un signal de fond (*dark current* en anglais) en l'absence de tout rayonnement lumineux. Ce signal de fond est mesuré par l'appareil avant une séquence, puis automatiquement soustrait des mesures suivantes. Cependant, il varie en fonction de la température du détecteur, qui dépend elle-même de la température ambiante et de la durée de fonctionnement de l'appareil. On observe donc une dérive de ce courant au cours du temps, dont il faut tenir compte dans les calculs (fig. 7).

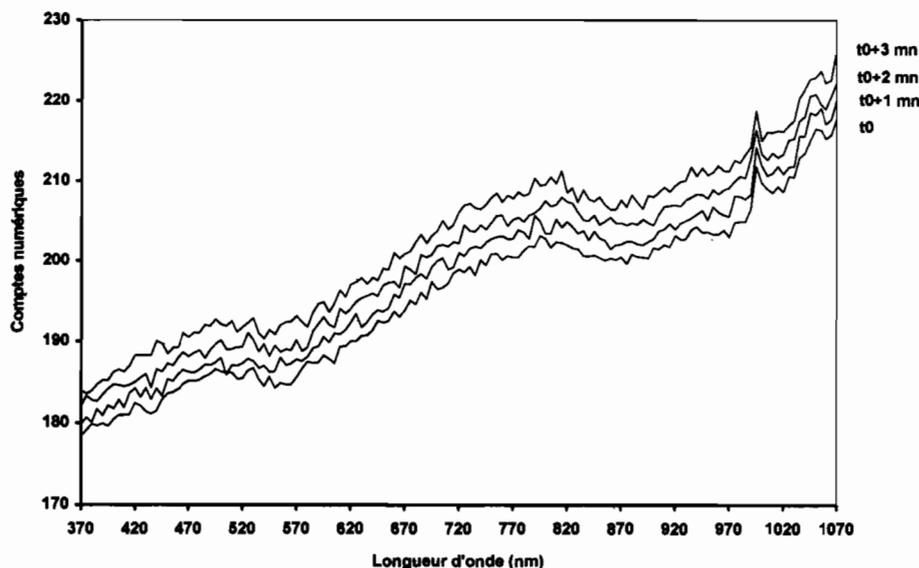


FIG. 7. — Instabilité du détecteur du spectroradiomètre : dérive du signal de fond en fonction des minutes écoulées après la mise en route de l'appareil.

*Instability of the spectrometer : drifting of the dark current with time after turning on the instrument.*

### Mise au point d'un logiciel dédié au traitement des données spectroradiométriques

Pour faciliter la gestion de fichiers de données de luminance bruts et les corrections et calculs nécessaires à leur traitement, un logiciel dédié a été réalisé (SpecPro, pour : SPECTroradiometric data PROCessing). Il répond aux spécifications générales suivantes :

- lecture directe des fichiers binaires de mesures bruts après sélection interactive de l'unité, du chemin d'accès et du nom de fichier ;
- visualisation des spectres bruts ;
- définition de séquences de mesures, avec prise en compte des répétitions ;
- rééchantillonnage dans un nombre quelconque de bandes de largeurs définies par l'utilisateur, dont les bandes des capteurs de satellites ;
- prise en compte des dérives de l'illumination et du signal de fond ;
- réalisation des différents calculs et écriture des résultats dans des fichiers de sortie sous un format « texte », importable dans une base de données ou un tableur.

Les principales fonctionnalités de ce logiciel sont résumées en annexe.

### EXEMPLES D'APPLICATIONS

#### Utilisations des spectres de sols en télédétection

##### RÉFLECTANCE DANS LES BANDES SPECTRALES DE CAPTEURS QUELCONQUES

En la comparant avec les mesures que permettent les simples radiomètres, un des grands intérêts de la spectroradiométrie est qu'à partir des spectres continus il est possible de simuler le signal pour n'importe quel type de capteur de satellite. Ainsi, à titre d'exemple, la figure 8 illustre le calcul de la réflectance d'un sol dans les bandes des instruments *Thematic Mapper* (TM) de Landsat et HRV de Spot par convolution du spectre avec les courbes de transmission des filtres de ces instruments. Il est ainsi possible de comparer les valeurs enregistrées par différents satellites sur une même cible au sol.

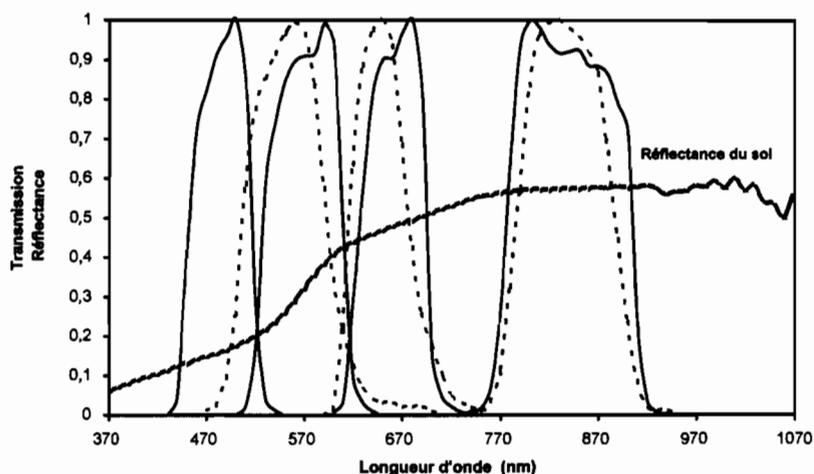


FIG. 8. — Calcul de la réflectance dans les bandes satellitaires par convolution avec les courbes de transmission des capteurs (trait continu : les quatre bandes du Thematic Mapper de Landsat ; pointillé : les trois bandes du HRV de Spot).

*Computing reflectance in satellite bands by convolution with sensors transmission functions (dotted lines : Spot-HRV bands ; solid line : Landsat Thematic Mapper bands).*

#### CALCULS D'INDICES LIÉS AUX PROPRIÉTÉS DES SURFACES

Dans le même esprit de passage du spectre mesuré en continu aux mesures par satellite, les travaux récents ont permis d'établir des relations entre réflectances dans les différents canaux et caractéristiques des sols. Les résultats des études colorimétriques peuvent ainsi être appliqués aux mesures par satellite en utilisant les canaux couvrant le domaine visible, soit les canaux XS1 et XS2 de Spot HRV, ou encore TM1, TM2 et TM3 Landsat TM.

En effet, la variabilité spectrale des sols dans le visible se manifeste par des variations de couleurs qui peuvent

être exprimées en termes d'intensité (I), de saturation (S), et de teinte (H). À cause de la forme monotone croissante des courbes spectrales des sols, une forte corrélation a été mise en évidence entre leurs composantes colorimétriques B, G, R et les valeurs de réflectance dans les bandes spectrales dans le bleu, le vert et le rouge, soit les canaux TM1, TM2 et TM3, respectivement (ESCADAFAL *et al.*, 1989). Les transformations de type ISH appliquées à ces bandes ne sont plus alors simplement un artifice de traitement d'image mais expriment des caractéristiques des spectres de sols (ESCADAFAL, 1993). L'intensité correspond au ni-

veau moyen de réflectance, les deux autres caractérisent l'allure générale du spectre.

#### Indice de COLORATION (ou saturation)

L'équation générale du calcul de la saturation d'une couleur,  $S$  (éq. 1, LIU et MOORE, 1990) est nettement simplifiée dans le cas des surfaces étudiées, puisque la réflectance minimale  $y$  est toujours observée dans la bande bleue (TM1) et le maximum dans la bande rouge (TM3).

$$S = \frac{\max(R,G,B) - \min(R,G,B)}{\max(R,G,B)} \quad (\text{éq.1})$$

La saturation est alors la pente générale de la courbe dans le visible, elle exprime la vivacité de la couleur. L'indice de coloration, IC, est l'application de ce principe (éq. 2).

$$IC = \frac{TM3 - TM1}{TM3} \quad (\text{éq.2})$$

Un indice de coloration similaire basé sur les bandes « vertes » et « rouges » a déjà été proposé (voir par exemple le Redness Index de ESCADAFAL et HUETE, 1991). Cet indice est utilisable avec les données Spot XS, et varie comme l'indice IC, pour une teinte donnée (ESCADAFAL, 1993).

#### Indice de FORME (ou teinte)

La teinte,  $H$ , troisième paramètre décrivant la couleur, dépend des proportions relatives des couleurs primaires  $R$ ,  $G$ ,  $B$  ; son équation générale est assez longue (voir LIU et MOORE, 1990). Dans le cas des surfaces naturelles, sa formulation est à nouveau simplifiée pour les mêmes raisons que pour la saturation (éq. 3).

$$H = \tan^{-1} \frac{(2R - G - B)}{\sqrt{3} \cdot (G - B)} \quad (\text{éq.3})$$

Dans l'application aux données TM, un indice simplifié est proposé qui varie comme la teinte, exprimant la forme de la courbe de réflectance (éq. 4, ESCADAFAL *et al.*, 1994).

$$IF = \frac{2 \cdot TM3 - TM2 - TM1}{TM2 - TM1} \quad (\text{éq.4})$$

En se référant à la notation Munsell familière aux pédologues, les différents indices cités caractérisent donc les sols par leur clarté (indice de brillance), leur pureté (IC) et leur teinte. La détermination de la couleur de la surface des sols depuis l'espace est une aide considérable pour la cartographie pédologique (POUGET *et al.*, 1989 ; ESCADAFAL et GIRARD, 1993). De plus, en exploitant les corrélations entre couleur et teneur des sols en minéraux, des indices « minéralogiques » peuvent être dérivés, tel celui développé par SILVA MADEIRA NETTO (1993) pour la teneur en hématite des sols du Brésil.

#### Indices utilisant le MIR

Le contraste entre canaux visibles et MIR a permis de distinguer des sols arides d'après leur dominante minéralogique en contexte sédimentaire (ESCADAFAL et POUGET, 1989) ; de même SILVA MADEIRA NETTO (1993) a utilisé le contraste entre les deux bandes 5 et 7 de TM pour discriminer les sols de la région de Brasilia selon leur texture. Les données de télédétection dans ce domaine spectral ont été jusqu'à présent limitées à celles du capteur *Thematic Mapper*, mais de nouveaux capteurs sont annoncés (sur Spot 4 et sur les prochaines plates-formes polaires européennes et américaines). Le manque actuel de données de terrain pourra être comblé par les instruments en cours de développement. Les études dans ce domaine spectral riche en informations sur la composition des sols vont donc pouvoir se développer.

#### LES DÉVELOPPEMENTS EN COURS

Le nombre de points de mesures (canaux) décrivant un spectre est faible sur les satellites actuels, leur traitement se limite donc à des combinaisons linéaires simples, les « indices ». L'arrivée d'instruments à nombre de canaux plus élevé, voire mesurant le spectre en continu, va permettre des traitements plus sélectifs, tels l'utilisation des dérivées de spectres (« spectroscopie dérivative », voir p. 26). Les études spectroradiométriques sont donc en plein développement comme en témoigne la littérature récente (voir p. ex. HILL et MÉGIER, 1994).

#### Utilisation des spectroradiomètres pour la caractérisation pédologique

Les spectroradiomètres sont des instruments légers qui peuvent être facilement transportés — nous avons vu que c'est utile du point de vue de la télédétection, mais cela peut intéresser aussi le pédologue. En effet, sur le terrain, en particulier lors de la prospection pour l'analyse de l'organisation des couvertures pédologiques, on cherche à utiliser le maximum d'informations accessibles pour reconnaître les variations des caractéristiques des matériaux (seuils, transitions, gradients, visibles en surface ou dans des tranchées, par exemple).

Si l'humidité, la texture, la structure sont des critères très utilisés, la couleur est certainement un des plus importants. La réflectance spectrale des sols est donc déjà utilisée en prospection pédologique, mais seulement par appréciation visuelle. La possibilité de la mesurer pratiquement en continu est une nouveauté dont nous explorons ici les premières applications les plus évidentes.

#### SUIVI DES VARIATIONS DE LA COUVERTURE PÉDOLOGIQUE LE LONG D'UNE SÉQUENCE

Une des techniques utilisées pour analyser l'organisation spatiale des matériaux pédologiques est l'observation de leurs caractéristiques le long de transects, placés selon la morphologie du paysage. La distribution des horizons

affleurants dans le paysage nous renseigne sur l'organisation interne de la couverture pédologique. Les variations sont souvent subtiles et l'œil n'arrive à les détecter que par comparaison d'échantillons entre eux, sous réserve que l'observateur ait une vision normale des couleurs.

Le spectroradiomètre permet de mesurer les spectres de réflectance à intervalles réguliers et en intégrant une surface de taille que l'on peut facilement faire varier entre 1 cm<sup>2</sup> et quelques m<sup>2</sup>. En se plaçant dans des conditions de mesures comparables, les différences entre des observations même éloignées seront facilement mises en évidence.

À titre d'illustration, un premier essai de faisabilité de ce type d'approche a été tenté au Chili sur un sol développé sur granite dans la région de Melipilla, située à 50 km à l'ouest de Santiago, où une étude pédologique vient d'être

entreprise. Des mesures spectroradiométriques ont été faites à intervalles de 5 m, le long d'un transect dans un champ labouré entre le pied et le sommet d'une petite colline. Les différents spectres obtenus apparaissent en représentation plane sur la figure 9. Les horizons de surface de la partie basse sont plus clairs et grisâtres (présence de matière organique) alors que vers le haut du transect, les valeurs de réflectance sont plus faibles aux courtes longueurs d'onde. Des matériaux plus rouges y affleurent (horizon B, riche en oxyde de fer). Un des intérêts du spectroradiomètre est de mesurer les variations en continu le long du transect, alors que, par exemple, la détermination visuelle de la couleur par référence aux planches de l'atlas Munsell correspond à une discrétisation de l'information spectrale.

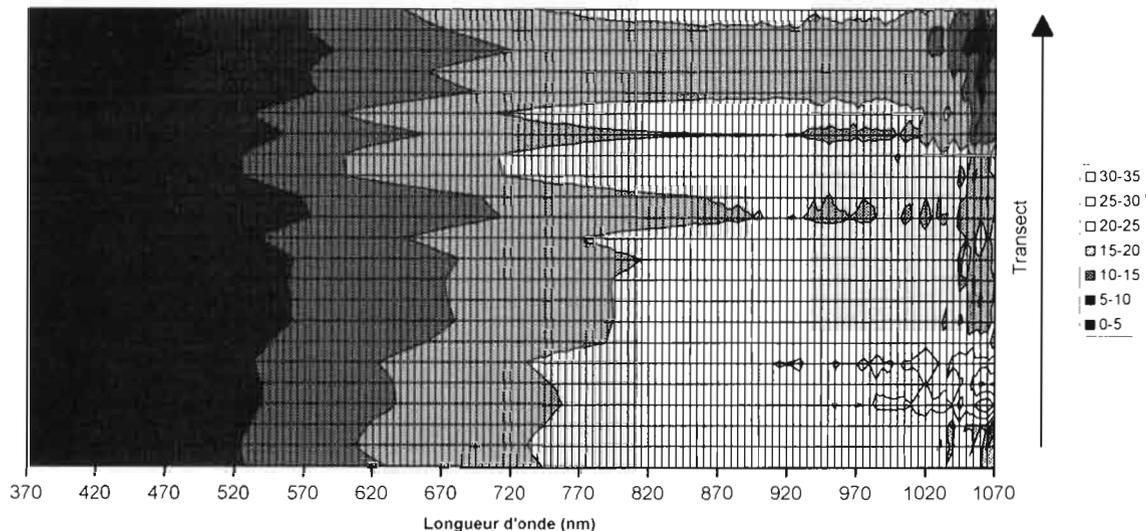


FIG. 9. — Spectres de réflectance obtenus le long d'un transect sur un sol nu de la région de Melipilla (Chili). Le transect couvre environ 100 m, les niveaux de gris indiquent les classes de réflectance (%).

*Reflectance spectra measured along a transect over a bare soil in the Melipilla region (Chile). Grey levels show reflectance classes (%).*

Par des mesures de ce type, positionnées avec précision et placées selon une grille ou un plan d'échantillonnage systématique plus élaboré utilisant les méthodes géostatistiques, on peut envisager de construire une image détaillée de la distribution spatiale de la réflectance. Elle peut être obtenue même pour des sols sous couvert végétal, il suffit d'observer les matériaux entre les plantes. Avec les techniques classiques on pouvait déjà envisager ce type d'approche, mais avec une durée du travail et un coût prohibitifs (nécessité de prélever des échantillons et de les transporter au laboratoire pour en mesurer la réflectance). Avec un spectroradiomètre portable couplé à un système

de positionnement par satellite (GPS, par exemple), cela devient tout à fait réalisable dans un temps limité.

De plus, par des mesures de réflectance répétées dans le temps, il devient même possible de mesurer les changements spectraux induits par les modifications de la composition des matériaux de surface (teneur en carbone et différents minéraux) et de quantifier ainsi l'extension de phénomènes de dégradation des sols (baisse du stock organique, érosion...).

#### VARIATIONS SPECTRALES DANS UN PROFIL DE SOL

L'analyse des couvertures pédologiques se fait en trois dimensions et depuis les débuts de l'observation des sols, la dimension verticale, dans laquelle les différenciations

sont les plus fortes, a été privilégiée. L'observation des profils de sols dans des fosses ou des tranchées est essentielle, et utilise la caractérisation macroscopique des matériaux pour distinguer les différents horizons. De la même façon que leur réflectance peut être mesurée en surface, on peut la mesurer dans une tranchée. Techniquement, c'est un peu plus délicat car les conditions d'éclairage sont faibles et variables le long d'un profil. Une première solution consiste à prélever soigneusement des échantillons (d'une taille minimale d'un dm<sup>3</sup>) et à les placer à l'extérieur de la fosse sur une surface horizontale éclairée uniformément par le soleil. Les spectres de l'essai illustré par la figure 10 ont été mesurés de cette manière sur cinq échantillons le long d'une coupe dans un sol de la région étudiée. Les changements de forme des spectres d'un horizon à l'autre sont spectaculaires et correspondent à des différences de composition en cours d'investigation.

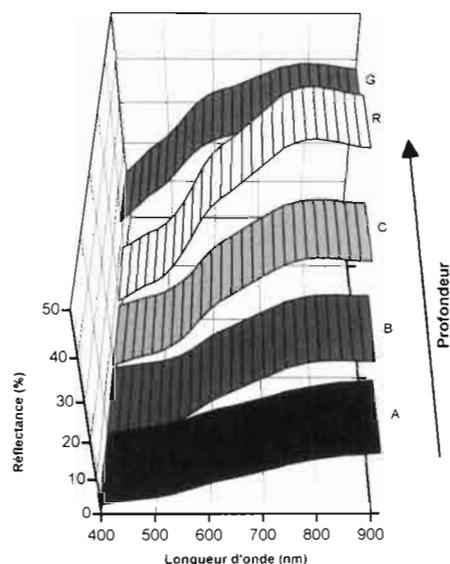


FIG. 10. — Spectres de réflectance obtenus le long d'un profil dans un sol de la région de Melipilla (Chili) (A, B, C : horizons ; R : arène granitique ; G : granite).

*Reflectance spectra measured along a soil profile in the Melipilla region (Chile) (A, B, C : soil horizons ; R : granitic arenite ; G : granite).*

De la même façon que l'on peut établir un profil de texture, des paramètres déduits de la réflectance peuvent être utilisés pour étudier la différenciation verticale. Pour réaliser un grand nombre de mesures, par exemple selon un pas d'échantillonnage serré le long d'un profil profond, il peut être intéressant de chercher à les réaliser *in situ*, sur la paroi de la fosse. Le capteur sera alors configuré avec un champ de vision étroit, et utilisé avec une cible de référence de petite taille, déplacée au fur et à mesure le long de la paroi. L'éclairage sera fourni par une source

artificielle, telle qu'une lampe torche halogène pour caméra vidéo, dont on aura vérifié la stabilité du flux lumineux.

#### DÉTERMINATION PRÉCISE DE LA COULEUR

Les lois de la colorimétrie permettent de calculer la couleur d'un objet — et donc d'un sol — à partir de son spectre de réflectance dans le visible (370-770 nm). La couleur ainsi calculée pour un observateur moyen et dans des conditions d'éclairage standard est exprimée dans le système de notation des colorimétristes, peu familier aux pédologues. Cependant, des tables permettent de les convertir en notation Munsell : *hue*, *value* et *chroma* (teinte, clarté, pureté ; Munsell Colour Company, 1971). Un spectre obtenu sur le terrain (ou au laboratoire) permet donc de définir la couleur d'un sol avec une grande précision, en suivant des calculs déjà détaillés dans plusieurs publications (FERNANDEZ et SCHULZE, 1987 ; ESCADAFAL *et al.*, 1988). D'après WISZECKI et STILES (1982), le gain de précision est d'un facteur de 10 par rapport à l'estimation visuelle à l'aide d'un atlas Munsell.

#### MISE EN ÉVIDENCE DE MINÉRAUX PAR DÉRIVÉES DE SPECTRES

Le calcul des dérivées de spectres est un outil puissant pour l'étude des variations de leur forme, comme l'illustre la figure 11 extraite de ESCADAFAL et HUETE (1992).

#### Dérivée première de la réflectance

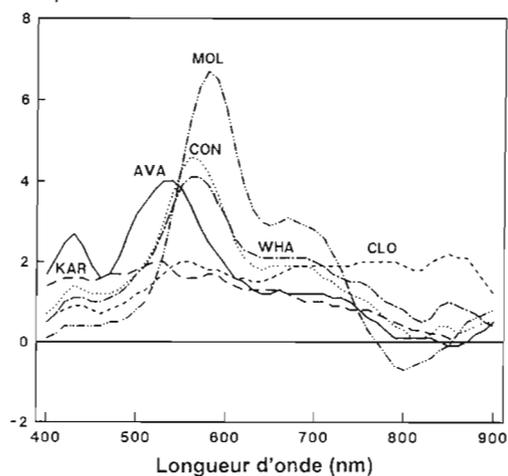


FIG. 11. — Mise en évidence de composants présents dans les sols par calcul de dérivées de spectres (voir données figure 1 AVA : signature de la goéthite , MOL signature de l'hématite). *Derivatives of spectra of figure 1 showing features characterizing soil components (AVA : goethite signature ; MOL : typical hematite signature).*

La présence de goéthite ou d'hématite est ici clairement mise en évidence. Les variations de hauteurs des pics caractéristiques sont une indication sur l'abondance de ces minéraux, ce n'est cependant qu'une abondance « apparente » dont les relations avec la teneur réelle dépendent

de la taille des cristaux et de leur mode de distribution (organisation des sols). Cette technique de dérivation de spectres s'est déjà révélée capable de détecter des phénomènes de dégradation affectant des sols arides à partir de données dans le visible (ESCADAFAL, 1994) ; elle sera certainement très utile pour les données dans le MIR (voir p. 18).

## CONCLUSION-PERSPECTIVES

L'étude des propriétés spectrales des sols est une voie de recherche qui a donné ces dernières années des résultats intéressants applicables à l'interprétation des données satellitaires en pédologie. Les nouvelles technologies des spectroradiomètres portables permettent d'étudier maintenant les spectres de sols sur le terrain et de se placer dans des conditions de mesure proches de celles des capteurs de la télédétection spatiale.

Cela enrichit aussi la panoplie des instruments à la disposition du pédologue pour caractériser les sols *in situ* (tels les pH-mètres, conductivimètres, sondes à neutrons, etc.). Par des mesures de réflectance spectrale, les observations visuelles classiques sur l'aspect des sols, et notamment leur couleur, peuvent être maintenant quantifiées, reproduites en grand nombre et traitées par des techniques statistiques. Les spectres mesurés le long de transects et/ou

de profils sont la version moderne des « pédocomparateurs », rangées de petites boîtes d'échantillons de sols, qui permettent d'apprécier visuellement les changements d'aspect des matériaux pédologiques.

L'arrivée des spectroradiomètres couvrant tout le spectre, de 400 à plus de 2000 nm, va renforcer cette tendance, en ouvrant des applications très spectaculaires à l'étude de la composition minéralogique des sols. Il sera possible de déterminer directement, sans prélèvement ni analyse au laboratoire, la présence de certains types de minéraux, notamment d'argiles, de carbonates ou de sulfates, voire des sels particuliers.

La télédétection peut aussi fournir des mesures de spectres, mais à une résolution plus grossière et avec un coût et une disponibilité pas toujours adaptés. Même s'il existe des spectroradiomètres imageurs qui peuvent être mis en œuvre à partir d'avions, des campagnes d'échantillonnage systématique sur le terrain avec un instrument portable seront bien souvent la solution la plus appropriée sur le plan opérationnel et économique. En répétant des campagnes de ce type sur un même site, on peut espérer suivre des changements affectant la couverture pédologique (érosion, dégradation). Ce sont les nouvelles pistes de recherche à explorer dans ce domaine.

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

## BIBLIOGRAPHIE

- BEDIDI (A.), CERVELLE (B.), 1995. — Diffusion de la lumière par des particules minérales. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, vol. XXVIII, n° 1 : 7-14.
- BEDIDI (A.), CERVELLE (B.), MADEIRA (J.), POUGET (M.), 1992. — Moisture effects on visible spectral characteristics of lateritic soils. *Soil Science*, 153 (2) : 129-141.
- BONN (F.), ROCHON (G.), 1992. — *Précis de télédétection*. Vol. 1 : *Principes et méthodes*. Presses Universitaires du Québec, 512 p.
- CIERNIEWSKI (J.), COURAULT (D.), 1993. — Bidirectional reflectance of bare soil surfaces in the visible and near-infrared range. *Rem. Sens. Rew.*, 7 : 321-339.
- CLARK (R.N.), KING (T.V.V.), KLEJWA (M.), SWAYZE (G.A.), VERGO (N.), 1990. — High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. *J. Geophys. Res.*, 95 : 12653-12680.
- CONDIT (H.R.), 1970. — The spectral reflectance of American soils. *Photogramm. Eng.*, 36 : 955-966.
- COURAULT (D.), GIRARD (M.C.), ESCADAFAL (R.), 1988. — « Modélisation de la couleur des sols par télédétection ». In : *Actes du 4<sup>e</sup> Colloque international Signatures spectrales d'objets en télédétection*, Aussois, janvier 1988 : 357-362.
- ESCADAFAL (R.), 1990. — Les propriétés spectrales des sols. Journées télédétection 14-17 nov. 1988, Paris, Orstom, coll. Colloques et Séminaires : 19-41.
- ESCADAFAL (R.), 1993. — Remote sensing of soil color : principles and applications. *Rem. Sens. Reviews*, 7 : 261-279.
- ESCADAFAL (R.), 1994. — « Soil spectral properties and their relationships with environmental parameters. Examples of arid regions ». In : HILL (J.) and MÉGIER (J.), éd. : 71-87.
- ESCADAFAL (R.), BELGHITH (A.), BEN MOUSSA (H.), 1994. — « Indices spectraux pour la télédétection de la dégradation des milieux naturels en Tunisie aride ». In : *Mesures physiques et Signatures spectrales en Télédétection*, Sixième Symposium International, 17-21 janvier 1994, Val-d'Isère (France) : 253-259.
- ESCADAFAL (R.), GIRARD (M.C.), 1993. — Observing arid lands with Spot and TM. *Sistema Terra* : 31-32.
- ESCADAFAL (R.), HUETE (A.R.), 1992. — Soil optical properties and environmental applications of remote sensing. *Int. Arch. Photogramm. Rem. Sens.*, vol. 29 (Bt) : 709-715.
- ESCADAFAL (R.), POUGET (M.), 1989. — « Comparaison des données Landsat MSS et TM pour la cartographie des formations superficielles en zone aride (Tunisie méridionale) ». In : *Proc. Workshop. Earthnet pilot project on Landsat Thematic Mapper applications*, décembre 1987, Frascati (Italie), ESA publ. SP-1102 : 301-307.
- ESCADAFAL (R.), GIRARD (M.C.), COURAULT (D.), 1988. — La couleur des sols : appréciation, mesure et relations avec les propriétés spectrales. *Agronomie*, 8 (2) : 147-154.

- ESCADAFAL (R.), GIRARD (M.C.), COURAULT (D.), 1989. — Munsell soil color and soil reflectance in the visible spectral bands of Landsat data (MSS and TM). *Remote Sensing of Environment*, 27 : 37-46.
- FERNANDEZ (R.N.), SCHULZE (D.G.), 1987. — Calculation of soil color from reflectance spectra. *Soil Sci. Am. J.*, 51 : 1277-1282.
- GOETZ (A.F.H.), HAUFF (P.), SHIPPERT (M.), MAECHER (A.G.), 1991. — « Rapid detection and identification of OH-bearing minerals in the 0.9-1.0  $\mu\text{m}$  region using a new portable field spectrometer. In : *Proc. Eighth Them. Conf. Geol. Rem. Sens.*, april 29 – may 2, 1991, Denver, Colorado (USA) : 1-11.
- GOUINAUD (C.), ESCADAFAL (R.), LEFORT (P.), à paraître. — *Logiciel de traitement des données spectroradiométriques. Manuel de l'utilisateur SpecPro*. CNT-Orstom, Tunis, 20 p.
- GROVE (C.I.), HOOK (S.J.), PAYLOR II E.D., 1992. — *Laboratory reflectance spectra for 160 minerals 0.4 to 2.5 micrometers. Pilot Land Data system*, NASA, JPL Publication 92-2, 26 p. + 378 p. + annexes.
- HILL (J.), MEGIER (J.), éd., 1994. — *Imaging Spectrometry — a tool for environmental observations. Remote Sensing*, vol. 4, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 328 p.
- HUETE (A.R.), ESCADAFAL (R.), 1991. — Assessment of biophysical soil properties through spectral decomposition techniques. *Rem. Sem. Env.*, 35 : 149-159.
- HUNT (G.), 1977. — Spectral signatures of particulate material in the visible and near infrared. *Geophysics*, 42 : 501-513.
- JACQUEMOUD (S.), BARET (F.), HANOCK (J.F.), 1993. — Modélisation de la réflectance spectrale et directionnelle des sols. Application au concept de la droite des sols. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, vol. XXVIII, n° 1 : 31-43.
- LIU (J.G.), MOORE (J.Mc M.), 1990. — Hue image RGB colour composition. A simple technique to suppress shadow and enhance spectral signature. *Int. J. Rem. Sens.*, 11 (8) : 1521-1530.
- MILTON (E.J.), 1987. — Principles of field spectroscopy. *Int. J. Rem. Sens.*, 8 (12) : 1807-1827.
- MOUGENOT (B.), 1994. — Effets des sels sur la réflectance et télédétection des sols salés. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, vol. XXVIII, n° 1 : 45-54.
- MUNSELL COLOUR COMPANY, 1971. — *Munsell soil colour charts*. Kollomorgen Corporation, Baltimore, 17 pl.
- POUGET (M.), LE FLOC'H (E.), KAMAL (S.), SALEM (B.), 1989. — *Utilisation des données SPOT pour la cartographie des ressources renouvelables. Application à la région côtière du nord-ouest de l'Égypte. Images satellites et Milieux terrestres en régions arides et tropicales*. Paris, Orstom, Colloques et Séminaires : 103-143.
- SILVA MADEIRA NETTO (J.), 1993. — *Étude quantitative des relations constituants minéralogiques-réflectance diffuse des latosols brésiliens. Application à l'utilisation pédologique des données satellitaires TM (région de Brasilia)*. Paris, Orstom, Coll. Études et Thèses, 236 p.
- STONER (E.R.), BAUMGARNER (M.F.), BIEHL (L.L.), ROBINSON (B.F.), 1980 b. — *Atlas of soil reflectance properties*. LARS, Purdue University, 75 p.
- WYSZECKI (G.), STILES (W.S.), 1982. — *Color science : concept and methods, quantitative data and formulae*. New York, Wiley, 2nd edition, 950 p.

### ANNEXE

#### Principales fonctionnalités du logiciel de traitement des données spectroradiométriques (SpecPro)

La caractéristique la plus remarquable est l'interpréteur de commandes qui a été développé pour pouvoir regrouper très facilement les mesures élémentaires, et utiliser dans les calculs les moyennes de groupes de mesures quelconques.

Au démarrage, le logiciel affiche dans la fenêtre principale un 'E' (pour « donnée existante ») pour chaque mesure d'une série correspondant à un nom de fichier sélectionné. Dans le cas de l'exemple cité dans le tableau I, on obtient une rangée de 50 'E' dans la fenêtre qui contient 1 000 points représentant les mesures potentielles de 000 à 999.

```
EEEEEEEEEEEEEEEEEEEEEEEEEEEEEEEEEEEEEEEEEEEEEEEEEEEE .....  
.....  
..... etc ..
```

Grâce au menu « séquence » on peut préciser le rôle de chacune de ces mesures individuelles en leur assignant une lettre :

S = mesure à intégrer dans le calcul du spectre d'un objet

s = dernière mesure du spectre d'un objet

soit, toujours pour le même exemple :

```
EEEESSSSsSSSSsSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSsEEEE .....  
.....  
..... etc ..
```

Pour calculer les valeurs de réflectance, il faut diviser les valeurs de luminance obtenues sur les objets mesurés (sol, végétation...) par celles obtenues sur le panneau de calibration. Le logiciel se charge de cette opération, il suffit de déclarer à l'interpréteur de séquences les fichiers qui sont des calibrations sur panneau avec les lettres 'C' et 'c', de façon similaire à ce qui vient d'être décrit pour les spectres :

```
CCCCcSSSSsSSSSsSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSSsCCCCc .....  
.....  
..... etc ..
```

Pour augmenter la précision des résultats, les valeurs prises en compte pour chaque spectre sont obtenues par interpolation entre les calibrations de début et de fin de séquence, en se basant sur le temps exact d'acquisition de chaque mesure individuelle (enregistré dans l'en-tête des fichiers). De même, la dérive du signal de fond peut être prise en compte dans le calcul en intégrant des mesures de ce signal de fond dans le calcul (qui seront repérées par le symbole 'N').

Enfin, en option, le logiciel peut lire des fichiers texte décrivant les fonctions de transmission des capteurs de satellite et calculer la réflectance dans ces bandes ; les propriétés du panneau de référence peuvent être lues de la même façon et prises en compte dans le calcul.

En sortie, on obtient des fichiers texte contenant les valeurs de réflectance pour chacune des longueurs d'onde choisies. Dans l'exemple du tableau I, on obtient 3 spectres, un pour chacun des trois objets étudiés (sol, plante, transect).

NB : L'ensemble des fonctions du logiciel et de ses options est détaillé dans un manuel séparé (GOUINAUD *et al.*, 1994).