

CAHIERS ORSTOM

An abstract painting of a landscape, featuring warm, textured brushstrokes in shades of orange, yellow, and brown. A faint grid of thin lines is overlaid on the painting. The overall effect is one of a sunset or sunrise over a body of water or a field.

PÉDOLOGIE

Volume XXVIII

N° 1 — 1993

CAHIERS ORSTOM

série PÉDOLOGIE

Les sols observés par les satellites

Exemples de modèles et d'applications

Éditions de l'Orstom

INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

PARIS — 1995

Les cahiers Orstom, série Pédologie cesseront de paraître après la publication
du n° 2 du volume XXVIII - 1993.

*The cahiers Orstom, série Pédologie will suspend their publication after
n° 2 of volume XXVIII - 1993.*

Les numéros du vol. XXVII, *Cahiers Orstom, série Pédologie* ont paru aux dates suivantes :
n° 1 en septembre 1994, n° 2 en décembre 1994

Manuscrits déposés le 3 février 1995 au Secrétariat des éditions de l'Orstom

.....

« La loi du 11 mars n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayant cause, est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code Pénal ».

AVANT-PROPOS

Les « journées pédologiques » réunissent chaque année les pédologues de l'Orstom et leurs proches collègues autour d'un thème scientifique ; c'est une occasion d'échanges et de discussions très appréciés dans notre communauté dispersée aux quatre coins du globe.

En septembre 1992, le thème retenu par notre commission scientifique a été la télédétection ; un certain nombre de spécialistes de l'Orstom et d'autres instituts de recherche français sont venus dans l'auditorium du Centre Orstom d'Ile-de-France, à Bondy, pour présenter leurs travaux.

Ce numéro spécial des *Cahiers Orstom, série Pédologie* réunit les textes des principales communications faites au cours de cette journée, auxquels sont venus se joindre deux articles extérieurs pour présenter d'autres exemples d'applications.

Si ce numéro ne prétend pas faire un point exhaustif sur le thème choisi, il présente néanmoins un bon éventail de travaux concernant l'utilisation de la télédétection pour l'étude des sols, aussi bien au niveau de ses fondements scientifiques que de cas concrets de traitements d'images pour la cartographie. Les quatre premiers articles sont consacrés à l'étude de l'interaction du rayonnement solaire avec les sols : bases physiques (BEDIDI et CERVELLE), mesure (ESCADAFAL *et al.*), modélisation des effets directionnels (JACQUEMOUD *et al.*) et cas des sols salés (MOUGENOT). Ce dernier article sert de transition avec les quatre suivants qui présentent des applications : caractérisation du milieu au Burkina Faso (HENQUIN et TOTTE), en Algérie (MANIÈRE *et al.*), identification des risques d'érosion par étude multitemporelle (MATHIEU *et al.*) et, enfin, un exemple de spatialisation d'informations pédologiques dans le cas de sols sous forêts, qui ne peuvent donc pas être directement observés par les satellites (SEYLER et VOLKOFF).

Je tiens à remercier tous ceux qui ont permis la réalisation de cette publication, tout d'abord les auteurs que vous rencontrerez au fil des articles qui suivent, mais aussi les spécialistes qui ont bien voulu renforcer ce groupe en participant à la relecture des manuscrits : MM. M.C. Girard, F.X. Humbel et J.C. Pion.

Les délais de lancement, de réalisation et de fabrication d'une publication de cette nature sont toujours plus longs que prévu, mais j'espère que les auteurs y trouveront une récompense à leurs efforts et que les lecteurs en apprécieront le résultat.

Richard ESCADAFAL
Éditeur scientifique de ce Cahier

Introduction

Richard ESCADAFAL

Orstom, BP 434, 1004 El Menzah, Tunisie.

Les photographies aériennes ont été la première source de données de télédétection largement disponibles. Leur résolution habituelle est telle que les objets reconnus sur le terrain (habitations, routes, arbres, cours d'eau, etc.) sont identifiables sur les photographies ; de plus, la stéréoscopie permet d'y reconnaître les formes de relief. Comme dans les autres disciplines consacrées à l'étude du milieu naturel, elles sont vite devenues un outil indispensable en cartographie pédologique et sont toujours utilisées (LILLESAND et KIEFFER, 1987).

L'observation de l'environnement à l'aide des photographies est cependant limitée par la faible fréquence de couverture aérienne d'une région donnée et par la variabilité des conditions de prises de vues, y compris à l'intérieur d'une même mission. En effet, d'une photographie à l'autre les effets géométriques varient et les niveaux de gris sont affectés par la qualité du tirage sur papier.

Les premières images satellite du programme Landsat ont permis dès 1972 d'observer la surface de la Terre de façon plus régulière et reproductible, mais avec une résolution beaucoup plus faible empêchant l'identification des objets habituellement reconnus par les pédologues sur les photographies aériennes (formes de relief, terrasses, ravines, textures dues à la végétation, etc.). Ainsi, les techniques de photo-interprétation développées jusqu'alors étaient assez inadaptées à ces nouvelles images, qui sont de fait apparues assez décevantes.

Ces images, bien que visualisables sous forme de tirages sur papier, sont en fait de nature numérique et se prêtent donc aux techniques de traitement que les progrès de l'informatique ont mis à notre disposition. C'est là que réside leur réel potentiel, qui a progressivement été exploité pour l'étude des sols au fur et à mesure que les pédologues se sont investis dans leur utilisation et que les sources d'images satellite sont devenues plus nombreuses. Ces dernières années sont parus plusieurs ouvrages qui offrent des vues d'ensemble sur la télédétection (BONN et ROCHON, 1992

et CERVELLE, 1989, pour le programme français Spot), sur ses applications à l'étude des milieux terrestres (GIRARD et GIRARD, 1989 ; GUYOT, 1989) et plus particulièrement aux sols (MULDERS, 1987).

La télédétection aérospatiale suit actuellement un développement rapide qui se traduit par la multiplication des programmes nationaux et internationaux de lancement de plates-formes équipées de capteurs de plus en plus variés. Les données les plus abondantes proviennent d'instruments dits « passifs », qui mesurent le rayonnement réfléchi par la surface de la Terre dans le spectre d'émission du Soleil (cas des séries Landsat et Spot, par exemple).

Les images qu'ils fournissent ont maintenant une résolution spatiale qui les rapproche des photographies aériennes. Elles sont très utilisées en pédologie pour stratifier les paysages en unités morphopédologiques, et caractériser l'état de la surface des sols à partir de leurs signatures spectrales. Cet aspect a été particulièrement étudié ces dernières années notamment par des chercheurs de l'Orstom, comme en témoignent par exemple les actes des Journées de Télédétection tenues à Bondy (POUGET, 1991).

D'autres instruments mesurent le rayonnement émis par la surface (thermique et micro-ondes passives) surtout utilisables pour la mesure de la teneur en eau des sols. Par ailleurs, après une phase d'exploitation essentiellement aérienne, les radars imageurs sont actuellement en plein développement, en particulier grâce au programme européen qui a mis sur orbite le satellite ERS-1 en 1992. Ils offrent le grand avantage de fournir des images enregistrées selon des conditions de visée et d'éclairement constants, pratiquement insensibles à l'enneigement. Leur utilisation est donc particulièrement prometteuse pour l'étude des paysages et des sols dans les régions tropicales humides, difficilement observées par les capteurs passifs. Ces derniers voient en revanche leur résolution spectrale augmenter, les nouveaux capteurs effectuant des mesures dans des bandes nombreuses. Les spectro-imageurs enregistrant la lumi-

nance selon des bandes contiguës couvrant tout le spectre solaire sont l'aboutissement de cette logique. Les résultats des expérimentations faites à partir d'avions montrent leur fort potentiel pour les applications à l'observation de l'environnement (HILL et MÉGIER, 1994). L'installation de ce type d'instrument sur plate-forme spatiale est prévue pour la fin du siècle ; cela suppose la résolution d'un certain nombre de difficultés techniques (encombrement, alimentation, débit des données notamment).

La multiplication des instruments de télédétection permet maintenant d'observer le même élément de paysage, et donc les mêmes sols, à intervalles réguliers selon des angles sélectionnés, dans des domaines spectraux très différents. Un des défis actuels est certainement de définir des stratégies pour tirer de ce foisonnement les informations dont nous avons besoin sur les sols.

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

BIBLIOGRAPHIE

- BONN (F.), ROCHON (G.), 1992. — *Précis de télédétection*. Vol. 1^{er} : *Principes et méthodes*. Presses Universitaires du Québec, 512 p.
- CERVELLE (B.), 1989. — *SPOT : des yeux braqués sur la Terre*. Paris, Presses du CNRS, 214 p.
- GIRARD (M.C.), GIRARD (C.M.), 1989. — *Télédétection appliquée. Zones tempérées et intertropicales*. Paris, Masson, 260 p.
- GUYOT (G.), 1989. — Signatures spectrales des surfaces naturelles. *Télédétection satellitaire*, n° 5, Caen, Paradigme, 178 p.
- HILL (J.), MÉGIER (J.), éd., 1994. — *Imaging Spectrometry — a tool for environmental observations. Remote Sensing*, vol. 4, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 328 p.
- LILLESAND (T.M.), KIEFER (R.W.), 1987. — *Remote sensing and image interpretation*. New York, Wiley, 2nd ed., 721 p.
- MULDERS (M.A.), 1987. — *Remote sensing in soil science. Developments in soil science*, vol. 15, Amsterdam, Elsevier, 379 p.
- POUGET (M.), éd., 1991. — *Caractérisation et suivi des milieux terrestres en régions arides et tropicales*. Orstom, Paris, Colloques et Séminaires, 449 p.

Diffusion de la lumière par des particules minérales

Ali BEDIDI, Bernard CERVILLE

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 inversed 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 (télédétection) 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).

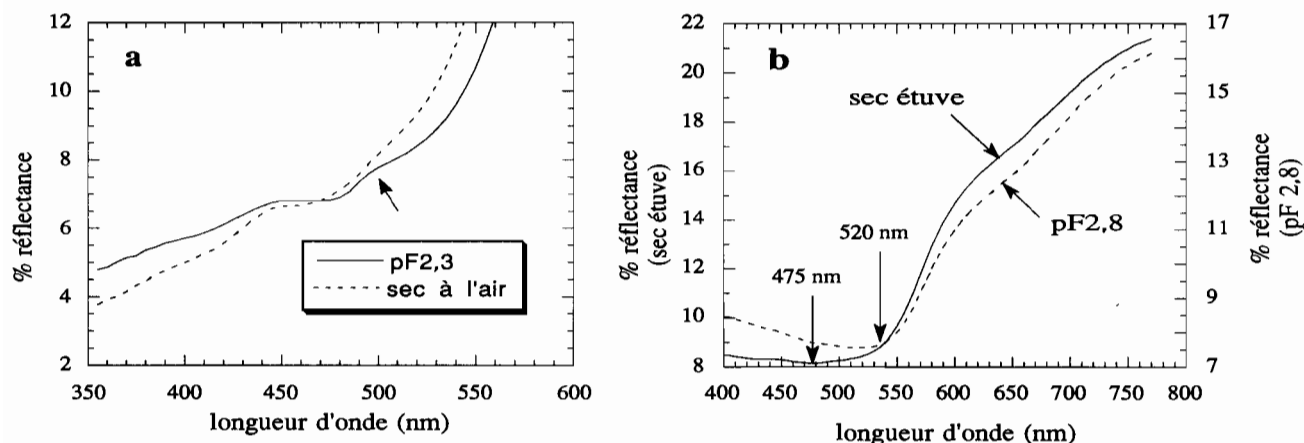


FIG. 1. — (a) Apparition d'une inflexion à 500 nm sur le spectre de réflectance d'un sol latéritique humide. Elle est absente du spectre du sol sec. (b) Déplacement du minimum de réflectance d'un sol latéritique sous l'effet de l'humidité.

(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

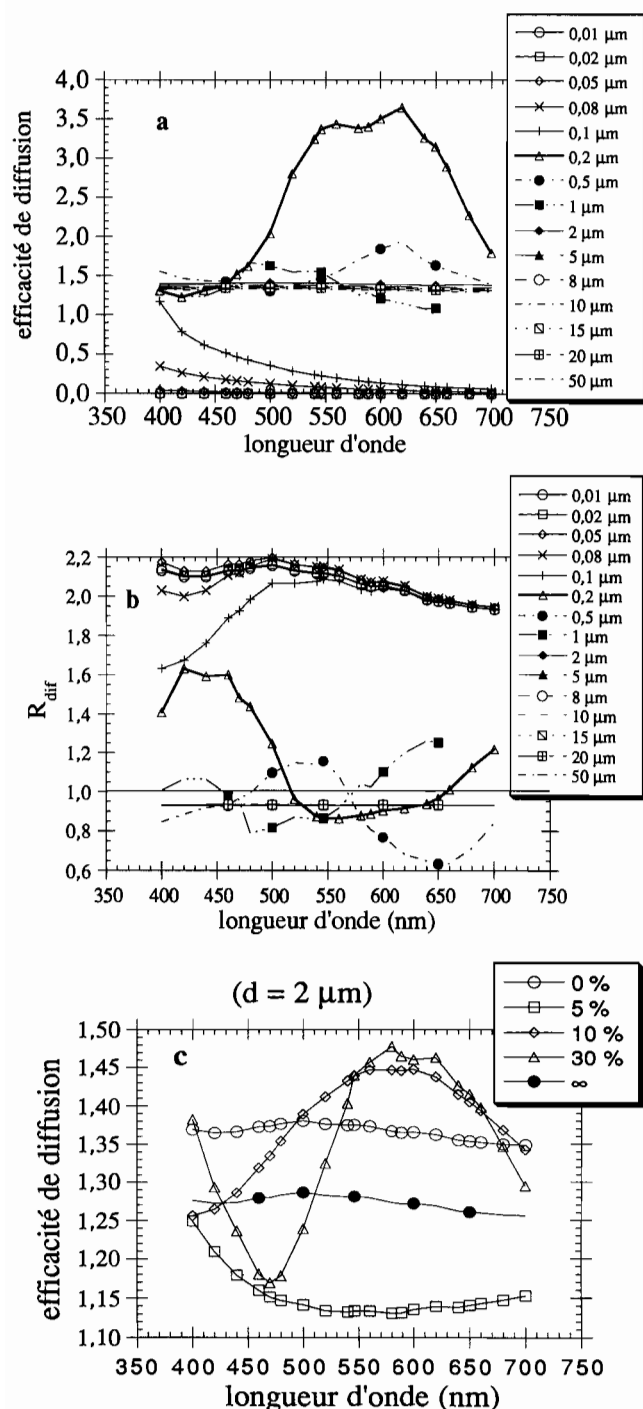


FIG. 2. — (a) Spectre de l'efficacité de diffusion en fonction du diamètre de la particule. (b) R_{dif} , rapport de l'efficacité de diffusion calculée pour la particule dans l'eau à l'efficacité de diffusion calculée pour la particule dans l'air. (c) Efficacité de diffusion d'une particule de 2 μm de 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° (pas du calcul : 0,5°). 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_{dif} , 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).

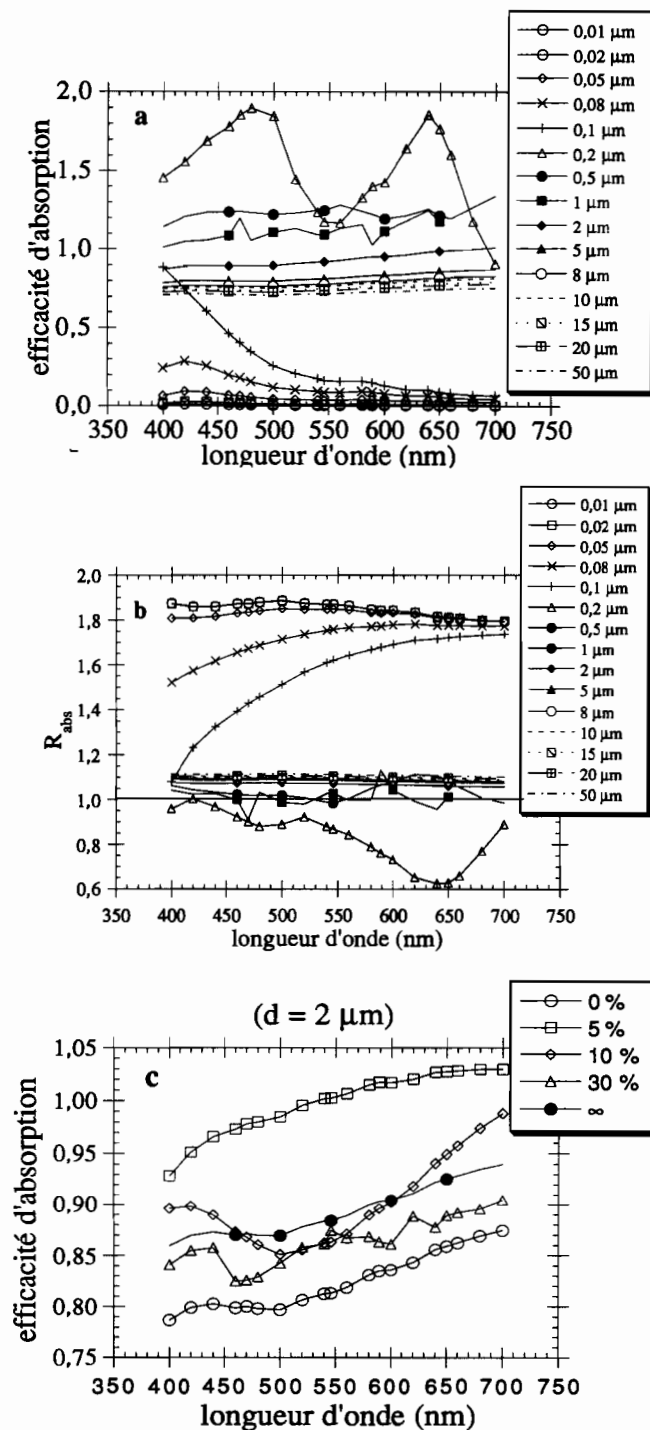


FIG. 3. — (a) Spectre de l'efficacité d'absorption en fonction du diamètre de la particule. (b) R_{abs} , rapport de l'efficacité d'absorption calculée pour la particule dans l'eau à l'efficacité d'absorption calculée pour la particule dans l'air. (c) Efficacité d'absorption d'une particule de 2 μm de 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).

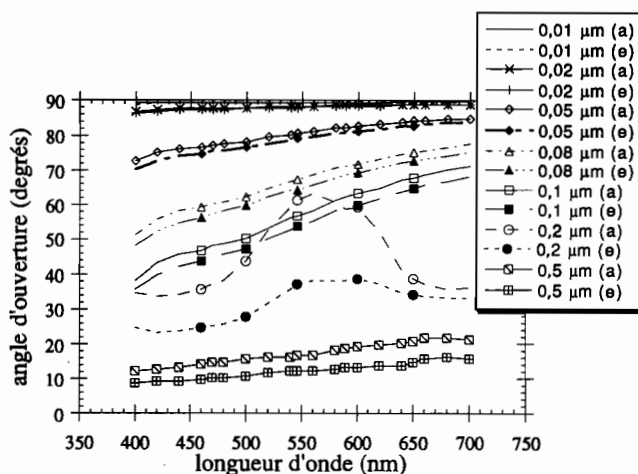


FIG. 4. — Spectre de l'angle d'ouverture calculé pour des particules de différents diamètres. Les particules sont entourées d'air (a) ou d'eau (e).

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 the air. (c) Absorption 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 submersed in water).

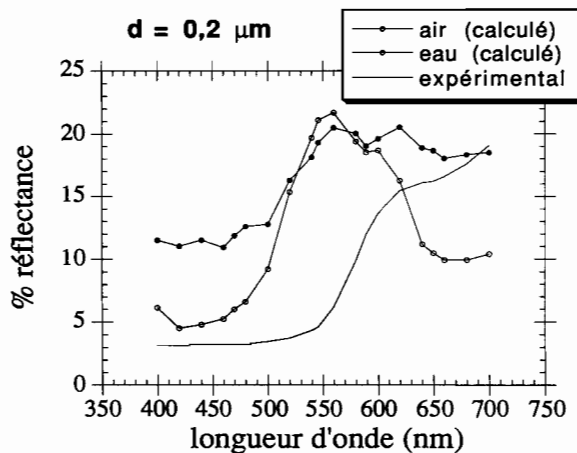


FIG. 5. — Spectres de réflectance de poudres d'hématite. Air (calculé) : spectre simulé d'une poudre de particules sphériques de $0,2 \mu\text{m}$ de diamètre placées dans l'air. Eau (calculé) : spectre simulé d'une poudre de particules sphériques de $0,2 \mu\text{m}$ de diamètre placées dans l'eau.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

s.

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).

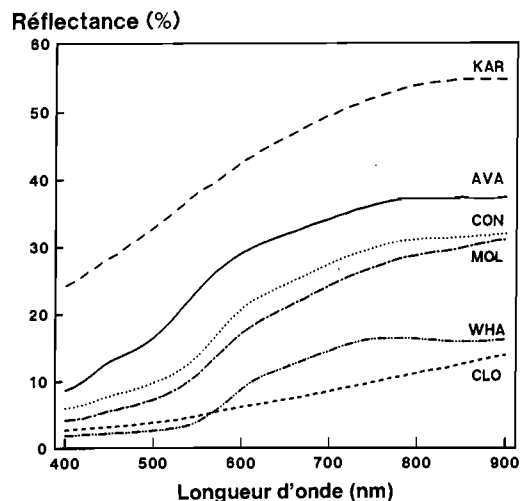


FIG. 1. — Exemples de courbes de réflectances spectrales de sols dans le domaine visible à proche infrarouge. (KAR : sol sableux clair ; AVA, CON, MOL : sols riches en fer ; WHA : sol organique à oxydes de fer ; CLO : sol très organique ; d'après ESCADAFAL et HUETE, 1992).

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).

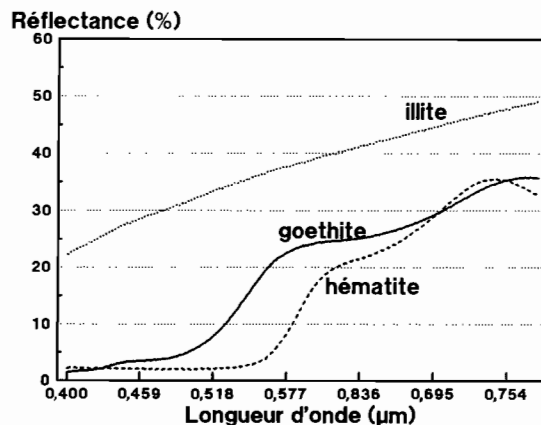


FIG. 2. — Courbes de réflectance dans le domaine visible d'échantillons d'hématite et de goethite comparées à celle de l'illite (données de laboratoire sur minéraux purs, d'après GROVE *et al.*, 1992).

*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...

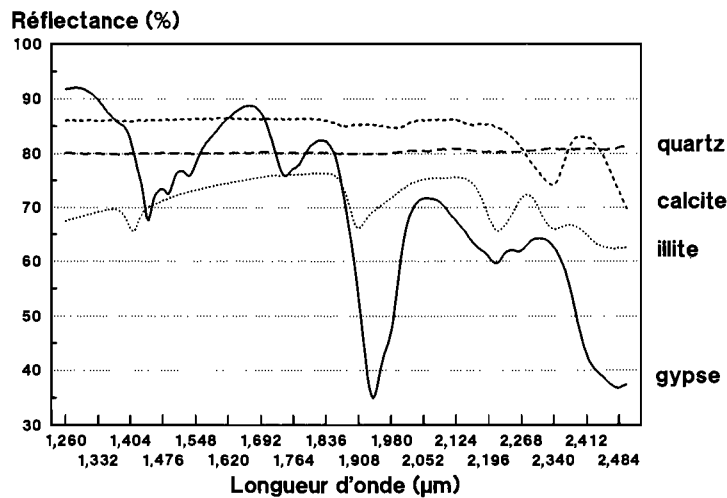


FIG. 3. — Exemples de spectres de minéraux présents dans les sols, mesurés dans le moyen infrarouge (MIR) (données de laboratoire, d'après GROVE *et al.*, 1992).

*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'éclairement (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 CERVILLE, 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'éclairement 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).

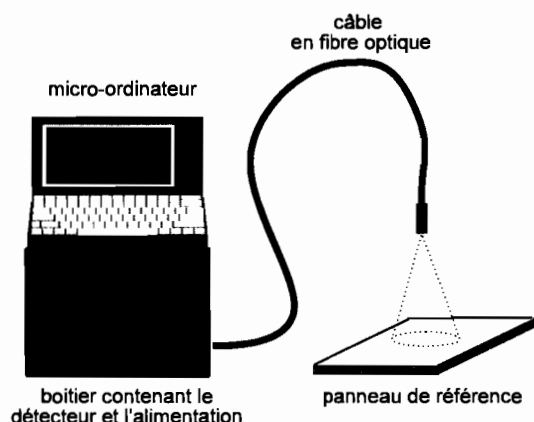


FIG. 4. — Schéma du spectroradiomètre portable utilisé. Les mesures sont faites alternativement sur le panneau de référence et sur la surface du sol.

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).

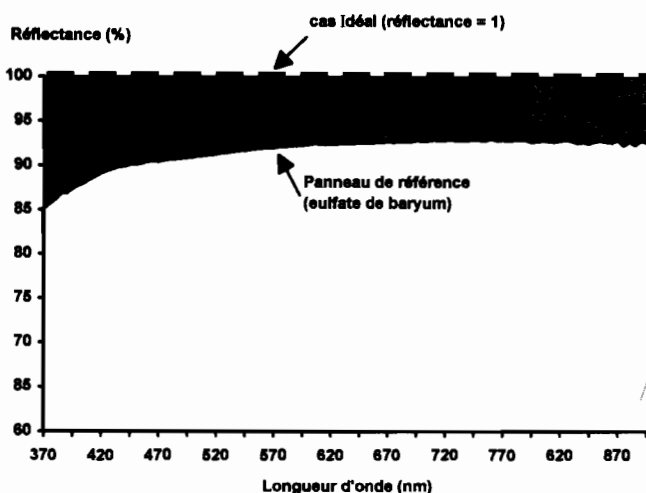


FIG. 5. — Courbe de réflectance spectrale du panneau de référence, couvert de sulfate de baryum utilisé sur le terrain. L'écart observé par rapport au cas idéal est pris en compte dans les calculs réalisés par le logiciel dédié (SpecPro).

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).

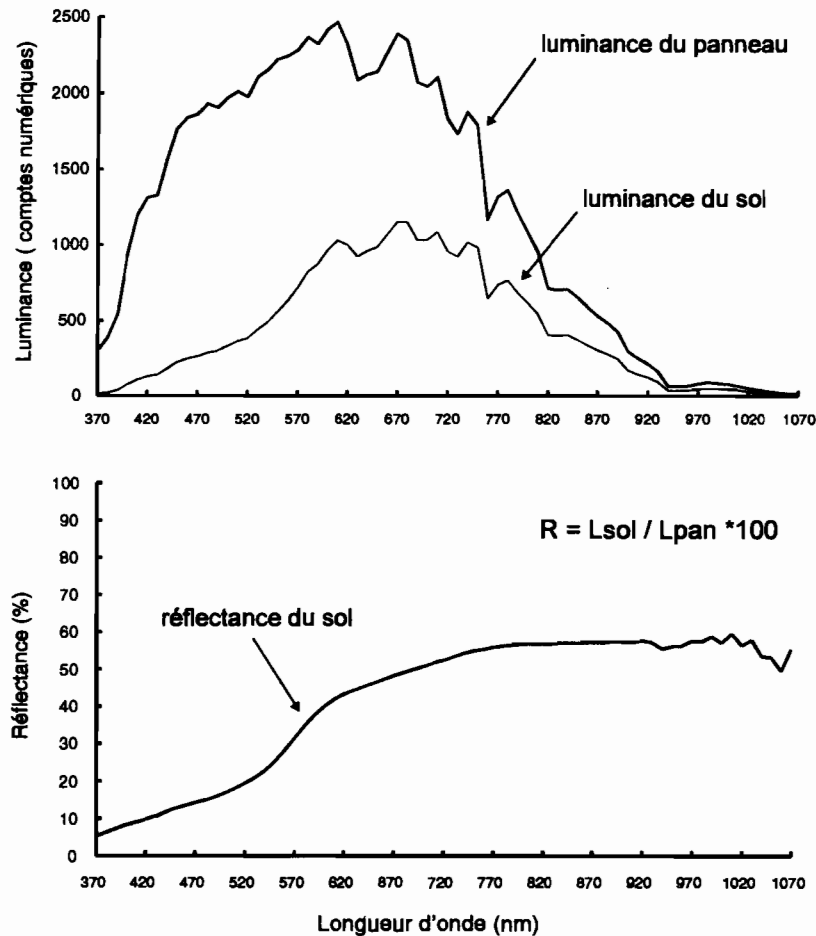


FIG. 6. — Calcul de la réflectance à partir des luminances mesurées sur le sol et sur la cible de référence. À noter, le spectre de réflectance est bruité dans le domaine spectral où la luminance est faible (940-1070 nm).

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).

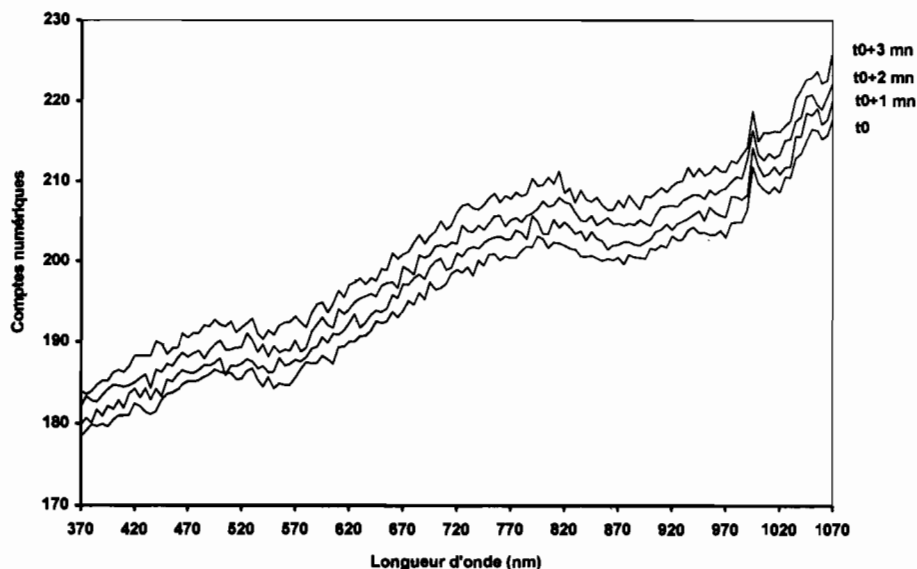


FIG. 7. — Instabilité du détecteur du spectroradiomètre : dérive du signal de fond en fonction des minutes écoulées après la mise en route de l'appareil.

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.

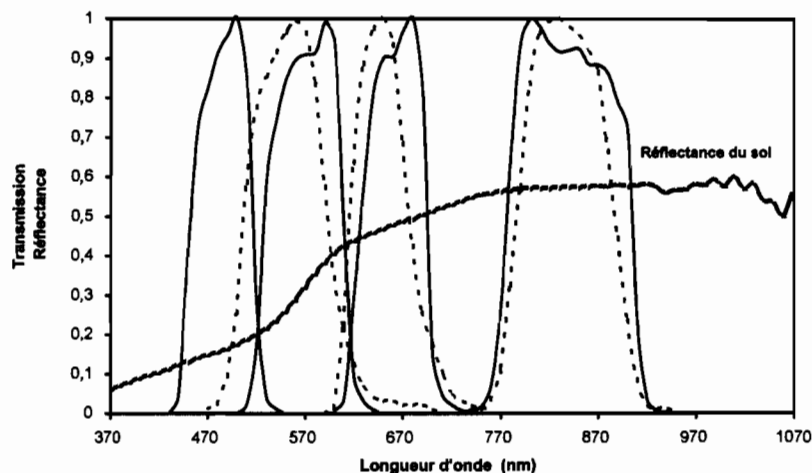


FIG. 8. — Calcul de la réflectance dans les bandes satellitaires par convolution avec les courbes de transmission des capteurs (trait continu : les quatre bandes du *Thematic Mapper* de Landsat ; pointillé : les trois bandes du HRV de Spot).

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 cm² et quelques m². 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.

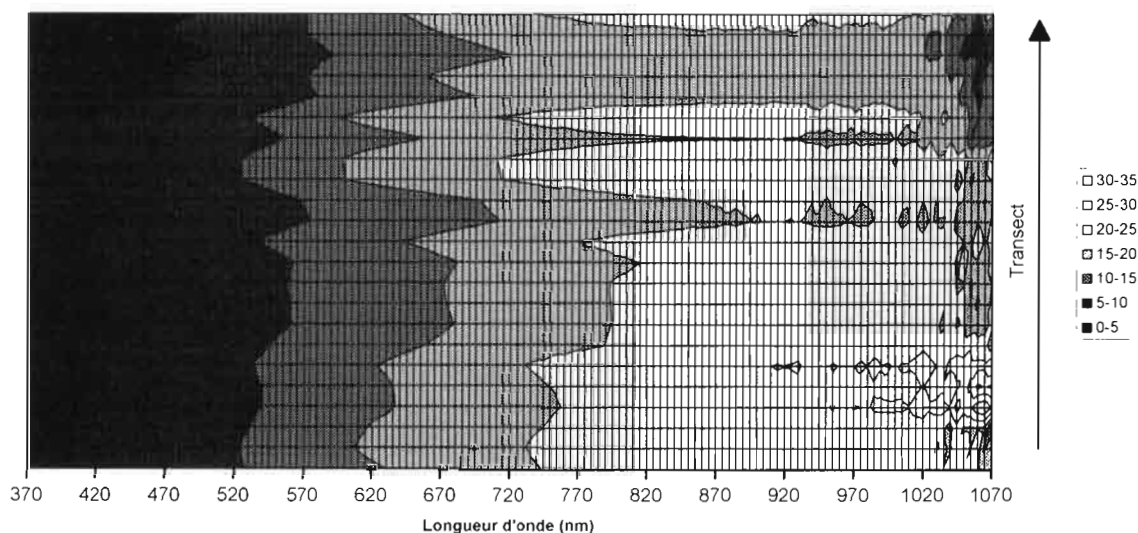


FIG. 9. — Spectres de réflectance obtenus le long d'un transect sur un sol nu de la région de Melipilla (Chili). Le transect couvre environ 100 m, les niveaux de gris indiquent les classes de réflectance (%).

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 dm³) 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.

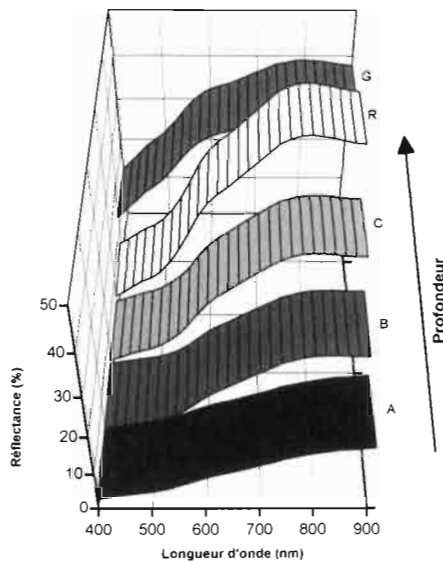


FIG. 10. — Spectres de réflectance obtenus le long d'un profil dans un sol de la région de Melipilla (Chili) (A, B, C : horizons ; R : arène granitique ; G : granite).
Reflectance spectra measured along a soil profile in the Melipilla region (Chile) (A, B, C : soil horizons ; R : granitic arenite ; G : 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 visée 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

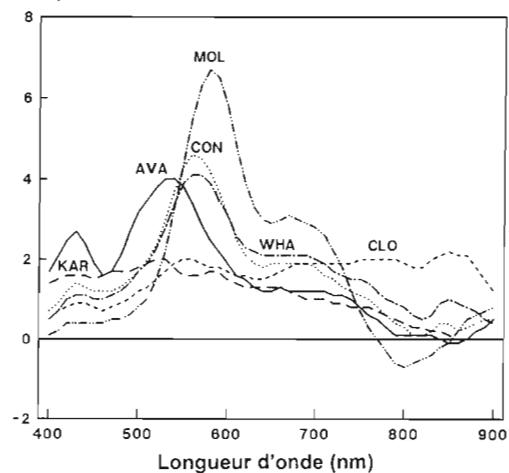


FIG. 11. — Mise en évidence de composants présents dans les sols par calcul de dérivées de spectres (voir données figure 1). AVA : signature de la goéthite, MOL : signature de l'hématite.
Derivatives of spectra of figure 1 showing features characterizing soil components (AVA : goethite signature ; MOL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

Modélisation de la réflectance spectrale et directionnelle des sols

Application au concept de droite des sols*

Stéphane JACQUEMOUD (1), Frédéric BARET (2), Jean-François HANOCQ (2)

(1) Joint Research Centre, Institute for Remote Sensing Applications/Advanced Techniques, TP 272, 21020 Ispra (Va), Italy.

(2) Inra Bioclimatologie, BP 91, 84143 Montfavet cedex, France.

RÉSUMÉ

Le modèle de Hapke est un modèle de transfert radiatif qui permet de simuler des spectres de réflectance de sols dans toutes les directions de l'espace. Les paramètres du modèle ont été calés à partir de données expérimentales acquises au laboratoire de façon à ce que les valeurs de réflectance simulées concordent avec les valeurs mesurées. Les résultats de l'inversion montrent que le modèle décrit très bien les effets directionnels quelle que soit la longueur d'onde. En outre, il apparaît que l'albédo de simple diffusion est le seul paramètre du modèle variant significativement avec la longueur d'onde. La réalité physique des autres paramètres est discutée comme celle du paramètre de rugosité du sol. Enfin, le concept de droite des sols est exploré dans le cadre du modèle.

MOTS CLÉS : Télédétection — Modèle — Sols — Droite du sol.

ABSTRACT

MODELING SPECTRAL AND DIRECTIONAL REFLECTANCE OF SOILS APPLICATION TO THE SOIL LINE CONCEPT

The Hapke's radiative transfer model which calculates soil reflectance is investigated over a wide range of soils. The optical properties of 26 soils were measured under several viewing angles both with a field spectroradiometer (1000 narrow wavebands from 450 nm to 2450 nm) and a radiometer simulating TM channels (the five TM2, TM3, TM4, TM5, and TM7 broad bands). The input parameters of the model (single scattering albedo ω , phase function $P(g, g')$, and a variable characteristic of soil roughness h) were fitted to these observations so that the simulated reflectance matched the measured reflectance. Results show that the model allows very good description of the directional effects for all wavelengths. Further, it appears that the only parameter that varies significantly with wavelength is the single scattering albedo. However, problems are encountered while comparing some of the parameters such as the roughness parameter to actual variations of soil surface roughness. The model is finally applied to investigate the soil line concept, a linear relationship observed between red and near infrared reflectances of a bare soil. The slope of the soil line corresponds to the ratio of the two single scattering albedos. The intercept originates from the difference in multiple scattering observed in each of the two wavelength bands used. The concept of soil line is shown to be very robust over the whole spectral domain as soon as soil types are separated, and when the effect of

* Ce travail a été effectué à l'Inra de Montfavet, où S. Jacquemoud bénéficiait d'une bourse de thèse Inra/CNES, et financé en partie par le CNES, le CNRS, l'Inra et l'Ifremer dans le cadre d'une « ATP Télédétection spatiale ».

the viewing and source configurations as well as the surface roughness are considered. However, in the middle infrared spectral domain, the soil line concept fails when soil moisture is a factor of variation.

KEYWORDS : Remote sensing — Model — Soil — Soil line.

INTRODUCTION

Lorsque le sol est l'objet principal d'étude — c'est le cas pour les pédologues qui cherchent à cartographier la variabilité spatiale des sols ou à suivre leur état de surface par télédétection —, la végétation est considérée comme un bruit ; au contraire, pour des applications liées à la végétation, l'élément perturbateur est le sol dont les propriétés optiques peuvent, pour un couvert épars, influencer fortement la réponse radiométrique. Une bonne caractérisation des propriétés optiques des sols est donc nécessaire à toute étude par télédétection des surfaces naturelles ou cultivées.

Les propriétés optiques des sols dépendent des propriétés spectrales intrinsèques des matériaux pédologiques (minéraux, matière organique, eau), de la taille des agrégats et de la géométrie de mesure (angles solaire et de visée). Elles sont susceptibles de varier très rapidement dans l'espace et dans le temps pour certaines d'entre elles.

Les propriétés spectrales des sols ont été beaucoup étudiées en laboratoire sur des poudres minérales et en milieu naturel sur des roches ou des sols variés. L'indice de réfraction complexe des constituants du sol explique la variation spectrale de la réflectance. La partie réelle $R(n)$ qui est à l'origine de phénomènes de réfraction lorsque la lumière rencontre des discontinuités varie peu en fonction de la longueur d'onde en dehors des bandes d'absorption. De plus, les constituants du sol ayant des indices de réfraction réels du même ordre de grandeur, ces discontinuités sont surtout créées aux interfaces particules du sol/air. Elles expliquent la diminution de la réflectance quand la taille des particules augmente (GROVE *et al.*, 1992) ou bien l'assombrissement d'un sol dont la teneur en eau volumique augmente (IDSO *et al.*, 1975 ; TWOMEY *et al.*, 1986). La partie imaginaire de l'indice de réfraction $I(n)$ décrit l'absorption du rayonnement électromagnétique par le milieu. Au niveau microscopique, l'absorption est liée à des transitions électroniques dans le visible, à des vibrations/rotations de molécules dans le proche et moyen infrarouge. Ainsi les transitions électroniques du fer expliqueraient en grande partie la diminution de la réflectance dans le bleu (HUNT, 1980). Au niveau macroscopique, les sols ont été étudiés de façon assez empirique : par exemple la réflectance spectrale d'un sol décroît sur tout le domaine visible lorsque la teneur en matière organique augmente (KASUMOV *et al.*, 1992). BAUMGARDNER *et al.* (1985), IRONS *et al.* (1989) ont recensé les principaux constituants

du sol affectant la réflectance : les minéraux (argiles, oxydes et hydroxydes de fer, carbonates, sulfates...), la matière organique (humus et substances non humiques), l'eau et l'air forment des milieux extrêmement variés dont les propriétés optiques sont en conséquence presque infinies. STONER et BAUMGARDNER (1981) ont néanmoins défini cinq classes de spectres caractéristiques de la plupart des sols des États-Unis. Ces travaux se contentent souvent de cataloguer des spectres acquis dans une configuration de mesure précise. De telles études sont, bien entendu, utiles dans une optique de cartographie ou de classification, mais elles contribuent assez peu à la compréhension des interactions entre le rayonnement solaire et les sols. Il est de plus nécessaire de considérer les propriétés directionnelles.

Le rayonnement solaire qui arrive sur un sol ne rencontre généralement pas une surface plate et lisse mais une surface rugueuse et irrégulière. La rugosité de surface est le premier facteur influençant la réponse bidirectionnelle d'un sol nu. Comme pour les couverts végétaux, les sols rugueux peuvent présenter un phénomène de rétrodiffusion (« hot spot ») important ; au contraire, certaines surfaces désertiques planes sont caractérisées par un effet spéculaire très marqué (DEERING *et al.*, 1990). Plusieurs indices (variations de surface, distribution et taille des particules...) ont été définis pour décrire la surface d'un sol, mais leur mesure directe présente encore des difficultés. De plus, selon que les particules du sol sont transparentes ou opaques, la réflectance bidirectionnelle s'accroît ou décroît lorsque leur taille diminue (IRONS *et al.*, 1989). La compréhension et la description de la diffusion de la lumière entre les particules devraient nous fournir des informations intéressantes sur la rugosité de surface.

Un des principaux enseignements de cette revue bibliographique est que l'expérimentation ne permet d'analyser que très partiellement le rôle des différents facteurs influençant la réponse radiométrique des sols. L'interprétation de données satellitaires acquises au même moment par des capteurs différents (bandes spectrales et résolutions spatiales différentes), ou par un même capteur à des instants différents, requiert l'utilisation de modèles de réflectance des sols. Il en existe plusieurs dans la littérature : discrets ou continus, déterministes ou empiriques, inversibles ou non inversibles (STRAHLER *et al.*, 1986).

Les propriétés spectrales sont le plus souvent décrites au niveau macroscopique : ISHIDA *et al.* (1991) ont proposé un modèle théorique permettant de simuler l'effet de l'hu-

midité du sol sur la réflectance ; ils introduisent l'indice de réfraction complexe du milieu, $n + ik$, dont la partie imaginaire k , assimilable à un coefficient d'extinction, est fortement corrélée aux propriétés chimiques du sol (oxydes de fer en particulier). BEDIDI *et al.* (1992) ont fait de même sur des sols latéritiques. La rareté des modèles peut s'expliquer par la complexité et la variété des phénomènes mis en jeu.

La réflectance directionnelle d'un sol nu étant principalement influencée par la rugosité de surface, la modélisation 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.* (1990), dans lequel les effets spéculaires et la rétrodiffusion sont formulés séparément, a permis de simuler avec succès la réflectance directionnelle de sols désertiques. CIERNIEWSKI (1987, 1989) qui assimile la surface d'un sol à des sphères équidistantes de même rayon, disposées sur un plan de pente variable, suppose que la réflectance est fortement liée aux ombres créées par les agrégats, et dépend donc de la rugosité et de la géométrie de mesure. Cette hypothèse est correcte mais, comme le montre ESCADAFAL (1989), 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 (CHANDRASEKHAR, 1960 ; IRONS *et al.*, 1989). On peut les inverser afin d'estimer des caractéristiques du milieu à partir d'observations de télédétection. HAPKE (1963, 1981, 1984), HAPKE et WELLS (1981) ont proposé une solution approchée de l'équation de transfert radiatif intégrant l'effet de « hot spot ». Ce modèle à cinq paramètres permet de simuler aussi bien des mesures de réflectance au laboratoire que des observations de surfaces de planètes. PINTY et VERSTRAETE (1990) et PINTY *et al.* (1989) ont validé ce modèle sur des sols nus.

La bibliographie montre une absence de modèles intégrant simultanément les propriétés spectrales et directionnelles des sols. Ces deux composantes sont généralement dissociées ; or si on veut relier les propriétés spectrales d'un sol avec sa composition minérale ou sa teneur en eau, il est nécessaire de s'affranchir des effets liés à la rugosité et à la géométrie de mesure (angles zénithaux et azimutaux). Comme VINCENT et HUNT (1968) ou IDSO *et al.* (1975), on peut corriger ces effets par des relations empiriques mais, dans ce cas, on perd l'information concernant la rugosité et la fonction de phase de la surface étudiée. Un meilleur moyen serait d'utiliser un modèle de réflectance bidirectionnelle qui permettrait de séparer « proprement » les composantes spectrale et directionnelles du si-

gnal radiométrique. C'est ce que nous avons réalisé en généralisant le modèle de transfert radiatif de Hapke (1981) de manière à isoler les paramètres dépendant de la longueur d'onde des autres paramètres du modèle. Nous décrivons dans un premier temps ce modèle et les modifications que nous y avons apportées. Puis nous détaillons l'expérience mise en œuvre pour valider ce modèle. Les données acquises au laboratoire en conditions contrôlées nous serviront à caler les paramètres du modèle et à discuter leur dépendance spectrale (JACQUEMOUD *et al.*, 1992). Enfin, nous verrons une application directe du modèle pour la détermination des droites des sols et leur déterminisme (BARET *et al.*, 1993).

LE MODÈLE

Bien qu'il existe de nombreux modèles de réflectance bidirectionnelle dans la littérature, le modèle de Hapke a été choisi pour les raisons suivantes :

- la réflectance de la surface est reliée à des paramètres qui ont un sens physique : un albédo de simple diffusion, une fonction de phase des particules, et une rugosité de surface ;

- ce modèle a déjà été validé au laboratoire, sur des surfaces planétaires variées, sur des sols terrestres (PINTY *et al.*, 1989) et sur des poudres minérales (BEDIDI *et al.*, 1992).

L'équation de transfert radiatif

Considérons une surface plane au niveau $z = 0$, constituée de particules sphériques irrégulières, orientées au hasard. Ce milieu est éclairé dans la direction (i, ψ) par un faisceau lumineux collimaté d'intensité J et est observé par un détecteur dans la direction $(e, 0)$. L'angle de phase g est décrit par l'écart entre ces deux directions (fig. 1). La radiance par unité de surface et d'angle solide du détecteur I peut être considérée comme la somme d'une diffusion simple I_s et d'une diffusion multiple I_m : $I = I_s + I_m$. CHANDRASEKHAR (1960) 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 de façon exacte pour n'importe quelle fonction de phase $P(g)$, alors qu'on suppose une diffusion isotrope ($P(g) = 1$) pour la diffusion multiple :

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

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

où ω est l'albédo de simple diffusion (rapport entre l'énergie incidente diffusée et l'énergie totale soit diffusée, soit absorbée par les particules), et $P(g)$ la fonction de phase

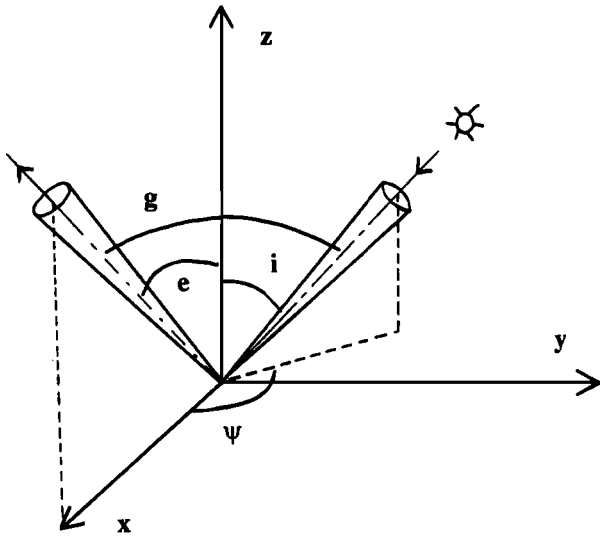


FIG. 1. — Le concept de réflectance bidirectionnelle.
The bidirectional reflectance concept.

des particules ; l'expression $H(\omega, \cos i)H(\omega, \cos e) - 1$ permet d'approximer la diffusion multiple :

$$H(\omega, x) = \frac{1+2x}{1+2\sqrt{1-\omega x}} \quad [3]$$

La réflectance bidirectionnelle s'écrit donc :

$$\rho = \frac{\omega}{4\pi} \frac{\cos i}{\cos i + \cos e} \{P(g) + H(\omega, \cos i) H(\omega, \cos e) - 1\} \quad [4]$$

Ces équations ont été utilisées avec succès par HAPKE (1981) et PINTY *et al.* (1989) pour décrire la réflectance bidirectionnelle de sols rugueux. Nous les avons modifiées afin de généraliser leur domaine d'application.

LA FONCTION DE PHASE $P(g)$

Elle décrit la distribution spatiale de la lumière réfléchie par le volume élémentaire de diffusion d'une surface donnée. Selon la nature des objets constituant cette surface, la fonction de phase peut être de 4 types :

- diffusion isotrope : $P(g) = 1$;
- diffusion spéculaire : la lumière est réfléchie préférentiellement dans la direction opposée à celle de l'éclairement ;
- rétrodiffusion : la lumière est réfléchie préférentiellement dans la direction d'éclairement. Ce cas s'applique à des particules opaques présentant des faces rugueuses orientées au hasard ;
- diffusion mixte : elle regroupe tous les cas intermédiaires entre la diffusion spéculaire et la rétrodiffusion, les deux effets pouvant être conjugués avec un minimum de diffusion près de la normale à la surface.

L'expression de la fonction de phase n'a souvent aucune justification théorique : on la choisit pour sa simplicité et parce qu'elle illustre un type de diffusion pour une expérience donnée. On constate dans le tableau I que la fonction de phase dépend toujours de l'angle de phase g quel que soit le comportement de la surface. La figure 2 a représenté les courbes isophases (même angle de phase) pour un angle d'éclairement $i = 60^\circ$. On peut de même

TABLEAU I
Quelques fonctions de phase extraites de la littérature
A few phase function extracted from the literature

Auteurs	Catégorie	Fonction de phase
HAPKE (1963)	spéculaire	$\frac{4}{9}(1 - \frac{1}{2}\cos g)^2$
VAN DE HULST (1957)	rétrodiffusion	$\frac{2}{3\pi}(\sin g + (\pi - g)\cos g) / \pi$
HAPKE (1963)		$\frac{2}{3\pi} \left[\frac{\sin g + (\pi - g)\cos g}{\pi} + \frac{(1 - \cos g)^2}{10} \right]$
HENYEV et GREENSTEIN (1941)	mixte	$\frac{1 - \theta^2}{[1 + \theta^2 - 2\theta\cos(\pi - g)]^{3/2}}$
HAPKE (1981), PINTY <i>et al.</i> (1989)		$1 + b\cos g + c \frac{3\cos^2 g - 1}{2}$
PINTY et RAMOND (1986)		$1 + (1 - k)\cos^2 g$

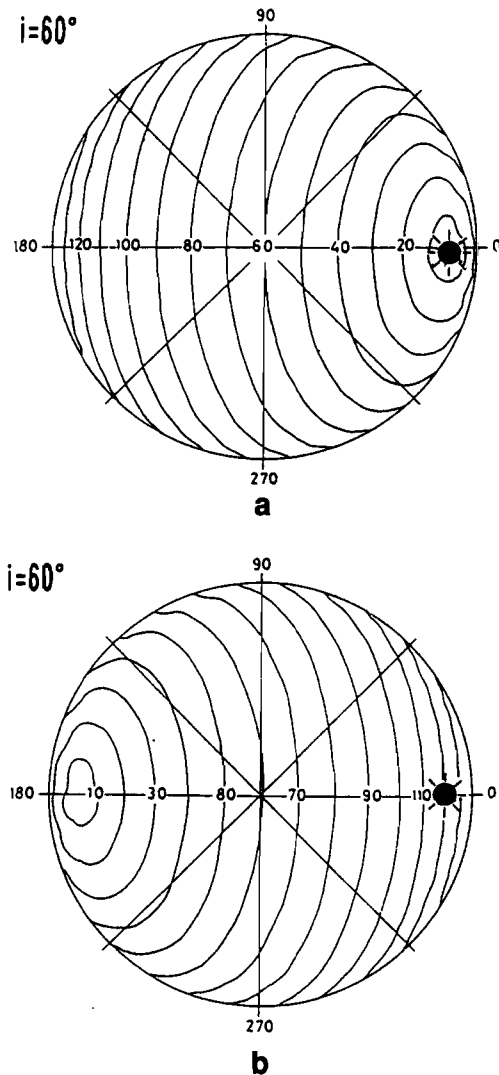


FIG. 2. — Isocontours de (a) l'angle de phase $g = \cos i \cos e + \sin i \sin e \cos \psi$ et de (b) l'angle d'anti-phase $g' = \cos i \cos e - \sin i \sin e \cos \psi$ pour un angle d'éclairement $i = 60^\circ$.

Plot contour of (a) the phase angle $g = \cos i \cos e + \sin i \sin e \cos \psi$, (b) the anti-phase angle $g' = \cos i \cos e - \sin i \sin e \cos \psi$ for an illumination angle $i = 60^\circ$.

tracer les isocontours de la fonction de phase : prenons pour $P(g)$ une somme de polynômes de Legendre (PINTY *et al.*, 1989), $P(g) = 1 + b \cos g + c(3 \cos^2 g - 1)/2$, et conservons le même angle d'éclairement $i = 60^\circ$. $P(g)$ simule bien une rétrodiffusion dominante (fig. 3 a) ; en revanche, une telle paramétrisation ne peut pas représenter correctement un effet spéculaire concentré dans la direction opposée à celle de l'éclairement (fig. 3 b). Nous avons donc défini un angle « d'anti-phase » g' , dont les isocontours sont symétriques à ceux de l'angle de phase g (fig. 2 b), et

avons construit une fonction de phase moyenne $P(g, g')$ composée de polynômes de Legendre et capable d'expliquer aussi bien la rétrodiffusion que l'effet spéculaire qui caractérise les sols lisses (fig. 3 c).

$$P(g, g') = 1 + b \cos g + c \frac{3 \cos^2 g - 1}{2} + b' \cos g' + c' \frac{3 \cos^2 g' - 1}{2} \quad [5]$$

avec $\cos(g) = \cos(i) \cos(e) + \sin(i) \sin(e) \cos(\psi)$ et $\cos(g') = \cos(i) \cos(e) - \sin(i) \sin(e) \cos(\psi)$. Comme pour toute fonction de phase, $P(g, g')$ est normalisée de façon à avoir $\int_{4\pi} P(g, g') d\Omega / 4\pi = 1$ (cas conservatif d'une diffusion parfaite). Cependant, la fonction de phase n'explique pas à elle seule la réflectance directionnelle des sols rugueux : il faut prendre en compte l'effet d'opposition ou de « hot spot ».

L'EFFET D'OPPOSITION

Supposons que la macrostructure du sol soit modélisée par un système discontinu de particules, séparées par des espaces vides : HAPKE (1963) a montré que, pour un angle de phase faible ($g \ll 20^\circ$), la probabilité d'éclairement d'une particule et celle de fuite de la lumière vers le détecteur n'étaient pas indépendantes car la lumière s'échappe préférentiellement dans la direction du « hot spot ». HAPKE (1963) a introduit une fonction de rétrodiffusion $B(g)$ afin de prendre en compte l'effet d'opposition. Cette fonction dépendait initialement de l'angle de phase g , d'un paramètre de rugosité h relié à la porosité du milieu et d'un terme empirique B_0 décrivant l'amplitude du « hot spot ». BECKER *et al.* (1985) ont de même construit une fonction de cavité CF dépendant d'un paramètre de cavité p défini par $p = R/d$, R étant le rayon et d la profondeur de la cavité. En supposant que les particules formant la surface n'étaient pas opaques, HAPKE (1986) a introduit un terme $S(0)$ défini comme la fraction de lumière diffusée près de la surface pour un angle de phase nul : $B_0 = S(0)/(\omega P(0))$. Comme l'ont fait remarquer PINTY et VERSTRAETE (1990), le paramètre B_0 ne découle pas directement de la théorie. Dans certains cas, l'inversion du modèle conduit à $S(0) > 1$ ce qui est un non-sens physique ! En ce qui nous concerne, nous sommes revenus à une formulation simplifiée de B_0 en le fixant à 1. L'équation de transfert radiatif [4] s'écrit donc :

$$\rho = \frac{\omega}{4\pi} \frac{\cos i}{\cos i + \cos e} \{ [1 + B(g)] P(g) + H(\cos i) H(\cos e) - 1 \} \quad [6]$$

$$\text{avec } B(g) = \frac{1}{1 + \tan(g/2) / h} \quad [7]$$

L'équation [7] montre clairement que, pour un angle de phase g donné, une augmentation du paramètre de rugosité h conduit à une augmentation de la fonction de rétrodiffusion.

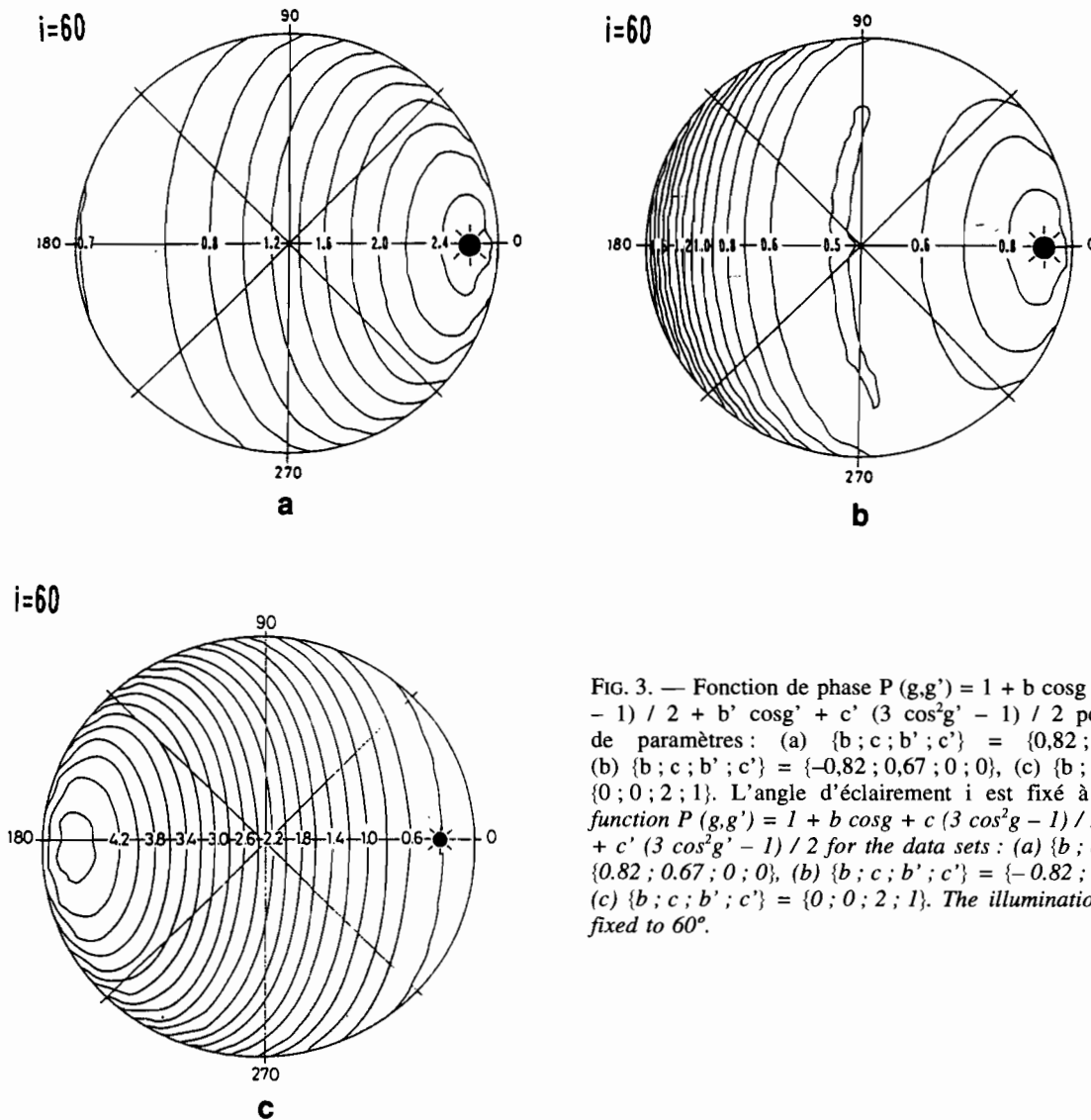


FIG. 3. — Fonction de phase $P(g, g') = 1 + b \cos g + c (3 \cos^2 g - 1) / 2 + b' \cos g' + c' (3 \cos^2 g' - 1) / 2$ pour les jeux de paramètres : (a) $\{b; c; b'; c'\} = \{0,82; 0,67; 0; 0\}$, (b) $\{b; c; b'; c'\} = \{-0,82; 0,67; 0; 0\}$, (c) $\{b; c; b'; c'\} = \{0; 0; 2; 1\}$. L'angle d'éclairement i est fixé à 60° . Phase function $P(g, g') = 1 + b \cos g + c (3 \cos^2 g - 1) / 2 + b' \cos g' + c' (3 \cos^2 g' - 1) / 2$ for the data sets : (a) $\{b; c; b'; c'\} = \{0,82; 0,67; 0; 0\}$, (b) $\{b; c; b'; c'\} = \{-0,82; 0,67; 0; 0\}$, (c) $\{b; c; b'; c'\} = \{0; 0; 2; 1\}$. The illumination angle i is fixed to 60° .

Conséquences

La réflectance bidirectionnelle des sols s'écrit donc en fonction des six paramètres suivants : ω , h , b , c , b' et c' . L'avantage d'une telle approche est qu'elle permet le calcul de la réflectance pour des configurations de mesure autres que celles ayant servi à la calibration (PINTY *et al.*, 1989) et donc l'amélioration de l'estimation de l'albédo. L'albédo, intégrale des réflectances bidirectionnelles dans toutes les directions de l'espace, est une donnée qui intéresse beaucoup les climatologues car il contrôle le bilan radiatif net à la surface de la Terre.

Il est aussi possible de tester la sensibilité de la réflectance à l'angle d'incidence de la source lumineuse, et au

paramètre de rugosité h . Plaçons-nous dans le plan principal de mesure et dans l'hypothèse d'une rétrodiffusion ; on constate que la rétrodiffusion est d'autant plus importante que l'éclairement est rasant (fig. 4). L'effet d'opposition apparaît clairement lorsque l'angle de phase g s'approche de zéro. En fixant i et en faisant varier h , nos simulations montrent qu'en dehors du « hot spot », le paramètre h a une influence non négligeable sur la réflectance du sol. Une augmentation du paramètre de rugosité h entraîne une augmentation de la réflectance et un élargissement de la zone où l'effet du « hot spot » est significatif.

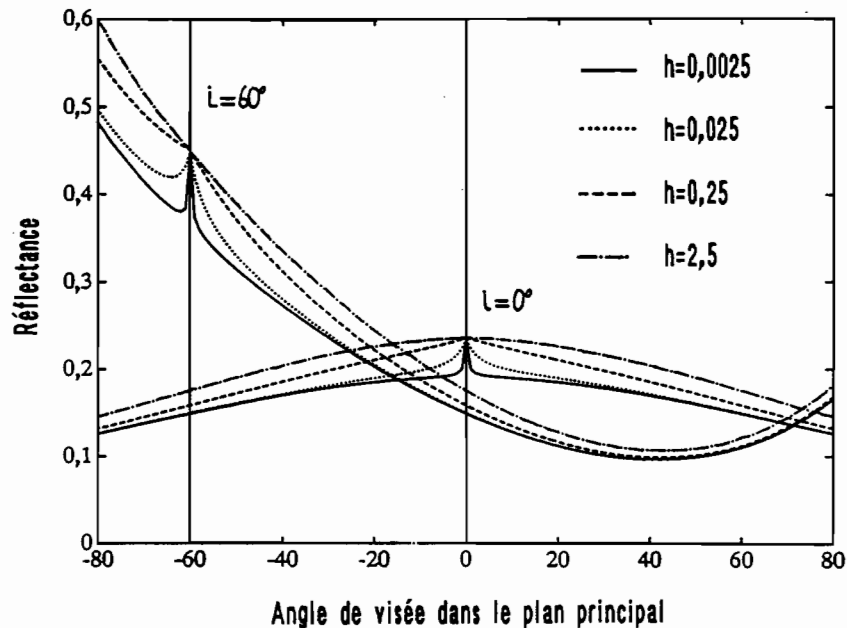


FIG. 4. — Réflectance bidirectionnelle calculée dans le plan principal de mesure (les valeurs négatives indiquent une visée dans la direction d'éclairement) pour 2 angles d'éclairement ($i = 0^\circ$ et 60°), et 4 valeurs du paramètre de rugosité ($h = 0,0025, 0,025, 0,25, 2,5$). Les autres paramètres du modèle sont fixes : $\omega = 0,25$, $b = 0,82$, $c = 0,67$, $b' = 0$ et $c' = 0$ (valeurs adaptées de PINTY *et al.*, 1989). Bidirectional reflectance calculated in the principal plane (negative values of the viewing angle indicate looking from the sun) for 2 illumination angles ($i = 0^\circ$ and 60°), and 4 values of the roughness parameter ($h = 0.0025, 0.025, 0.25, 2.5$). The other parameters of the model are fixed: $\omega = 0.25$, $b = 0.82$, $c = 0.67$, $b' = 0$ and $c' = 0$ (values adapted from PINTY *et al.*, 1989).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Afin de nous affranchir des conditions naturelles d'éclairement, nous avons conçu une expérience de 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. Disposés dans des bacs de 0,5 m de côté, ces sols présentent une large gamme de variation des paramètres du modèle de Hapke (couleur et rugosité). Les échantillons sont éclairés par 5 projecteurs de 2000 W à faisceau lumineux étroit : 1 ver-

tical, 2 dans le plan principal de mesure ($i = 34^\circ$ et 60°) et 2 dans le plan perpendiculaire ($i = 34^\circ$ et 60°).

Nous avons utilisé deux types d'instruments : un radiomètre Barringer à 5 canaux (bandes larges centrées sur $\lambda_1 = 538$ nm, $\lambda_2 = 631$ nm, $\lambda_3 = 851$ nm, $\lambda_4 = 1768$ nm, et $\lambda_5 = 2209$ nm) pour la réflectance directionnelle (42 positions de mesures différentes détaillées dans le tableau II), et le spectroradiomètre Barringer « REFSPEC III » (1 000 bandes spectrales étroites entre 450 nm et 2 450 nm) pour la réflectance spectrale (5 configurations soulignées du tableau II). Les champs de vue étant respectivement de $2,6^\circ \times 15,6^\circ$ (dans le plan perpendiculaire) et $6^\circ \times 7,5^\circ$, les détecteurs ne voient pas la même surface de sol. La pré-

TABEAU II
Configurations de mesure pour les données directionnelles et spectrales (valeurs soulignées)
Measurement configurations for directional and spectral data (underlined values)

Éclairement		Visée							
i	ψ	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			

cision des mesures effectuées avec le radiomètre à bandes larges est de l'ordre de 0,01 à 0,02 (écart quadratique moyen). Elle est évaluée en comparant les valeurs de réflectance dans toutes les configurations pour lesquelles la loi de retour inverse de la lumière s'applique : $\rho(i,e) = \rho(e,i)$. Les deux types de données ont été calibrées par rapport à un panneau de référence en halon (JACKSON *et al.*, 1987 ; MARJORAM *et al.*, 1990).

Considérons deux sols argileux dont l'état de surface est très différent : le premier est très rugueux alors que le second est très lisse. lorsque les spots éclairent la cible

dans le plan perpendiculaire ($\psi = 90^\circ$), les variations de réflectance avec l'angle zénithal de visée sont très faibles dans les deux cas. Les comportements sont en revanche très différents dans le plan principal ($\psi = 0^\circ$ et 180°) : le sol rugueux présente une forte rétrodiffusion (fig. 5 a) alors que le sol lisse réfléchit de façon préférentielle dans la direction spéculaire (fig. 5 b). Ces effets sont d'autant plus marqués que l'angle d'incidence augmente ; on constate que ces courbes expérimentales sont en accord avec les sorties du modèles (fig. 4).

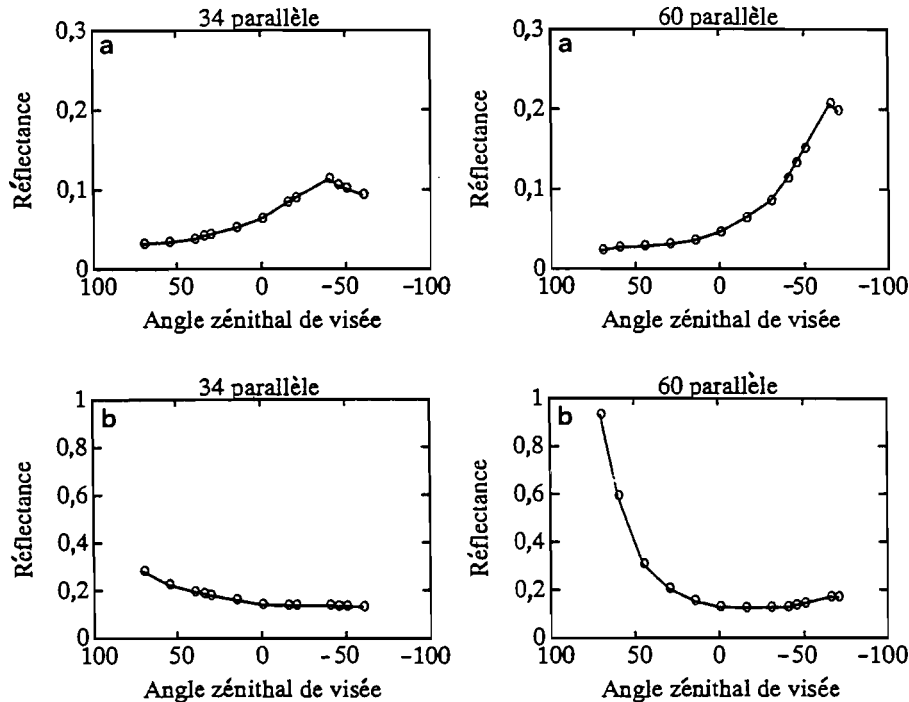


FIG. 5. — Réflectance bidirectionnelle de deux sols : (a) un sol argileux très rugueux, (b) le même sol argileux très lisse. Les mesures ont été acquises sous deux angles d'éclairement ($i = 34^\circ$ et $i = 60^\circ$) et à une longueur d'onde donnée ($\lambda = 538$ nm). *Bidirectional reflectance of two soils: (a) a very rough clay, (b) the same soil very flat. Measurements have been acquired for two illumination angles ($i = 34^\circ$ et $i = 60^\circ$) and a given wavelength ($\lambda = 538$ nm).*

AJUSTEMENT DES PARAMÈTRES DU MODÈLE

L'approche suivie pour évaluer le modèle a consisté à inverser le modèle sur les données expérimentales, c'est-à-dire à déterminer numériquement les paramètres caractéristiques du sol étudié. Nous avons en particulier étudié la variabilité spectrale des paramètres du modèle. L'inversion a été scindée en deux parties correspondant aux deux types de données acquises.

Inversion du modèle sur les données directionnelles

L'inversion est appliquée sur chacun des 26 sols : cela représente au total 130 sous-échantillons, les 5 bandes spectrales larges décrites précédemment ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4,$

et λ_5) étant supposées indépendantes. Le modèle étant non linéaire, l'inversion se ramène à un problème numérique que nous avons résolu par la méthode du simplex (NELDER et MEAD, 1965). Pour chaque échantillon, cette procédure minimise Δ_λ^2 (42 points expérimentaux, 6 inconnues) défini de la manière suivante :

$$\Delta_\lambda^2 = \sum_{k=1}^{42} \{R_{mes}(k) - R_{mod}(k,p)\}^2 \quad [8]$$

où $R_{mes}(k)$ est la réflectance bidirectionnelle de la surface mesurée pour la géométrie $k = (i,e,\psi)$, $R_{mod}(k,p)$ la réflectance bidirectionnelle simulée pour la même géométrie et le jeu de paramètres $p = p(\omega_\lambda, h, b, c, b', c')$. L'écart quadra-

tique moyen ou rms (« root mean square ») donne une idée de la réussite de l'inversion. Le modèle permet de décrire aussi bien la réflectance de sols rugueux rétrodiffusants ($0,003 < \text{rms} < 0,015$) que celle de sols lisses caractérisés par un effet spéculaire important ($0,008 < \text{rms} < 0,02$) et ce, quelle que soit la longueur d'onde. Comme PINTY *et al.* (1989), nous avons constaté sur tous les sols que les termes de fonction de phase ainsi que le paramètre de rugosité étaient peu sensibles à la longueur d'onde ; en effet, la partie réelle de l'indice de réfraction des constituants des sols (IRONS *et al.*, 1989) et surtout les propriétés mécaniques sont peu ou pas dépendants de la longueur d'onde.

En conséquence, nous supposons que les paramètres h , b , c , b' et c' sont constants pour un sol donné.

Nous avons donc ajusté globalement les 5 paramètres précédents en même temps que les cinq valeurs d'albédo (ω_1 , ω_2 , ω_3 , ω_4 , et ω_5) correspondant aux 5 bandes spectrales. Pour chaque échantillon de sol, cela revient à minimiser Δ^2 avec $42 \times 5 = 210$ valeurs mesurées et $5 + 5 = 10$ paramètres inconnus. Les écarts quadratiques moyens du tableau III observés sur tous les sols ($0,006 < \text{rms} < 0,027$) n'ont que très peu augmenté par rapport à l'inversion précédente réalisée sans contrainte sur les paramètres. L'albédo de simple diffusion serait donc le seul paramètre variant avec la longueur d'onde.

TABLEAU III
Paramètres du modèle de réflectance de sol de Hapke calés pour chacun des 26 échantillons de sol
Hapke's soil reflectance model parameters fitted for each of the 26 soil samples

#	Type de sol	Humidité	Rugosité	Albédo de simple diffusion					h	Fonction de phase				rms
				λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5		b	c	b'	c'	
1	argile	***	***	0,16	0,22	0,27	0,35	0,28	0,05	1,31	0,48	0,12	0,07	0,006
2		***	**	0,16	0,20	0,26	0,33	0,26	0,08	1,33	0,38	0,29	-0,04	0,007
3		***	*	0,73	0,77	0,82	0,85	0,80	0,20	-1,77	0,96	0,20	0,13	0,027
4		**	***	0,30	0,37	0,43	0,54	0,51	0,08	1,18	0,67	0,08	-0,13	0,014
5		**	**	0,31	0,37	0,44	0,54	0,52	0,09	1,44	0,64	0,18	-0,05	0,010
6		**	*	0,66	0,74	0,80	0,86	0,84	0,00	0,06	0,53	0,83	-0,06	0,016
7		*	***	0,30	0,36	0,41	0,52	0,50	0,13	1,54	0,77	0,28	-0,01	0,011
8		*	**	0,31	0,37	0,42	0,53	0,52	0,11	1,64	0,66	0,31	-0,02	0,011
9		*	*	0,70	0,77	0,82	0,88	0,87	0,11	0,06	0,10	0,54	0,02	0,016
10	sable	***	***	0,71	0,81	0,87	0,83	0,64	0,27	0,28	-0,00	0,23	-0,04	0,013
11		***	*	0,84	0,89	0,93	0,89	0,76	0,10	-0,36	0,22	0,42	-0,06	0,019
12		**	***	0,81	0,87	0,91	0,95	0,92	0,01	0,75	0,53	0,54	-0,27	0,024
13		**	*	0,92	0,95	0,96	0,98	0,96	0,00	-0,03	0,31	0,09	0,09	0,017
14		*	***	0,81	0,87	0,91	0,95	0,93	0,09	0,74	0,12	0,32	-0,14	0,019
15		*	*	0,87	0,91	0,94	0,96	0,95	0,18	0,17	0,06	0,50	-0,06	0,020
16	terreau	***	***	0,06	0,09	0,24	0,40	0,22	0,02	0,77	0,37	0,19	0,01	0,006
17		***	**	0,06	0,11	0,33	0,55	0,32	0,01	0,28	0,19	-0,14	0,15	0,007
18		***	*	0,16	0,23	0,51	0,69	0,46	0,00	-0,57	0,32	0,08	0,09	0,007
19		**	***	0,09	0,14	0,32	0,62	0,53	0,09	1,20	0,51	0,16	-0,02	0,009
20		**	**	0,10	0,16	0,38	0,70	0,62	0,09	0,91	0,37	0,14	-0,05	0,010
21		**	*	0,15	0,25	0,56	0,81	0,72	0,04	0,94	0,03	0,55	0,01	0,017
22		*	***	0,09	0,14	0,31	0,63	0,55	0,06	1,28	0,65	0,17	0,04	0,010
23		*	**	0,10	0,16	0,36	0,69	0,62	0,16	0,99	0,12	-0,01	0,15	0,015
24		*	*	0,19	0,28	0,57	0,86	0,82	0,01	0,60	0,42	0,16	0,09	0,013
25	pouzzolane	*	***	0,55	0,57	0,57	0,63	0,59	0,27	0,79	-0,06	0,14	0,01	0,011
26	galets	*	***	0,24	0,27	0,28	0,27	0,25	0,09	1,11	0,53	0,33	-0,11	0,007

Arrêtons-nous un instant sur le tableau III : il met en exergue les difficultés rencontrées durant la procédure d'inversion pour séparer les différents paramètres du modèle. On constate tout d'abord des discordances entre les valeurs du paramètre de rugosité et ce qu'on pouvait attendre compte tenu de la rugosité constante. En outre, on observe une augmentation de l'albédo de simple diffusion lorsque la rugosité diminue ; il y a donc conflit possible entre h et ω . La situation est la même entre le paramètre de rugosité et la fonction de phase : théoriquement et comme l'avaient constaté WOESSNER et HAPKE (1987), si

$g < 20^\circ$, alors $B(g) \ll 1$ et peut être ignoré. Cela signifie qu'il n'y a pas de conflit entre la fonction de phase $P(g, g')$ et la fonction de rétrodiffusion $B(g)$ lorsqu'on étudie la diffusion spéculaire des sols. Mais dans ce cas, la signification de h peut être très affectée et sa valeur estimée inutilisable pour l'interprétation ou la comparaison avec d'autres paramètres physiques de rugosité. Enfin, on constate que l'albédo de simple diffusion est le paramètre le plus sensible à l'humidité du sol.

En conclusion, le seul paramètre qui varie spectralement de façon significative est l'albédo de simple diffusion ω .

Jusqu'à présent, nous n'avons déterminé sa valeur que dans 5 bandes larges ; l'étape suivante va consister à fournir son spectre entre 450 nm et 2 450 nm.

Inversion du modèle sur les données spectrales

Le spectre d'albédo de simple diffusion $\omega(\lambda)$ a été estimé à partir des 5 spectres de réflectance mesurés dans les 5 géométries d'éclairement définies précédemment, les paramètres h , b , c , b' et c' déjà calculés étant supposés connus. Là encore, le modèle permet de représenter la réflectance spectrale du sol avec une bonne précision ($\text{rms} = 0,016$) et ce pour des conditions de mesure très différentes. La plus grande dispersion concerne le sable dont la réflectance bidirectionnelle n'était pas décrite aussi précisément que pour les autres sols.

Le spectre de l'albédo de simple diffusion $\omega(\lambda)$ représente les propriétés optiques intrinsèques des matériaux du sol : il est indépendant des conditions de mesure (angles d'éclairement et de visée). La forme de ces spectres varie

d'un sol à l'autre en fonction de la nature des minéraux, de la matière organique ou de la teneur en eau. Le sol argileux, le terreau et le sable présentent des caractéristiques classiques d'absorption avec une diminution de ω entre le proche infrarouge et le visible (fig. 6). Le terreau riche en matière organique réfléchit peu la lumière visible alors que la réflectance augmente fortement dans le proche infrarouge (BAUMGARDNER *et al.*, 1985). Dans le moyen infrarouge, on remarquera trois pics principaux (1 450, 1 770 et 1 950 nm) liés à l'absorption du rayonnement électromagnétique par l'eau du sol. La modélisation de la réflectance spectrale du sol en fonction de sa teneur en eau est complexe ; selon BEDIDI *et al.* (1992), les signatures spectrales des sols latéritiques dans le visible ne peuvent pas se déduire facilement de celles mesurées dans des conditions sèches. Cependant, nos sols présentent des variations quasi homothétiques lorsque la teneur en eau varie : ces variations affectent tout le domaine optique.

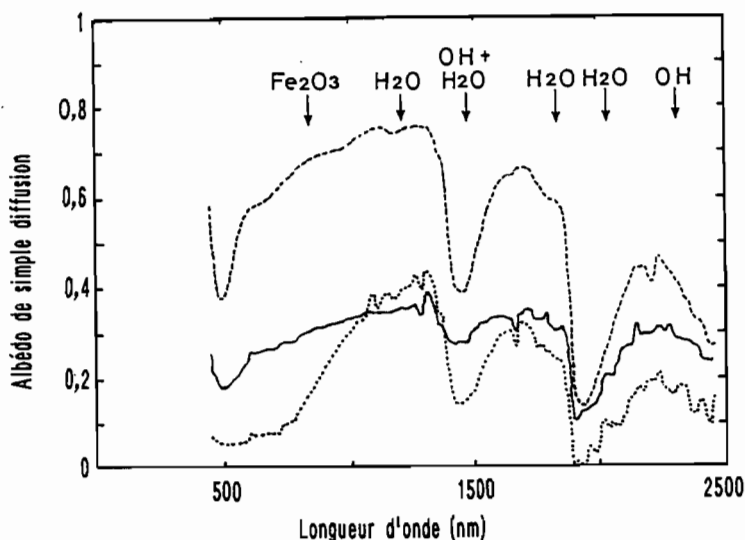


FIG. 6. — Spectres d'albédo de simple diffusion de trois sols différents : (—) sol argileux, (...) terreau, et (---) sable fin. *Single scattering albedo spectra of three different soils: (—) clay, (...) peat, and (---) sand.*

MODÉLISATION DE LA DROITE DES SOLS

Il est généralement admis que les valeurs de réflectance d'un sol acquises dans les conditions les plus variées de configurations de mesure ou d'états de ce sol s'alignent sur une droite dans le plan constitué par deux longueurs d'onde, généralement le rouge et le proche infrarouge : c'est ce qu'on appelle la droite des sols. Cette propriété a été mise à profit pour construire des indices minimisant l'influence du sol lorsqu'on souhaite déterminer les caractéristiques de la végétation (BARET et GUYOT, 1991) ou

l'influence de la végétation lorsque le sol est l'objet principal d'étude (FUKUHARA *et al.*, 1979). La mise en évidence de ces droites des sols est surtout expérimentale ; il serait intéressant de voir si le modèle permet d'expliquer leur déterminisme.

Bases théoriques

Considérons les deux albédos de simple diffusion ω_1 et ω_2 correspondant aux deux longueurs d'onde λ_1 et λ_2 : L'équation [4] établie précédemment donne l'expression des réflectances correspondantes ρ_1 et ρ_2 . Le calcul

$\omega_1 \rho_2 - \omega_2 \rho_1$ aboutit immédiatement à la relation suivante :

$$\rho_2 = \alpha \rho_1 + \beta \quad [10]$$

avec

$$\alpha = \frac{\omega_2}{\omega_1} \quad [11]$$

et

$$\beta = \frac{\omega_2}{4\pi \cos i + \cos e} (H(\omega_2, \cos i)H(\omega_2, \cos e) - H(\omega_1, \cos i)H(\omega_1, \cos e)) \quad [12]$$

Les équations [10] à [12] sont les fondements de la droite des sols :

— la pente α est le rapport entre les albédos de simple diffusion ; par conséquent, elle ne dépend que du type de sol et du couple de longueurs d'onde choisi. La configuration de mesure (angles de visée et d'éclairement) ainsi que les paramètres de rugosité (h) et de fonction de phase ($P(g, g')$) n'affectent pas la pente de la droite des sols ;

— l'ordonnée à l'origine β est la différence de diffusion multiple entre les deux longueurs d'onde ; comme pour la pente, ni h ni $P(g, g')$ n'apparaissent dans son expression.

On observera donc une droite des sols entre deux longueurs d'onde lorsque h et $P(g, g')$ varieront. En outre, on peut montrer que pour des albédos donnés, β varie très peu en fonction de la géométrie de mesure ; la variation est maximale pour les fortes valeurs de ω_2 ($\omega_2 > 0,8$) et les faibles valeurs de α (c'est-à-dire $\omega_1 \approx \omega_2$), mais elle n'excède pas 0,05. En conclusion, on observera aussi une droite des sols lorsque les angles de visée et d'éclairement varient. L'effet d'une variation de ω sur la droite des sols est plus complexe. Si un facteur affecte l'albédo de simple diffusion de façon proportionnelle — dans cette situation le rapport $\alpha = \omega_2/\omega_1$ est presque constant —, le concept de droite des sols reste valable pour des valeurs moyen-

nement élevées de ω_2 . C'est ce qui se passe lorsque l'humidité du sol change : sur les domaines spectraux où l'eau absorbe peu la lumière, le spectre de l'albédo de simple diffusion d'un sol humide $\omega(\theta)$ est relié de façon presque linéaire à celui d'un sol sec $\omega(\theta_0)$. On a donc :

$$\frac{\omega_1(\theta)}{\omega_1(\theta_0)} = \frac{\omega_2(\theta)}{\omega_2(\theta_0)} \Leftrightarrow \frac{\omega_1(\theta)}{\omega_2(\theta)} = \frac{\omega_1(\theta_0)}{\omega_2(\theta_0)} \quad [13]$$

Des droites de sol seront donc observées dans le visible et le proche infrarouge lorsque l'humidité du sol varie. En conclusion, cette étude théorique montre qu'on observe des droites de sol lorsque la configuration de mesure, la rugosité de surface ou la fonction de phase varient. On devrait aussi les observer lorsque le rapport entre les albédos de simple diffusion reste quasi constant, sauf pour les fortes valeurs de ω .

Mise en évidence expérimentale

Reprenons notre jeu de données expérimental et plus particulièrement les réflectances bidirectionnelles. Pour chacun des 26 sols et les 20 combinaisons possibles des 5 canaux, nous avons déterminé les paramètres de la droite des sols α et β avec la configuration de mesure comme unique facteur de variation de la réflectance. Les écarts quadratiques moyens associés à ces droites sont dans tous les cas très faibles et de l'ordre de 0,013 (tabl. IV). Ceci confirme nos hypothèses. De plus, les pentes estimées sont en bon accord avec les rapports d'albédos de simple diffusion calculés. Comme prévu, à chaque type de sol correspond une droite des sols différente : le terreau a de très fortes pentes et une faible ordonnée à l'origine. Au contraire, le sable mais aussi la pouzzolane ou les galets ont des pentes très faibles. En outre, le sable est caractérisé par les valeurs de β les plus fortes à cause de sa forte réflectivité. Le type de sol est donc le principal facteur de variation de la droite des sols.

TABLEAU IV

Écarts quadratiques moyens (rms) associés aux droites des sols calculées pour différentes combinaisons des facteurs de variation rugosité et humidité. Les longueurs d'ondes $\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 \lambda_5$ correspondent à 538 nm, 631 nm, 851 nm, 1 768 nm, et 2 209 nm

Root mean squares (rms) values associated to soil lines computed for several combinations of the factors of variation (roughness and moisture). The wavelengths $\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 \lambda_5$ correspond to 538 nm, 631 nm, 851 nm, 1 768 nm, and 2 209 nm.

Facteur de variation		Longueurs d'onde		
rugosité	humidité	$\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 \lambda_5$	$\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3$	$\lambda_4 \lambda_5$
x	x	0,013	0,008	0,012
x		0,037	0,011	0,022
	x	0,016	0,011	0,014

En considérant pour un même type de sol un état d'humidité donné et en regroupant les différents niveaux de rugosité, on peut observer l'effet d'une variation de la

rugosité de surface sur la droite des sols. La rugosité affecte à la fois le paramètre de rugosité et les quatre paramètres de fonction de phase : selon les équations [10] à

[12], on devrait constater une droite des sols. Le tableau IV montre que c'est encore le cas sauf peut-être dans le moyen infrarouge à cause de variations non homothétiques de l'albédo de simple diffusion.

Enfin, parmi les paramètres du modèle, nous avons vu que l'albédo de simple diffusion était le plus sensible à des changements d'humidité du sol. En considérant cette fois-ci une rugosité de surface donnée, le tableau IV montre que les écarts autour de la droite du sol n'augmentent pas de façon significative lorsque les différents niveaux d'humidité sont confondus. En fait, ceci est surtout valable dans le visible et le proche infrarouge, mais ce n'est plus le cas dans le moyen infrarouge où l'eau absorbe fortement.

CONCLUSION

Le modèle de Hapke permet donc de décrire avec une bonne précision la réflectance spectrale et directionnelle des sols entre 450 nm et 2 450 nm. On distingue deux catégories de variables d'entrée : celles qui varient spectralement (albédo de simple diffusion ω) et celles qui sont indépendantes de la longueur d'onde (paramètres de rugosité h et de fonction de phase b , c , b' et c'). Ces derniers sont surtout fonction de l'indice de réfraction (partie réelle) des constituants du sols : leur variation spectrale

est suffisamment faible pour qu'on puisse les supposer constants sur tout le domaine optique. Un des avantages du modèle est son inversibilité. On notera cependant la difficulté parfois rencontrée pour séparer le paramètre de rugosité h des paramètres de fonction de phase. Ce modèle nous permet de nous affranchir des conditions de mesure (géométries d'éclairement et de visée) et de proposer des variables caractéristiques des propriétés optiques intrinsèques des sols. Ceci est très important si on veut comparer des spectres de sol acquis dans différentes conditions. Les perspectives d'utilisation de ce modèle sont donc nombreuses.

Enfin il faudrait encore donner un sens physique au paramètre de rugosité du sol h ou relier le paramètre ω à l'humidité du sol. Pour l'instant, ces caractéristiques de surface peuvent être correctement estimées à partir de données hyperfréquences. Dans le domaine optique, il y a eu peu de tentatives pour comprendre ces phénomènes complexes : une interprétation correcte des paramètres inversés difficilement mesurables tels que l'albédo de simple diffusion ou la fonction de phase passe cependant par une meilleure description de la rugosité de surface. La poursuite de ces travaux devrait améliorer notre connaissance de la réflectance spectrale et directionnelle des surfaces naturelles.

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

BIBLIOGRAPHIE

- BARET (F.), GUYOT (G.), 1991. — Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sens. Environ.*, 35 : 161-173.
- BARET (F.), JACQUEMOUD (S.), HANOCQ (J.F.), 1993. — The soil line concept in remote sensing. *Remote Sens. Rev.*, 7 : 65-82.
- BAUMGARDNER (M.F.), SILVA (L.F.), BIEHL (L.L.), STONER (E.R.), 1985. — Reflectance properties of soils. *Adv. Agron.*, 38 : 1-44.
- BECKER (F.), RAMANANTSIHENA (P.), STOLL (M.P.), 1985. — Angular variation of the bidirectional reflectance of bare soils in the thermal infrared band. *Appl. Opt.*, 24 (3) : 365-375.
- BEDIDI (A.), CERVILLE (B.), MADEIRA (J.), POUGET (M.), 1992. — Moisture effects on spectral characteristics (visible) of lateritic soils. *Soil Sci.*, 153 (2) : 129-141.
- CHANDRASEKHAR (S.), 1960. — *Radiative Transfer*. Dover Publications.
- 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.
- 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.
- DEERING (D.W.), ECK (T.F.), OTTERMAN (J.), 1990. — Bidirectional reflectances of selected desert surfaces and their three-parameter soil characterization. *Agric. Forest Meteorol.*, 52 : 71-93.
- ESCADAFAL (R.), 1989. — *Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection*. Paris, Orstom, coll. Études et Thèses.
- FUKUHARA (M.), HAYASHI (S.), YASUDA (Y.), 1979. — « Extraction of soil information from vegetated areas ». In : *Machine Processing of the Remotely Sensed Data*, Purdue University, West Lafayette (IN) : 242-252.
- GROVE (C.I.), HOOK (S.J.), PAYLOR II (E.D.), 1992. — *Laboratory reflectance spectra of 160 minerals, 0.4 to 2.5 micrometers*. JPL Publication 92-2, 405 p.
- HAPKE (B.), 1963. — A theoretical Photometric function for the lunar surface. *J. Geophys. Res.*, 68 : 4571-4586.
- HAPKE (B.), 1981. — Bidirectional reflectance spectroscopy. 1. Theory. *J. Geophys. Res.*, 86 : 3039-3054.
- HAPKE (B.), 1984. — Bidirectional reflectance spectroscopy. 3. Correction for macroscopic roughness. *Icarus*, 59 : 41-59.
- HAPKE (B.), 1986. — Bidirectional reflectance spectroscopy. 4. The extinction coefficient and the opposition effect. *Icarus*, 67 : 264-280.

- HAPKE (B.), WELLS (E.), 1981. — Bidirectional reflectance spectroscopy. 2. Experiments and observations. *J. Geophys. Res.*, 86 : 3055-3060.
- HENYEY (L.G.), GREENSTEIN (J.L.), 1941. — Diffuse radiation in the galaxy. *Astrophys J.*, 93 : 70-83.
- HUNT (G.R.), 1980. — « Electronic radiation: The communications link in remote sensing ». In Siegal (B.S.), Gillespie (A.R.), éd. : *Remote sensing in geology*, New York, Wiley : 5-45.
- IDSO (S.B.), JACKSON (R.D.), REGINATO (R.J.), KIMBALL (B.A.), NAKAYAMA (F.S.), 1975. — The dependence of bare soil albedo on soil water content. *J. Appl. Meteorol.*, 14 : 109-113.
- IRONS (J.R.), WEISMILLER (R.A.), PETERSEN (G.W.), 1989. — « Soil reflectance ». In Asrar (G.), éd. : *Theory and Applications of Optical Remote Sensing*, Wiley Interscience : 66-106.
- ISHIDA (T.), ANDO (H.), FUKUHARA (M.), 1991. — Estimation of complex refractive index of soil particles and its dependence on soil chemical properties. *Remote Sens. Environ.*, 38 : 173-182.
- JACKSON (R.D.), MORAN (M.S.), SLATER (P.N.), BIGGAR (S.F.), 1987. — Field calibration of reference reflectance panels. *Remote Sens. Environ.*, 22 : 145-158.
- JACQUEMOUD (S.), BARET (F.), HANOCQ (J.F.), 1992. — Modeling spectral and bidirectional soil reflectance. *Remote Sens. Environ.*, 41 : 123-132.
- KASUMOV (O.K.), NABIEVA (T.A.), TERESHENKOV (O.M.), 1992. — Study of the spectral characteristics of soils of the Azerbaijan SSR, *Sov. J. Remote Sens.*, 9 (4) : 608-617.
- MARJORAM (A.R.), VICKERY (P.J.), MCKENZIE (D.C.), 1990. — A polytetrafluoroethylene coating for field reference reflection panels. *Int. J. Remote Sensing*, 11 (6) : 1047-1053.
- NELDER (J.A.), MEAD (R.A.), 1965. — A simplex method for function optimization, *Comput. J.*, 7 : 308-313.
- PINTY (B.), RAMOND (D.), 1986. — A simple bidirectional reflectance model for terrestrial surfaces. *J. Geophys. Res.*, 91 (D7) : 7803-7808.
- PINTY (B.), VERSTRAETE (M.M.), 1990. — Extracting information on surface properties from bidirectional reflectance measurements. *J. Geophys. Res.*, 96 (D2) : 2865-2874.
- PINTY (B.), VERSTRAETE (M.M.), DICKINSON (R.E.), 1989. — A physical model for predicting bidirectional reflectances over bare soils. *Remote Sens. Environ.*, 27 : 273-288.
- STONER (E.R.), BAUMGARDNER (M.F.), 1981. — Characteristic variations in reflectance of surface soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45 : 1161-1165.
- STRAHLER (A.H.), WOODCOCK (C.E.), SMITH (J.A.), 1986. — On the nature of models in remote sensing. *Remote Sens. Environ.*, 20 : 121-139.
- TWOMEY (S.A.), BOHREN (C.F.), MERGENTHALER (J.L.), 1986. — Reflectance and albedo differences between wet and dry surfaces. *Appl. Opt.*, 25 : 431-437.
- VINCENT (R.K.), HUNT (G.R.), 1968. — Infrared reflectance from mat surfaces. *Appl. Opt.*, 7 (1) : 53-59.
- WOESSNER (P.), HAPKE (B.), 1987. — Polarization of light scattered by clover. *Remote Sens. Environ.*, 21 : 243-261.

Effets des sels sur la réflectance et télédétection des sols salés

Bernard MOUGENOT

Antenne de télédétection Orstom, Centre Agrymet, BP11416, Niamey, Niger

RÉSUMÉ

La présence de sels dans les sols et les nappes modifie les états de surface. La télédétection facilite leur identification et améliore la cartographie des sols salés. On distingue des effets directs sur la réflectance avec la présence de sels en surface (croûtes ou efflorescences salines), et des effets indirects sur la structure (pseudosables), la végétation (stress salin, végétation spécifique) ou l'absence de végétation dans les cas extrêmes. Les caractéristiques spectrales des sels du visible au moyen infrarouge (0,4 à 2,5 μm), étudiées en spectrophotométrie au laboratoire, correspondent à des bandes d'absorption groupées dans le moyen infrarouge sous l'effet de l'eau libre ou intégrée dans le réseau cristallin (1,45 et 1,9 μm), des ions hydroxyles (OH , bandes à 1,4 et 2,2 μm) et de leurs liaisons avec Al^{3+} , et des ions carbonates et borates. Les ions chlorures et sulfates ne présentent pas de bandes d'absorption dans ce domaine. Parmi les anions, seul le fer provoque des absorptions dans le visible et le proche infrarouge. Sur sol nu, les effets principaux des sels précipités en surface sont : (1) une augmentation de la réflectance moyenne, (2) une diminution dans le début du visible jusqu'à 0,5 μm environ, de l'absorption due au fer présent à la surface du sol, (3) une diminution relative de la réflectance dans le moyen infrarouge due principalement aux bandes des ions hydroxyles et de l'eau. Cet effet semble se prolonger jusqu'au proche infrarouge dans le cas de sels plus ou moins hygroscopiques. Les mesures radiométriques de terrain et les données satellitaires confirment ces résultats. Les effets des sels se combinent à ceux des autres composants du sol et de sa rugosité. Les sels ne sont pas détectés en quantité plus faible que 10 à 15 % environ selon les sels. Les rapports de canaux les plus utilisés combinent soit le proche infrarouge et le visible (rapport 4/1 TM, ou 3/1, 3-2 Spot), soit les bandes dans l'infrarouge (7/4 ou 7/5 TM). Les conséquences des sels sur la végétation correspondent à une diminution de taille et de densité, en relation avec l'accroissement de la salinité des sols et des nappes. La présence de végétation halophyte permet de préciser les niveaux de salinité. Les confusions qui apparaissent entre les effets du stress salin et du stress hydrique sont levées par des suivis saisonniers. Les contrôles sur le terrain demeurent nécessaires.

MOTS CLÉS : Télédétection — Réflectance — Spectres — Sels — Sols salés — États de surface — Indices radiométriques.

ABSTRACT

EFFECT OF SALTS ON REFLECTANCE AND REMOTE SENSING OF SALT AFFECTED SOILS

Possibilities of identification of salt affected soils by remote sensing depend on modifications of bare soil surface or vegetation by salts. Spectral properties of salts in visible and middle infrared spectrum (0.4 - 2.5 μm) are described (figure 1, table 1). The main absorption bands are observed on middle and near infrared spectrum. Halide and sulfate anions cannot induce absorption bands. Overtones or combinations tones appear for H_2O , OH^- , Al-OH , carbonate and borate groups (figure 1). Only ferric iron presents absorption bands in visible and near infrared spectrum. The effects of salts are : (1) increasing of reflectance with quantity of salt on the surface and wavelength up, (2) relative higher reflectance in blue band by masking ferric oxydes, (3) fall-off in middle and sometimes near infrared bands

(fig. 2 and 3) due to water in crystal lattice (1.45 and 1.9 μm) and hydroxyl group (1.4 and 2.2 μm). Moisture or absorbed water in fresh samples, ferric oxydes and clays inclusions can induce corresponding features. Reflectance decreases with increasing of moisture and salts. Effects are opposite in visible spectrum (table 2). Salts are not easily identified under 10 or 15 %. To detect salt effects, satellite ratios combined visible and near infrared bands (4/1 TM, 3/1 or 3-2 Spot), or infrared bands (7/4 or 7/5 TM for sulfates and water effects). Salts induce less plant cover correlated with the salinity levels of soil and groundwater. More precise informations on salinity can be derive from salt tolerant vegetation combined with coverage rate (fig. 4). Misinterpretations with saline stress are due to water stress. Choice of dates is important to evidence salinity. Ground validations remain necessary to establish relationships between surface features, salts and reflectance.

KEYWORDS : Remote sensing — Reflectance — Spectra — Salts — Salt affected soils — Surface features radiometric index.

INTRODUCTION

Les sels issus des sols et des nappes peuvent modifier temporairement ou en permanence les états de surface. Ces changements affectent la végétation et la surface du sol nu. La dynamique spatiale et temporelle des sols salés, particulièrement en zone semi-aride ou aride, nécessite un suivi au sol facilité par la télédétection aérienne et satellitaire (MANCHANDA, 1984 ; SHI YUANCHUN et XIE JIN GRONG, 1988 ; MOUGENOT *et al.*, 1993). La fugacité de certains processus comme la précipitation de sels en surface rendra parfois difficile l'identification directe et à tout moment des domaines salés. À l'inverse, des surfaces salées continues, épaisses, stables et homogènes, plutôt d'origine géologique, servent de site de calibration aux satellites (CONEL *et al.*, 1988).

La télédétection doit devenir un outil de quantification en relation avec les différents constituants des états de surface et leur organisation. Les satellites opérationnels actuels possèdent des bandes spectrales d'environ 100 nm. Elles sont beaucoup plus larges que les bandes d'absorption observées sur les spectres des différents constituants au laboratoire. On tente cependant de donner un sens physique aux données satellitaires et d'apprécier les limites de cet outil pour identifier et quantifier les constituants en mélange d'un état de surface.

L'effet du constituant « sel » sur la réflectance sera présenté dans les longueurs d'onde du visible au moyen infrarouge (400-2 500 nm). Les absorptions dues aux sels sous forme de chlorures, sulfates, borates et carbonates, s'ajoutent à celles des autres constituants comme le fer, l'eau, la matière organique ou les argiles. La réalisation de courbes spectrales de sels au laboratoire permet de comprendre et de prévoir la réflectance terrain et satellitaire de la surface des sols salés et de proposer des indices radiométriques spécifiques.

Les exemples sont issus de la bibliographie et de mesures sur des états de surface salés de basse Casamance

au Sénégal (spectres réalisés au laboratoire de Minéralogie et Cristallographie de Paris-VI).

LES ÉTATS DE SURFACE DES SOLS SALÉS

États de surface des sols nus salés

Il faut que les sels précipitent en surface pour être détectés dans le domaine spectral étudié. C'est le cas des sols à horizon salin ou gypseux décrits par de nombreux auteurs (SERVANT, 1974 ; LOWENSTEIN et HARDIE, 1985 ; EPEMA, 1986 a ; SZABOLCS, 1988). Les descriptions et les analyses doivent tenir compte de la microrépartition verticale des cristaux de sels (CHEVERRY *et al.*, 1972 ; HANNA et STOOPS, 1976). L'identification des sels sur le terrain n'est pas évidente quand les cristaux sont très fins et transparents.

Les principaux états de surface observés sont :

- les croûtes salines ou encroûtements ;
- les efflorescences salines ;
- les microhorizons à structure microagrégée et à sels en aiguilles (pseudosables, « moquette »). Ces formations remaniées par les vents constituent des dépôts éoliens sous forme de voiles ou de dunettes (nebkas) ;
- croûtes algaires salines ;
- croûtes structurales, de décantation, à structure polygonale avec ou sans sels apparents.

Il existe de nombreux intermédiaires entre ces états de surface, par exemple les croûtes salines se structurant en polygones puis en microagrégats. Des observations sur des sols salés à chlorures et sulfates dans le pseudodelta du fleuve Sénégal (MOUGENOT, 1983) et en Tunisie (EPEMA, 1990) montrent l'influence du niveau et de la qualité des nappes, des pluies, de la rosée et du degré d'hygroscopicité des sels. Les pratiques culturales modifient également les cycles journaliers ou saisonniers des sels.

Les associations de ces états de surface dépendent de la microtopographie (surfaces à pseudosables sur les parties hautes, croûtes salines sur les parties basses). Le plus sou-

vent, les unités de surface avec une végétation souvent spécifique et éparse sont de dimensions hectométriques à kilométriques, adaptées à la résolution spatiale des capteurs des satellites haute définition actuels.

Végétation

Les effets des sels sur la végétation correspondent à une diminution de taille et du recouvrement au sol des différentes strates selon leur résistance à la salinité, avec à l'extrême le sol toujours nu. La végétation spécifique des domaines salés peut être un bon indicateur en association aux sols nus salés (EVERITT *et al.*, 1977 ; SHARMA and BHARGAVA, 1988 ; MOUGENOT, 1989). Les bandes spectrales du moyen infrarouge, sensibles à l'eau des plantes, complètent celles du proche infrarouge et du rouge, sensibles à l'activité chlorophyllienne et au taux de recouvrement par la végétation (HARDISKY *et al.*, 1983).

États de surface et détection des sols salés

Le domaine de longueur d'onde exploré ne donne des informations que sur la surface sans pénétrer dans le sol. La validation des relations entre les états de surface (sol nu et végétation) et les sols et nappes (paramètres exogènes ou non perçus) demeure indispensable. Il existe en général une bonne corrélation entre la géomorphologie et la répartition des sols salés. C'est une aide précieuse pour réaliser l'extension spatiale des résultats, quand les données de télédétection ne sont pas suffisantes pour cartographier les surfaces salées (MANCHANDA et KHANNA, 1981 ; ROETERS, 1988).

Les sols salés présentent une forte variabilité spatiale et temporelle de la quantité et de la répartition des sels (BOIVIN, 1990). La résolution au sol des données de télédétection spatiale entraîne un changement de niveau de caractérisation qui peut masquer avantageusement la variabilité à faible distance (MOUGENOT, 1991 b).

La cartographie des sols très salés par télédétection ne pose pas de difficultés. En revanche les sols à horizon sodique, les sols peu salés ou en voie de salinisation sans manifestations spécifiques de surface, sont mal identifiés et les surfaces sous-estimées (SINGH *et al.*, 1983 ; VENKATARATNAM, 1983 ; JAIN *et al.*, 1988 ; LOUBERSAC *et al.*, 1988).

CARACTÉRISTIQUES SPECTRALES DES SELS ET DES SURFACES SALÉES

Bandes d'absorption des sels

Les bandes d'absorption fondamentales des groupements anioniques au-delà de 1 200 nm sont provoquées par des combinaisons et harmoniques de phénomènes vibratoires (extension et torsion) situées au-delà de 2 500 nm. Les cations ne réagissent pas directement, sauf le fer. Les transferts de charges du fer ferrique débordent des bandes U.V. vers le visible en dessous de 600 nm (HUNT *et al.*, 1971 b). Sur l'ensemble de l'intervalle 400-2 500 nm s'ajoutent les effets plus limités de transfert d'énergie thermique et de l'influence du champ cristallin jusqu'au proche infrarouge (PIR) (MULDERS, 1987 ; GOETZ, 1990).

TABLEAU I. — Origine des principales bandes d'absorption observées dans les sels
Origin of the main absorption bands observed in salts

Ions	Principales bandes d'absorption	Principaux types de sels (1)
Fe ⁺⁺⁺	- en dessous de 600 nm (transfert de charge) et autour de 870 nm (champ cristallin)	sulfates et minéraux en inclusions
H ₂ O	- bandes à 1 450 et 1 900 nm (eau adsorbée ou de constitution)	sulfates hydratés, chlorures hygroscopiques et halite
OH ⁻	- bandes à 1 400 et 2 200 nm	sulfates hydroxylés
SO ₄ ⁻	- très faibles absorptions harmoniques (bande initiale à 9 090 nm)	sulfates
CO ₃ ⁻ BO ₃ ⁻	- séries de bandes à partir de 1 600 nm	carbonates, borates
Cl ⁻	- pas d'absorption	chlorures
Fe, Al-OH	- pas de bandes avec le fer, bandes dans le moyen infrarouge avec l'aluminium (1 775 nm)	sulfates hydroxylés et hydratés (H-O-H)

(1) Exemples de sels étudiés : chlorures : halite (NaCl), chlorures hygroscopiques (CaCl₂, MgCl₂, tachyrite : CaMg₂Cl₆.12H₂O) ; sulfates : simples (thénardite : Na₂SO₄, hydroxylés (jarosite : KFe₃(SO₄)₂(OH)₆, alunite : KAl₃(SO₄)₂(OH)₆, hydratés (gypse : CaCO₄.2H₂O), tamarugite : NaAl(SO₄)₂.26H₂O), hydroxylés et hydratés ; carbonates : calcite (CaCO₃), (pas de mesures sur Na₂CO₃ ; borates : borax (Na₂B₄O₇.10H₂O).

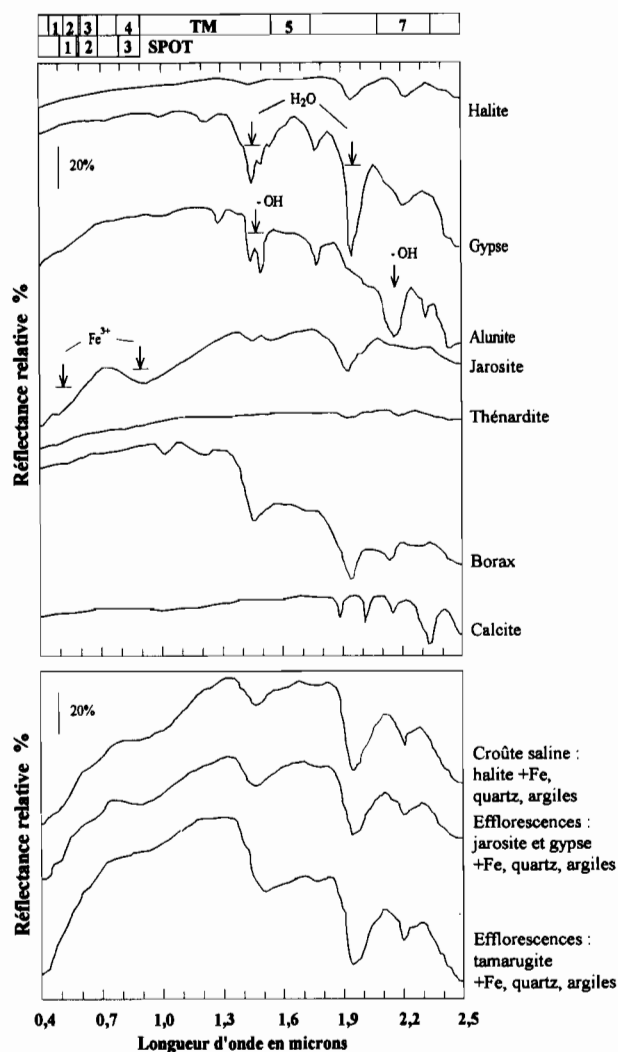


FIG. 1. — Spectres au laboratoire entre 0,4 et 2,5 μm de sels purs : halite, gypse, alunite, jarosite, thénardite, borax et calcite ; et d'échantillons de surface (basse Casamance, Sénégal) : croûte à halite (50 % NaCl), à jarosite et gypse, efflorescences de tamarugite (80 %), mélangés avec du quartz (dominant), des oxydes de fer et des argiles (MOUGENOT *et al.*, 1993). La représentation exprime la variation relative de la réflectance indépendamment pour chaque spectre.

*Spectra in laboratory (0.4 to 2.5 μm) of pure salts: halite, gypsum, alunite, jarosite, thenardite, borax and calcite; and of saline soil surfaces: halite crust (50 % NaCl), jarosite and gypsum, tamarugite (80 %) efflorescences, mixed with quartz dominant, ferric oxides and clays, observed in Senegal (MOUGENOT *et al.*, 1993).*

Nous avons rassemblé dans le tableau I, les principales bandes d'absorption des anions présents dans les sels. Les caractéristiques spectrales de sels du visible au moyen infrarouge étudiées au spectrophotomètre (fig. 1) corres-

pondent à des bandes d'absorption groupées essentiellement dans le moyen infrarouge sous l'effet :

- de l'eau libre ou intégrée dans le réseau cristallin ;
- des ions hydroxyles (OH^-) et de leurs liaisons avec les ions Al^{3+} ;
- des ions carbonates (HUNT et SALISBURY, 1971) et borates.

Les ions chlorures et sulfates sont transparents dans ce domaine (HUNT *et al.*, 1971 c, 1972).

Effets des sels et de l'humidité sur le spectre d'un échantillon de sol

Les cristaux de halite sont transparents sur l'ensemble du spectre et jusqu'à 1 200 nm pour le gypse (fig. 1). La réflectance a été mesurée au spectrophotomètre en laboratoire sur des échantillons de sable (sol dunaire de basse Casamance), mélangés à des sels purs. Le rayonnement réfléchi et diffusé par un assemblage de grains de 50 à 200 μm atteint 60 à 70 % de la lumière incidente dans le visible et le proche infrarouge. En dessous d'une longueur d'onde de 2 000 nm, l'accroissement de la réflectance n'est pas proportionnel à la quantité de sels en mélange avec les sables fins. Cet accroissement est plus marqué dans le visible jusqu'à 575 nm environ (fig. 2). L'effet diluant sur les bandes d'absorption du fer dans les bandes bleu et verte est atténué par la dispersion des grains de sels entre les sables. Dans ces conditions l'effet de la halite se fait seulement sentir à partir d'un taux pondéral de 10 à 15 % environ.

Une expérience similaire a été réalisée avec des sels extraits d'une croûte saline d'un sol salé de basse Casamance, où dominant la halite et le gypse (80 et 15 % environ). La réflectance croît de façon semblable dans le visible et le proche infrarouge. Les bandes de l'eau entraînent cependant un affaissement de l'ensemble du spectre au-delà de 1 350 nm. Cet effet augmente avec des sels fortement hydratés ou hydroxylés comme la tamarugite ou la jarosite. Ces échantillons, séchés à 60°C pour éviter toute transformation des sels, ont un comportement hygroscopique en quelques heures à quelques jours même pour la halite. Ces absorptions entraînent un affaissement du spectre qui peut être observé jusque dans le proche infrarouge (EVERITT *et al.*, 1988 ; MOUGENOT, 1991 a).

Au cours de la dessiccation des surfaces salées, les premiers sels peu solubles commencent à précipiter quand la solution du sol arrive à saturation, et les derniers avant le dessèchement total apparent. La dessiccation d'un échantillon humide présente un comportement spectral similaire à celui d'un échantillon où les sels cristallisent en surface.

Dans le visible, les effets des sels et de la dessiccation s'additionnent pour accroître la réflectance (tabl. II). La couleur exprime le comportement spectral d'une surface

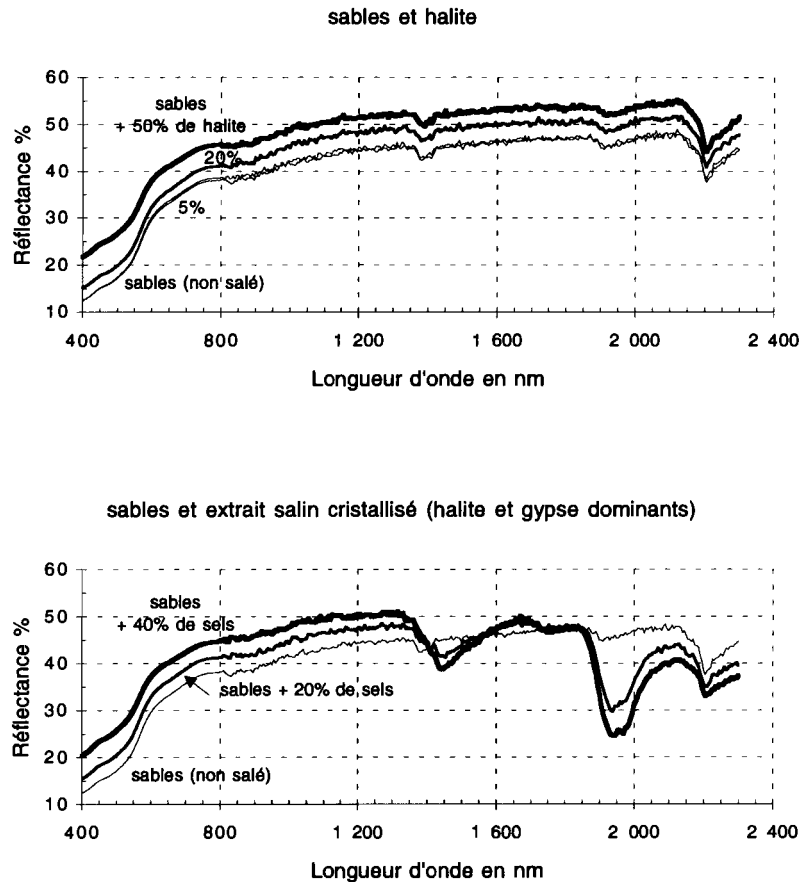


FIG. 2. — Spectres entre 0,4 et 2,5 μm d'un sol sableux brun rouge clair, séché à 60 °C et après mélange avec des sels. En haut, avec de la halite (NaCl), en bas, avec un extrait salin cristallisé à halite et gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) dominants.

Effects of salt addition on the spectrum of a sandy soil (0.4 et 2.5 μm) : halite, and saline soil extract with halite and gypsum.

dans le visible (ESCADAFAL *et al.*, 1988). On utilisera, par similitude avec la notation utilisée dans le code de couleur Munsell, la représentation en coordonnées de Helmholtz sur le diagramme de chromaticité C.I.E., soit : longueur d'onde dominante (teinte), pureté d'excitation (pureté ou saturation) et luminance (clarté). Sous l'effet de la dessiccation et de l'augmentation de la quantité de sel, la teinte devient moins rouge et la clarté augmente. La pureté tend à croître faiblement pour le sol étudié, plus nettement en présence de sels (purs ou issus d'extraits salins de surface).

Ces effets peuvent donc se compenser si une surface avec des sels cristallisés reste humide, alimentée par exemple par une nappe peu profonde.

Dans l'infrarouge proche et moyen (PIR et MIR), les effets sont opposés. Cependant, la présence de sels hydratés ou hygroscopiques, ou d'eau libre résiduelle (2 à 3 %), maintient un effet des bandes de l'eau avec un affaissement généralisé du spectre du PIR vers le MIR. Les bandes des

ions hydroxyles et des liaisons Al-OH ont des effets similaires et donnent aussi des spectres très déprimés (sulfates acides à tamarugite de la figure 1).

TABLEAU II

Effets de l'humidité et des sels sur les composantes de la couleur d'un sol sableux brun rouge clair
Effects of moisture and salts on the colour components of a light red brown sandy soil (- : decrease, + : increase)

Système C.I.E. (coordonnées de Helmholtz)	COULEUR	quand l'humidité diminue	quand les sels augmentent
Longueur d'onde dominante (λ_d)	teinte*	↘	↘
Pureté d'excitation (Pe%)	saturation :	peu de variations	↘
Luminance (Y%)	clarté :	↗	↗

* (↗ : la valeur croît, ↘ : décroît)

L'humidité vient compliquer l'interprétation des effets des sels sur la réflectance (EPEMA, 1990). Il ne sera pas possible de séparer les effets de l'eau du sol et de l'eau des sels, en particulier avec des bandes spectrales satellitaires larges.

Réflectance des états de surface

Les mesures spectrométriques sur échantillons non remaniés et la radiométrie de terrain sur les états de surface salés confirment les observations du laboratoire sur la réflectance en présence de sels (POUGET *et al.*, 1988 ; EPEMA, 1992 ; MOUGENOT *et al.*, 1993) :

- (1) il y a augmentation de la réflectance moyenne ;
- (2) diminution de l'absorption due aux bandes du fer ferrique dans le début du visible ;
- (3) diminution relative de la réflectance dans l'infrarouge due principalement aux bandes de l'eau ou des ions hydroxyles (sulfates et chlorures).

Des sels minoritaires peuvent avoir une influence prépondérante sur la réflectance d'une croûte où domine la halite. La matière organique, en dessous de 5 à 6 % environ, modifie l'intensité de la réflectance sans altérer le comportement spectral moyen. L'influence de la microrugosité est similaire (états de surface à pseudosables).

La diminution de la réflectance du proche vers le moyen infrarouge apporte une confirmation de la présence de sels.

La quantification et l'identification des types de sels par des mesures de réflectance demeure difficilement généralisable sans une étude de leur comportement au sol. Pour une même surface, dans des conditions d'humidité constante, on peut déterminer la présence ou l'absence de sels avec l'augmentation de la réflectance et caractériser d'un point de vue semi-quantitatif des sels hydratés, hygroscopiques ou hydroxylés en relation avec l'intensité des bandes d'absorption dans l'infrarouge.

TÉLÉDÉTECTION DES SOLS SALÉS

Dans les bandes spectrales du visible et du proche infrarouge, la précipitation des sels à la surface des sols correspond à une réflectance moyenne et à un indice de brillance élevés pour les surfaces encroûtées (BERENGER, 1985 ; RAO *et al.*, 1991). Les compositions colorées prennent fréquemment une nuance bleutée caractéristique d'une diminution relative de la réflectance dans le proche infrarouge par rapport au rouge. Ceci a été interprété précédemment comme une conséquence des absorptions dans les bandes de l'eau et des ions hydroxyles du moyen infrarouge (PEYRONNEL, 1977 ; RIDD *et al.*, 1982 ; EVERITT *et al.*, 1988 ; POUGET *et al.*, 1988 ; ROETERS, 1988 ; MOUGENOT *et al.*, 1990 ; SAHA *et al.*, 1990).

Cet effet est très net pour les états de surface à pseudosables de la figure 3 (réflectances d'états de surface de basse Casamance mesurées par le satellite Spot), du fait de la présence de gypse et d'une faible humidité hygrosopique. Dans le cas de la croûte saline sèche (halite), ce comportement est moins bien marqué, mais la réflectance dans les trois bandes est très élevée. Les états de surface non salés peuvent avoir un comportement proche, si une humidité résiduelle subsiste (croûte non salée sur rizière). Les variations du niveau moyen de réflectance sont dues ici, en dehors des sels, à l'humidité, à la matière organique, aux argiles et à la microrugosité.

Les rapports et combinaisons de canaux tentent de traduire les trois principaux effets des sels sur la réflectance :

(1) dans le visible et le proche infrarouge, l'effet de dilution par les sels des autres composants du sol et en particulier du fer est estimé avec les rapports 4/1 (proche infrarouge sur bleu TM) (EPEMA, 1986 b, 1990), ou avec l'évolution des indices de couleur ou de rougeur combinant les canaux du début du visible $2-1/2+1$, $2^2/1^3$ TM ou Spot (MADEIRA, 1993) ;

(2) dans l'infrarouge, les ions hydroxyles et l'eau plus ou moins liée des sels entraînent une diminution relativement plus forte de la réflectance dans le canal 7 de Landsat TM. Les rapports 5/7, 4/7, à dynamique un peu plus forte, varient peu en présence de halite pure, et augmentent de façon non linéaire avec les sulfates. La valeur du rapport 5/7 TM tend vers 1 pour les surfaces non salées. Les rapports 7/4 et $7-4/7+4$ ont été utilisés pour détecter des surfaces gypseuses en Tunisie (EPEMA, 1986 b, 1992), 5/7 (AMOS et GREENBAUM, 1987) ou 5/4 TM pour les sulfates acides (MOUGENOT *et al.*, 1990), 5 ou $7/(\Sigma$ des autres bandes) pour les carbonates (MULDERS et EPEMA, 1986). Le rapport 5/4 TM corrélé positivement à la teneur en sels présente une dynamique plus faible que le rapport 4/1 TM ;

(3) l'effet d'affaissement du spectre, sensible souvent jusqu'au proche infrarouge, est estimé avec le rapport 3/1 ou la différence 3-2 Spot (diminution en présence de halite au-dessus de 10 à 15 % et dès 2 à 5 % de sulfates hydratés, MOUGENOT *et al.*, 1990).

L'utilisation combinée des différents rapports améliore les résultats. Des confusions sont possibles entre des surfaces sableuses sèches et des croûtes salines très sèches en milieu de journée ou pour lesquelles le lien capillaire avec la nappe est rompu.

La précipitation d'oxyhydroxydes de fer en même temps que les sels, la structuration en microagrégats et les apports éoliens masquent les sels et perturbent leur détection en particulier dans le visible. Les données du satellite Spot ne permettent pas d'accéder au moyen infrarouge, ce qui limite sur une seule acquisition leur intérêt pour la détection des sels.

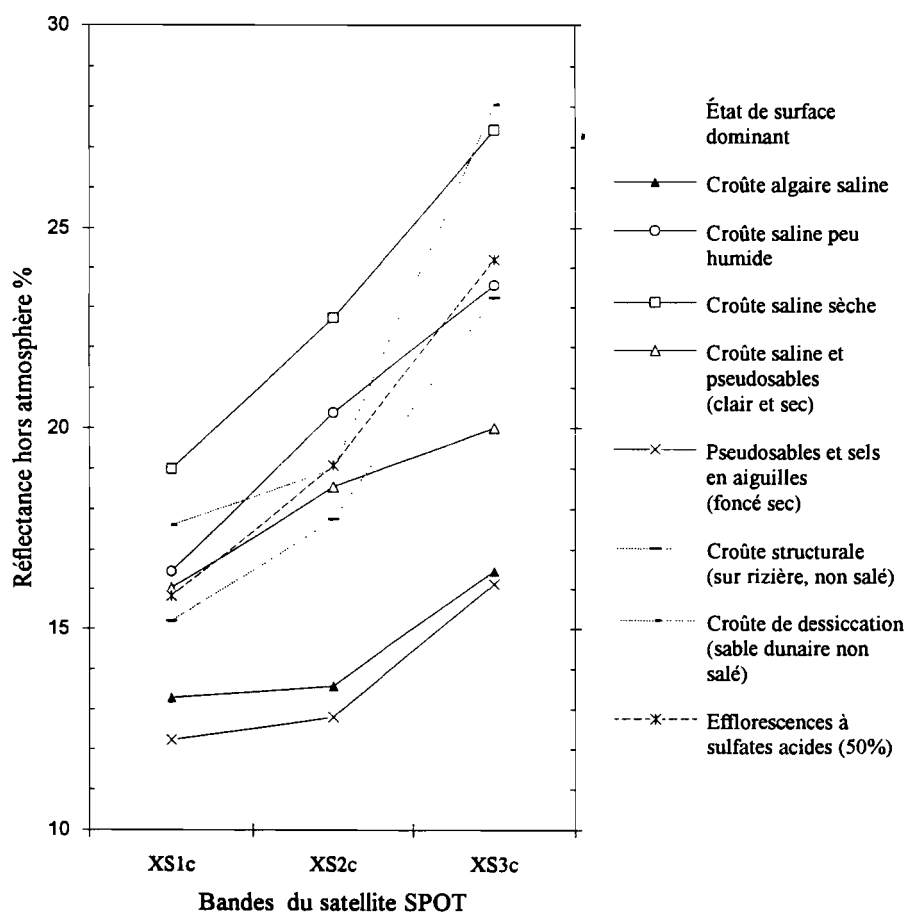


FIG. 3. — Réflectance hors atmosphère de surfaces salées et non salées en basse Casamance au Sénégal (scène Spot 23-325 du 08/05/87).

Spot satellite reflectance of saline and non saline soils surfaces in basse Casamance, south Sénégal (SPOT data, 23-325, 87/05/08).

La végétation permet d'estimer de façon indirecte les effets de la salinité. La figure 4 présente le long d'une toposéquence en milieu de mangrove, la variation de la salinité de la nappe, inversement proportionnelle au recouvrement par la végétation, ce dernier étant corrélé avec le MSAVI (CHEHBOUNI, 1992). Les confusions observées dans la partie centrale de la séquence sont levées avec des indices de couleur dans le visible. Des confusions apparaissent entre les effets du stress salin et du stress hydrique.

Les données satellitaires multitemporelles (exprimées en réflectance sol) permettent de détecter les surfaces salées et non salées en relation avec leur évolution relative dans le temps et d'éliminer les confusions provoquées en particulier par l'humidité (SINGH, 1982 ; VENKATARAMAN, 1983 ; EPEMA, 1986 a ; MOUGENOT *et al.*, 1990).

CONCLUSION

Les sels jouent le rôle de diluant dans le visible pour les autres constituants. En même temps la réflectance des surfaces salées est sensible aux inclusions aqueuses, minérales ou organiques entraînées par la précipitation des sels. La quantification des sels demeure difficile en l'absence de bandes d'absorption suffisamment spécifiques. Les bandes spectrales satellitaires s'avèrent souvent trop larges. Les mesures spectrométriques sur le terrain éviteraient les modifications des états de surface salés observés après les prélèvements. Les résultats pourront être exploités avec les futures plates-formes satellitaires qui posséderont des résolutions spectrales et spatiales plus fines.

Dans les autres domaines de longueur d'onde, l'infrarouge thermique donne des informations sur les sels et l'humidité, et les micro-ondes de façon plus indirecte (CHATURVEDI *et al.*, 1983 ; SINGH et SRIVASTAV, 1990 ; MOUGENOT *et al.*, 1993).

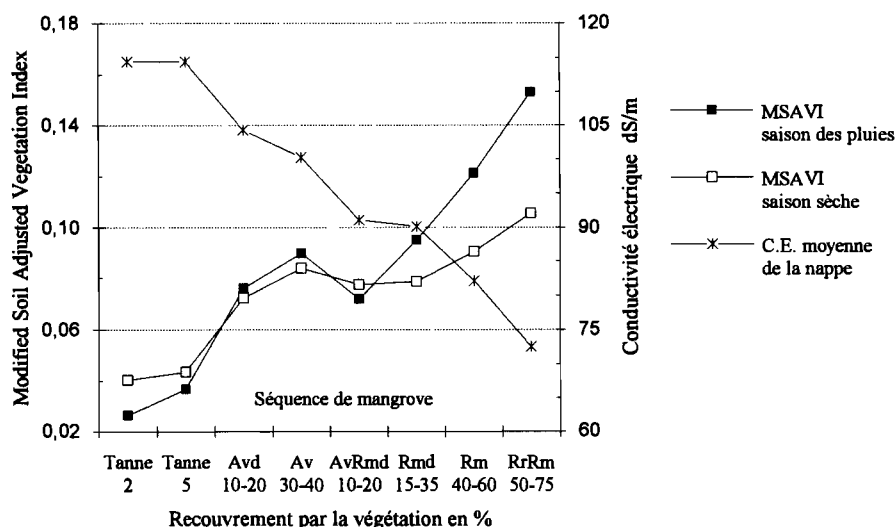


FIG. 4. — Indice de végétation (MSAVI, données Spot, basse Casamance) en fin de saison des pluies et fin de saison sèche pour une séquence de mangrove, et salinité moyenne de la nappe subaffleurante (Tanne : surface et sol hypersalés ; Av, Avd : végétation à *Avicennia africana* en bon état, dégradée ; AvRmd : mélange *Avicennia* et *Rhizophora* mangrove dégradés ; Rm, Rmd : *Rhizophora mangrove* ; RrRm : mélange *Rhizophora mangrove* et *racemosa* au bord du marigot).

Spot Vegetation Index (MSAVI) of mangrove units, and corresponding salinity of groundwater : Tanne : hyper saline soils on high level ; Av, Avd : well developed, or degraded *Avicennia africana* vegetation ; AvRmd : mixed and degraded *Avicennia* and *Rhizophora mangrove* ; Rm, Rmd : *Rhizophora mangrove* ; RrRm : mixed *Rhizophora mangrove* et *racemosa* on bank.

La réflectance n'est pas toujours suffisante pour différencier les états de surface salés, et le suivi de la dynamique temporelle par satellite devient rapidement lourd et coûteux. La prise en compte des organisations spatiales

des états de surface et des sols dans le paysage peut pallier à ces difficultés.

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

BIBLIOGRAPHIE

- AMOS (B.J.), GREENBAUM (D.), 1987. — « Alteration detection using TM imagery: the effects of supergene weathering in an arid climate ». ERIM, 21th Int. Sym. on Remote Sensing of Environment. Oct. 26-30, Ann Arbor, Michigan, USA : 795.
- BERENGER (A.C.), 1985. — *Reconnaissance des terrains salés par télédétection*. ICITV. CNRS, université de Toulouse-III, 41 p.
- BOIVIN (P.), 1990. — *Caractérisation physique des sols sulfatés acides de la vallée de Katouré (Basse Casamance — Sénégal). Étude de la variabilité spatiale et relations avec les caractéristiques pédologiques*. Thèse doct. de l'université de Paris-VI, 170 p.
- CHATURVEDI (L.), CARVER (K.R.), HARLAN (J.C.), HANCOCK (G.D.), SMALL (F.V.), DALSTEAD (K.J.), 1983. — Multispectral remote sensing of saline seeps. *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, 21 (3) : 239-250.
- CHEHBOUNI (A.), 1992. — *Présentation d'un modèle de transfert couplé de masse et de chaleur dans le système de sol-végétation-atmosphère pour les zones arides et semi-arides*. Thèse, université Paul Sabatier, Toulouse, LERTS, 163 p.
- CHEVERRY (C.), FROMAGET (M.), BOCQUIER (G.), 1972. — Quelques aspects micromorphologiques de la pédogenèse des sols de polders conquis sur le lac Tchad. *Cah. Orstom. sér. Pédol.*, vol. 10 (4) : 373-387.
- CONEL (J.E.), VANE (G.), GREEN (R.O.), ALLEY (R.E.), CARERE (V.), GABELL (A.), BRUEGGE (C.J.), 1988. — « Airborne visible/infrared imaging spectrometer (aviris): inflight radiometric calibration and the determination of surface reflectance ». In : *Proceedings of the 4th Int. Coll. on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing*. 18-22 January, Aussois, France : 293-297.
- EPEMA (G.F.), 1986 a. — « Multitemporal analysis of Thematic mapper data for soil survey in southern Tunisia ». In : *Proceedings of the International Symp.*, ISPRS, Com. VII. 25-29 august, Enschede, The Netherlands, ed. A.A. BALKEMA, 26, 7/1 : 245-249.
- EPEMA (G.F.), 1986 b. — Processing thematic mapper data for mapping in Tunisia. *ITC Journal*, 1 : 30-34.

- EPEMA (G.F.), 1990. — « Effect of moisture content on spectral reflectance in a playa area in southern tunisia ». *Proceedings of the Int. Symp. on Remote Sensing Water Ressources*. IAH, august 20-24, Enschede, The Netherlands : 301-308.
- EPEMA (G.F.), 1992. — *Spectral reflectance in the Tunisian desert*. Thèse, Soil Science and Geology Departement of the Wageningen Agricultural University, The Netherlands, 150 p.
- 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.
- EVERITT (J.H.), GERBERMANN (A.H.), CUELLAR (J.A.), 1977. — Distinguishing saline from non-saline rangelands with Skylab imagery. *Photogrammetric Engineering and remote Sensing*, 43 (8) : 1041-1047.
- EVERITT (J.H.), ESCOBAR (D.E.), GERBERMANN (A.H.), ALANIZ (M.A.), 1988. — Detecting saline soils with video imagery. *Photogrammetric Engineering and remote Sensing*, 54 (9) : 1283-1287.
- GOETZ (A.F.H.), 1990. — « Spectral remote sensing in geology ». In : *Theory and Application of Optical Remote Sensing*, New York, Asrar, Wiley ed. : 491-526.
- HANNA (F.S.), STOOPS (G.J.), 1976. — Contribution to the micromorphology of some saline soils of the north Nile delta in Egypt. *Pedologie*, 26 (1) : 55-73.
- HARDISKY (M.A.), KLEMAS (V.), DAIBER (F.C.), 1983. — Remote sensing salt marsh biomass and stress detection. *Adv. Space Res.*, 2 (8) : 219-229.
- HUNT (G.R.), SALISBURY (J.W.), 1971. — Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: II Carbonates. *Modern Geology*, 2 : 23-30.
- HUNT (G.R.), SALISBURY (J.W.), LENHOFF (C.J.), 1971a. — Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: III Oxides and hydroxides. *Modern Geology*, 2 : 195-205.
- HUNT (G.R.), SALISBURY (J.W.), LENHOFF (C.J.), 1971 b. — Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: IV Sulfides and sulfates. *Modern Geology*, 3 : 1-14.
- HUNT (G.R.), SALISBURY (J.W.), LENHOFF (C.J.), 1972. — Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: V Halides, phosphates, arsenates, vanadates and borates. *Modern Geology*, 3 : 121-132.
- JAIN (S.C.), SHARMA (K.P.), MANCHANDA (M.L.), SINGH (C.B.), 1988. — « Physiographic soil classification from multi remote sensing data ». In : *Proceedings of the ninth asian conference on remote sensing*. nov. 23-29, Bangkok, Thailand, P : 17 : 1-17 : 8.
- LOUBERSAC (L.), VIOLLIER (M.), LEMASSON (C.), 1988. — « Analyse comparative des réponses spectrales dans le domaine optique des cibles d'un marais tropical à diverses résolutions spatiales et spectrales. » In : *Proceedings of the 4th Int. Coll. on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing*. 18-22 january, Aussois, France : 323-327.
- LOWENSTEIN (T.K.), HARDIE (L.A.), 1985. — Criteria for recognition of salt-pan evaporites. *Sedimentology*, 32 : 627-644.
- MADEIRA (J.), 1993. — *Étude qualitative des relations constituants minéralogiques-réflectance, diffusion des latosols brésiliens : applications à l'utilisation pédologiques des données satellitaires TM (région de Brasilia)*. Paris, Orstom, coll. Études et Thèses, 236 p.
- MANCHANDA (M.L.), 1984. — Use of remote sensing techniques in the study of distribution of salt-affected soils in north-west India. *J. of Indian Soil Sci.*, 3 : 701-706.
- MANCHANDA (M.L.), KHANNA (S.), 1981. — Soil salinity and landscape relationship in part of Haryana state. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, 29 (4) : 493-503.
- MOUGENOT (B.), 1983. — *Évolution des états de surface des sols non cultivés du delta du fleuve Sénégal en relation avec la dynamique saisonnière des sels*. Orstom, 14 p. multigr.
- MOUGENOT (B.), 1989. — Étude par télédétection des états de surface en relation avec les nappes, exemple des états des sols salés et acidifiés de basse Casamance (Sénégal). *Bulletin du GFHN*, 26 : 51-65.
- MOUGENOT (B.), 1991 a. — « Caractéristiques spectrales de surfaces salées à chlorures et sulfates ». In : *2^e Journées télédétection, caractérisation et suivi des milieux terrestres en régions arides et tropicales*. Paris, Orstom, coll. Colloques et Séminaires : 49-70.
- MOUGENOT (B.), 1991 b. — « Analyse spatiale et spectrale d'une mangrove dégradée au sud du Sénégal ». In : *5^e Colloque Mesures physiques et Signatures en télédétection*. 14-18 janv., Courchevel, France, ESA SP-319, 2 : 655-657.
- MOUGENOT (B.), ZANTE (P.), MONTOROI (J.P.), 1990. — *Détection et évolution saisonnière des sols salés et acidifiés du domaine fluvio-marin de basse Casamance au Sénégal par imagerie satellitaire. Télédétection et sécheresse*. Paris, Aupelf-Uref, John Libbey Eurotext : 173-179.
- MOUGENOT (B.), EPEMA (G.F.), POUGET (M.), 1993. — Remote sensing of salt-affected soils. *Remote Sensing Reviews*, 7 : 241-259.
- MULDERS (M.), 1987. — *Remote Sensing in Soil Science. Development in soil science*. Amsterdam, Elsevier, The Netherlands, 15, 379 p.
- MULDERS (M.A.), EPEMA (G.F.), 1986. — The Thematic mapper: a new tool for soil mapping in arid areas. *ITC Journal*, 1 : 24-29.
- PEYRONNEL (A.), 1977. — « Exemple d'étude de la salinité des sols sur cliché I.R.C. » In : *1^{er} Colloque Pédologie et Télédétection*. Rome, 29 août-9 sept. 1977. AISS, Com. V, Girard M. C., éd., Ina Paris : 99-106.
- POUGET (M.), LE FLOC'H (E.), KAMAL (S.), SALEM (B.), 1988. — « Utilisation des données Spot pour la cartographie des ressources renouvelables. Application à la région côtière nord-ouest de l'Égypte ». In : *Journées télédétection — Images satellite et milieux terrestres en régions arides tropicales*. Paris, Orstom, coll. Colloques et Séminaires : 103-121.
- RAO (B.R.), DWIVEDI (R.S.), VENKATARATNAM (L.), RAVISHANKAR (T.), THAMMAPPA (S.S.), BHARGAWA (G.P.), SINGH (A.N.), 1991. — Mapping the magnitude of sodicity in part of the Indo-Gangetic plains of Uttar Pradesh, Northern India using Landsat-TM data. *Int. J. Remote Sensing*, 12 (3) : 419-425.
- RIDD (M.K.), MEROLA (J.A.), JAYNES (R.A.), 1982. — « Computer mapping of shoreline fluctuations by satellite Great Salt Lake, UTAH, USA. » ERIM, *First Thematic Confe-*

- rence : *Remote Sensing of Arid and Semi-Arid lands*. 19-25 Jan., Cairo, Egypt : 553-564.
- ROETERS (P.B.), 1988. — « The effect of soil moisture on reflectance characteristics of salt crusts ». In : *Proceedings of IGARSS'88 Symposium*. 13-16 sept., Edinburgh, Scotland : 1225-1227.
- SAHA (S.K.), KUDRAT (M.), BHAN (S.K.), 1990. — Digital processing of Landsat TM data for wasteland mapping in parts of Aligarh District (UttarPradesh), India. *Int. J. Remote Sensing*, 11 (3) : 485-492.
- SERVANT (J.), 1974. — Sur le rôle des cristaux de chlorures de sodium dans la genèse d'une structure poudreuse, à la surface de certains sols salés. *Comptes rendus Académie Sc. Paris*, t. 278, série D : 589-591.
- SHARMA (R.C.), BHARGAVA (G.P.), 1988. — Landsat imagery for mapping saline soils and wet lands in north-west India. *Int. J. Remote Sensing*, 9 (1) : 39-44.
- SHI YUANCHUN (C.), XIE JIN GRONG (R.), 1988. — « Remote sensing for surveying and mapping of salt-affected soils ». In : *Proceedings of the international symposium on solonetz soils. Problems, properties, utilization*. Osijek, Yugoslavia ; June 15-20, 1988, ADAM M. ed., Agricultural Faculty, University of Osijek : 104-110.
- SINGH (A.N.), 1982. — « Digital analysis of multirate landsat data for monitoring soil salinization in north Indians plains ». In : *Transactions of the 12th Int. Congress of Soil Science*. 8-16 february : 134.
- SINGH (R.P.), SRIVASTAV (S.K.), 1990. — Mapping waterlogged and salt-affected soils using microwave radiometers. *Int. J. of Remote Sensing*, 11 (10) : 1879-1887.
- SINGH (A.N.), VENKATARATNAM (L.), SINHA (K.), VENKATACHALAM (P.), RAO K.R. DWIVEDI (R.S.), 1983. — « Utilisation of Landsat data for delineating, mapping and managing of soils resources — The problems and prospects under Indian conditions ». ERIM, 7th Int. Sym. on Remote Sensing of Environment. May 9-13, Ann Arbor, Michigan, USA : 787-796.
- SZABOLCS (I.), 1988. — « Solonetz soils ». In : *Proceedings of the international symposium on solonetz soils. Problems, properties, utilization*. Osijek, Yugoslavia ; June 15-20, 1988, ADAM (M.) ed., Agricultural Faculty, University of Osijek : 9-25.
- VENKATARATNAM (L.), 1983. — « Monitoring of soil salinity in Indo Gangetic plains of north western India using multirate Landsat data ». ERIM, 7th Int. Sym. on Remote Sensing of Environment. May 9-13, Ann Arbor, Michigan, USA : 369-377.

Le traitement d'un modèle numérique de terrain pour la caractérisation du milieu physique

Cas d'étude dans le sud-ouest du Burkina Faso

Bruno HENQUIN (1), Marc TOTTÉ (2)

(1) 1 – Mage, 43, rue Godefroid, 5000 Namur, Belgique.

(2) Laboratoire de Télédétection et d'Analyse régionale de l'université catholique de Louvain
3, place Louis-Pasteur, 1348 Louvain-La-Neuve, Belgique.

RÉSUMÉ

L'analyse du milieu physique se base en première approche sur la perception du relief et de la géomorphologie. Elle s'appuie notamment sur l'exploitation visuelle de photos aériennes mais, d'après KILIAN (1990), elle ne se prête pas encore aux traitements numériques, car elle fait appel à des processus de photo-interprétation non automatisables.

L'objectif de l'article est de présenter une méthode d'interprétation semi-automatique du modelé en facettes morphologiques à partir du traitement d'un modèle numérique de terrain (MNT) Spot.

Trois variables dérivées du MNT sont retenues : la relation spatiale (Rs), la relation altitudinale (Ra) et les pentes. Les deux premières variables traduisent la relation fonctionnelle entre un point du modelé et son exutoire dans le réseau hydrographique. La carte des facettes morphologiques obtenue est comparée à une cartographie morphopédologique de référence.

Les auteurs discutent des potentialités et des limites d'une telle approche pour la caractérisation du milieu physique et pour l'amélioration des procédures de sondage dans le cadre des statistiques agricoles.

MOTS CLÉS : Modèle numérique de terrain — Facettes morphologiques — Approche morphopédologique — Réseau hydrographique — Relation spatiale — Relation altitudinale — Burkina Faso.

ABSTRACT

DIGITAL TERRAIN MODEL FOR CHARACTERIZING THE ENVIRONMENT. CASE STUDY IN THE SOUTH-WEST OF BURKINA FASO

The analysis of the physical environment as a first approach bases itself on both perception of the relief and geomorphology. The analysis relies especially on a visual exploitation from aerial photographs, but according to KILIAN (1990), it does not suit yet to digital data processing because it appeals to photo-interpretation processes which not automatisable.

The aim of the article is to set up a semi-automatic interpretation method of the relief in morphological facets based on the data processing of a digital elevation model (DEM) SPOT.

Three variables derived from DEM have been kept back : the spatial relation (Rs), the altitudinal relation (Ra) and the slopes. The two first variables do translate the functional relation between a point of the relief and it outlet in the hydrographical network. The achieved map of the morphological facets is analysed with regard to a morphopedological map of reference. The authors are talking about the potentialities and the limits of such an approach for the characterization of the physical environment.

KEYWORDS : Digital elevatino model — Morphological facets — Morphopodological approach — Hydrographical network — Spatial relation — Altitudinal relation — Burkina Faso.

INTRODUCTION

Cet article s'inscrit dans le cadre d'un projet intitulé « Méthodes de caractérisation des domaines agricoles par télédétection au Sahel » qui a comme objectif principal la stratification du paysage pour l'amélioration des procédures de sondage dans le cadre des statistiques agricoles et de la gestion des ressources naturelles. Les deux niveaux principaux de stratification retenus dans le cadre de cette étude sont :

— *la région agro-écologique* : c'est le plus grand espace qui présente une uniformité des modes principaux d'utilisation du milieu par les populations (grands systèmes de culture, équilibre entre les spéculations, niveau de pression démographique). Cette différenciation est liée à des caractéristiques majeures du modelé, du régime hydrologique, de l'importance en superficie et des caractéristiques des sols cultivables. Elles peuvent être appréhendées par les statistiques agricoles quand elles existent ou par l'interprétation d'images satellites (ANGE, 1990) ;

— *la facette de paysage* : c'est à la base une unité morphologique qui se caractérise par des conditions géologiques et hydrologiques uniformes et par une association de sols, un type de végétation et une mise en valeur spécifiques (HENQUIN *et al.*, 1991 ; Aréola, 1977 in AMEYAN 1986).

Cette stratification en facettes de paysage va faire appel à deux types de cartographie complémentaires :

— la cartographie du milieu physique qui se traduit notamment par des cartes morphopédologiques ;

— la cartographie de l'occupation du milieu par les populations (systèmes de production).

Le premier type de cartographie, basé en première approche sur la perception du relief et de la géomorphologie, s'appuie jusqu'à présent sur l'exploitation visuelle et stéréoscopique des photos aériennes ou même des images Spot panchromatiques. Cette cartographie ne se prête pas encore aux traitements numériques car elle fait appel à des processus mentaux de photo-interprétation difficilement automatisables.

Le deuxième type de cartographie fait largement appel aux données télédétectées, car le milieu agricole peut être appréhendé au travers des états de surface qui représentent l'ensemble des caractères propres à la surface de la terre susceptibles d'être détectés depuis un satellite ou un avion (KILIAN, 1990 ; DOSSO *et al.*, 1982).

L'article présenté fait le point sur les premiers résultats d'une méthodologie d'interprétation semi-automatique du modelé en facettes morphologiques à partir du traitement d'un modèle numérique de terrain (MNT) Spot, et compare les résultats obtenus avec une cartographie morphopédologique de référence.

PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DE LA ZONE D'ÉTUDE

Situation

La zone étudiée est située au sud-ouest du Burkina Faso sur la Moun-Houn au nord-ouest de Bobo-Dioulasso. Elle correspond aux limites d'une scène Spot (fig. 1).

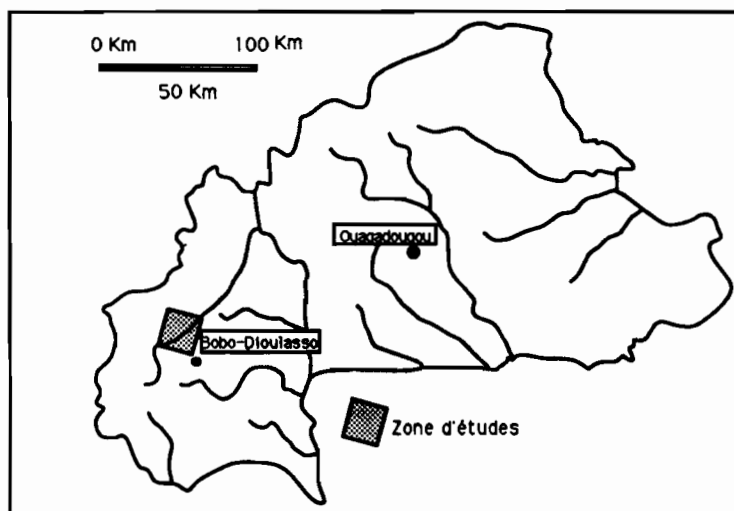


FIG. 1. — Situation de la zone d'étude et limites du MNT Spot.
Situation of the studied area and limits of the DEM Spot.

Modelé et sols

Le substrat géologique est constitué de grès subhorizontaux d'âge Infracambrien avec quelques pointements doléritiques. Cinq grandes unités géomorphologiques peuvent être distinguées (RAUNET, 1982) (fig. 2).

- Les reliefs gréseux, caractérisés par des pentes fortes et des affleurements de grès. Deux sous-ensembles naturels s'y différencient :
 - les reliefs montagneux à pentes très fortes ; ils sont généralement chapeautés par d'épaisses surfaces cuirassées. Leur altitude est comprise entre 450 et 600 m ;

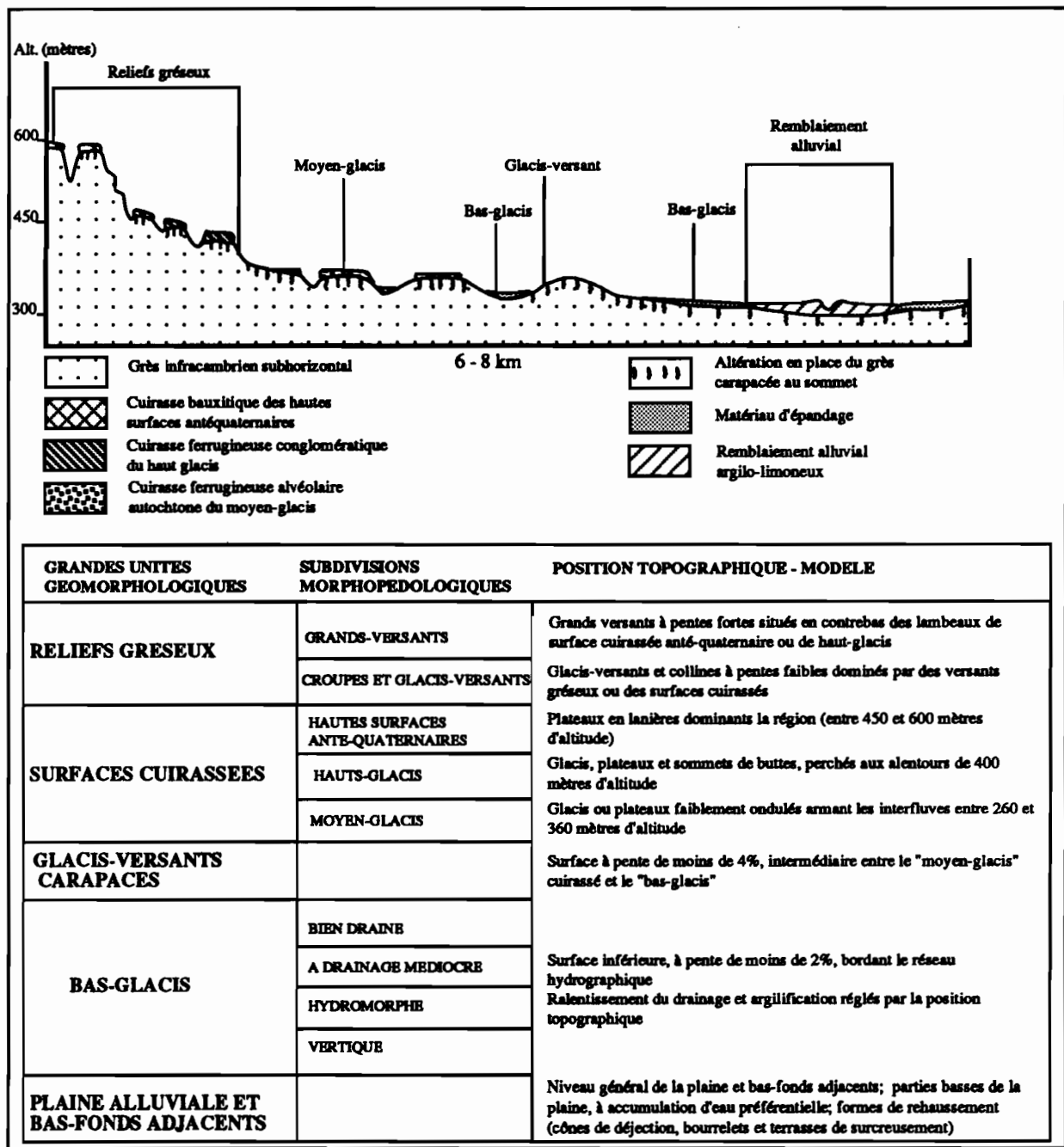


FIG. 2. — Coupe géomorphologique synthétique du haut bassin de la Moun-Houn (Volta Noire) (RAUNET, 1982).
Geomorphological and synthetical section of the Moun-Houn's high basin (Volta Noire) (RAUNET, 1982).

— les reliefs collinaires, à croupes et glacis-versants, à pentes moins fortes, situés généralement en position inférieure par rapport aux grands versants.

• Les surfaces cuirassées, dalles ferrugineuses incultivables en position de plateau ou de buttes ou accrochées à de grands versants. Trois générations de surface cuirassées étagées se différencient :

— les hautes surfaces anté-quaternaires, ferrugino-bauxitiques, chapeautent les hauts reliefs gréseux entre 450 et 600 m d'altitude ;

— le haut-glacis (pléistocène), à l'état de buttes résiduelles bordées d'un talus, aux alentours de 400 m d'altitude ;

— le moyen-glacis (pléistocène plus récent), dont les témoins couvrent une surface considérable dans la région étudiée. Ils coiffent presque tous les interfluviaux en dehors du domaine des reliefs gréseux.

• Les glacis-versants carapacés, qui forment la plupart des ondulations du modelé (pente inférieure à 4 %). Ils résultent du façonnement des altérites kaoliniques situées sous la surface du moyen-glacis, et de leur induration consécutive à la baisse du niveau phréatique.

• Le bas-glacis, qui se trouve en position aval par rapport aux glacis-versants carapacés, est orienté vers le réseau hydrographique qu'il borde presque systématiquement. Dans le cas le plus général, le matériau superficiel est issu du démantèlement et du transport vers l'aval des altérites ou du grès peu altéré situés sous le moyen-glacis. Cette couche colluviale, d'épaisseur variable, mais augmentant d'amont vers l'aval, repose en biseau sur l'argile d'altération kaolinique hydromorphe.

• La plaine de remblaiement de la Moun-Houn qui comporte trois grands ensembles physiographiques :

— le niveau moyen de la plaine qui correspond à la surface topographique la plus générale, intermédiaire entre les cuvettes et les bourrelets ;

— les zones basses : marécages permanents, cuvettes ou dépressions à inondation annuelle de longue durée ;

— les formes de rehaussement : bourrelets de berges bordant de façon continue le fleuve Moun-Houn, petits cônes de déjection latéraux et réseaux de bourrelets anastomosés.

Ce qu'il convient de retenir de cette description synthétique du modelé, c'est que les unités géomorphologiques se disposent dans le paysage suivant un gradient altitudinal et en fonction de l'éloignement par rapport au réseau hydrographique. Sur le plan de l'activité agricole, les unités « bas-glacis » et « plaine alluviale » sont les plus importantes. La délimitation de ces unités à partir du MNT représente l'objectif principal de la recherche.

MOYENS ET MÉTHODES

Principales caractéristiques du MNT

Le modèle numérique de terrain (MNT) a été réalisé par la firme Istar (1) à partir d'une paire stéréoscopique d'images Spot prises à un jour d'intervalle (fig. 3).

Les caractéristiques techniques du MNT sont :

— taille du pixel : 20 m ;

— erreur quadratique moyenne (RMS) en altitude : 9 m ;

— points de contrôles à partir de la carte IGN au 1/200 000^e : 20.

L'évaluation du MNT a été réalisée, d'une part, en croisant le MNT avec les courbes de niveau digitalisées de la carte topographique au 1/200 000^e et, d'autre part, en analysant sur le plan altitudinal des petites parties du MNT (250 x 250 pixels).

Les conclusions que l'on peut tirer de cette analyse sont les suivantes :

— sous-évaluation générale des altitudes ;

— existence d'une pente générale du modèle (orientation sud-est) ;

— erreur quadratique moyenne en altitude de l'ordre de 10 m ;

— modelé en forme de « marches d'escalier » (fig. 4) avec des ressauts de l'ordre de 1,6 m. Ces ressauts se distinguent nettement dans les zones à faible déclivité.

Un lissage du modèle brut dans une fenêtre circulaire 11 x 11 a été effectué pour éliminer les ressauts. Ce lissage n'affecte pas le calcul des deux principales transformations réalisées sur le MNT : la relation spatiale et altitudinale (ANSOULT, 1988).

D'après la littérature sur l'établissement et l'évaluation des MNT, il est possible d'établir avec le MNT présent une carte topographique à l'échelle du 1/50 000^e et avec une équidistance de 20 m (THEODOSSIOU et DOWMAN, 1990).

Méthodologie

La méthodologie suivie s'appuie notamment sur les travaux de ANSOULT (1988) et des fonctions disponibles dans le logiciel Morphoterra (2).

ANSOULT (*op. cit.*) a étudié les liens qui existent entre les formes du relief et les écoulements de surface. Il a montré que la relation spatiale et la relation altitudinale (fig. 5) traduisent la relation fonctionnelle entre un point du modelé et le réseau de drainage du bassin versant.

Dans le cadre de cette première phase d'étude, on considère que les interactions entre l'écoulement des eaux et la nature des matériaux superficiels sont les facteurs essentiels de la formation du modelé et de son évolution.

(1) Istar : société privée. Esp. Bethoven Bat. 2, route des Lucioles, Sophia Antipolis 06560, Valbonne, France.

(2) Morphoterra : logiciel de traitement de MNT commercialisé par la société da Vinci consulting.

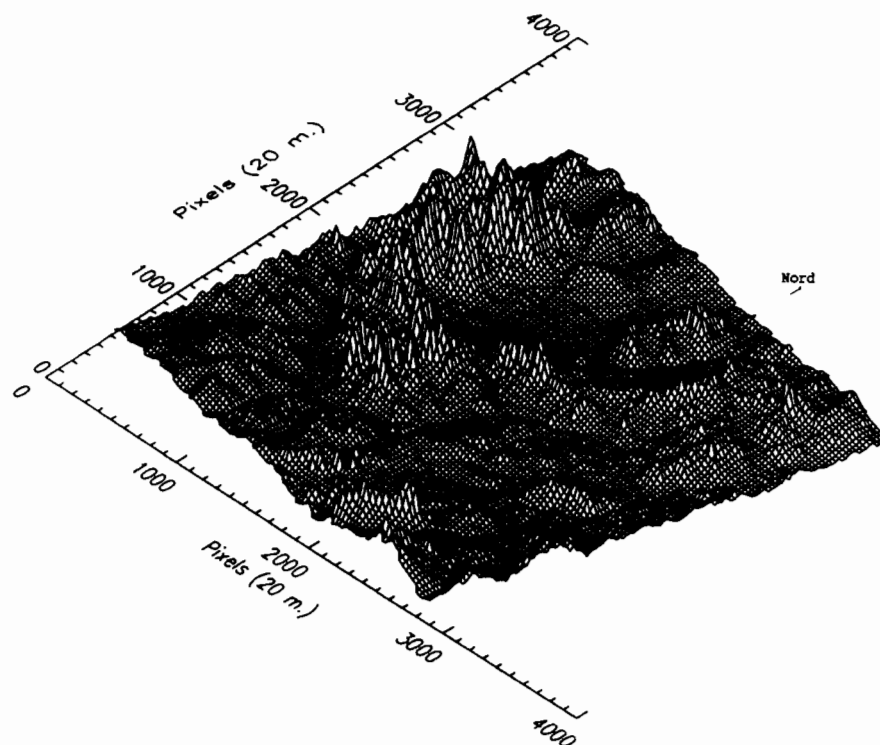


FIG. 3. — Représentation en trois dimensions du MNT Spot.
A three dimensional representation of the DEM Spot.

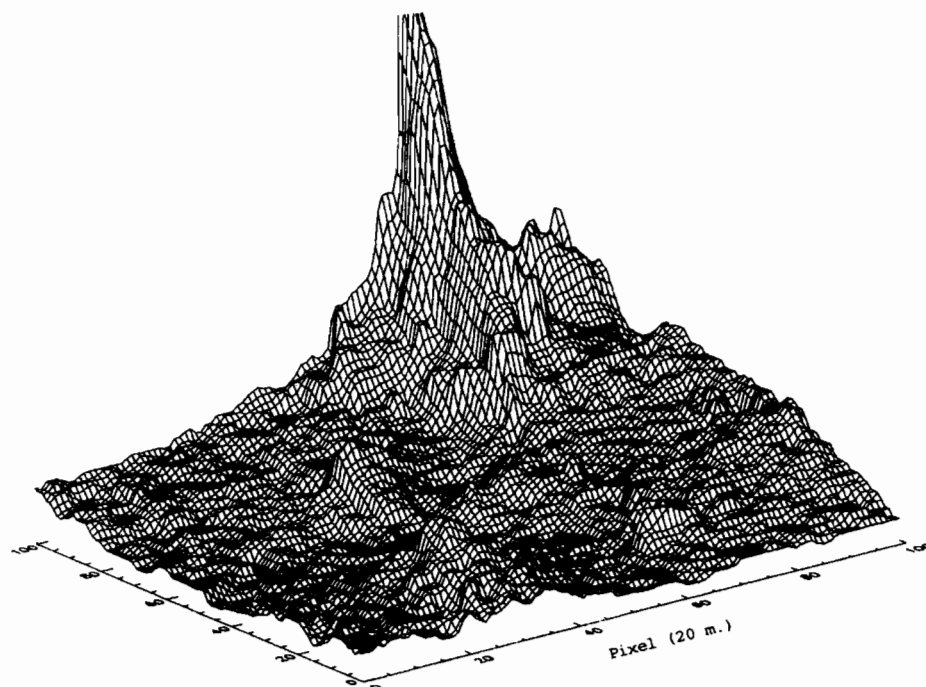


FIG. 4. — Vue détaillée d'une partie du MNT et de l'allure en « marches d'escalier ».
A detail view of the DEM and his typical step patterns.

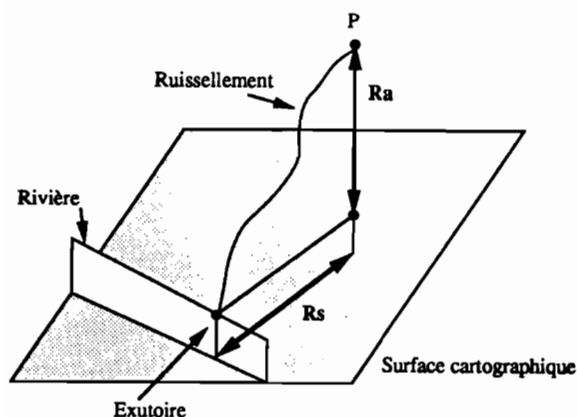


FIG. 5. — La relation spatiale et altitudinale.
The spatial and altitudinal relations.

La figure 6 présente l'ensemble des traitements effectués pour cartographier le modelé en facettes morphologiques.

Description synthétique des différentes étapes pour la création du fichier « facettes morphologiques ».

- *Fichier des directions d'écoulement* : on donne à chaque maille du modèle une direction de ruissellement qui est fonction de la pente locale du terrain. Les directions d'écoulement sont déterminées à partir de la relation « plus bas que ».

- *Fichier des surfaces de drainage* : on calcule pour chaque maille du modèle le nombre de mailles qui sont drainées par celle-ci. Pour obtenir le réseau hydrographique, il suffit alors de seuiller le fichier des surfaces de

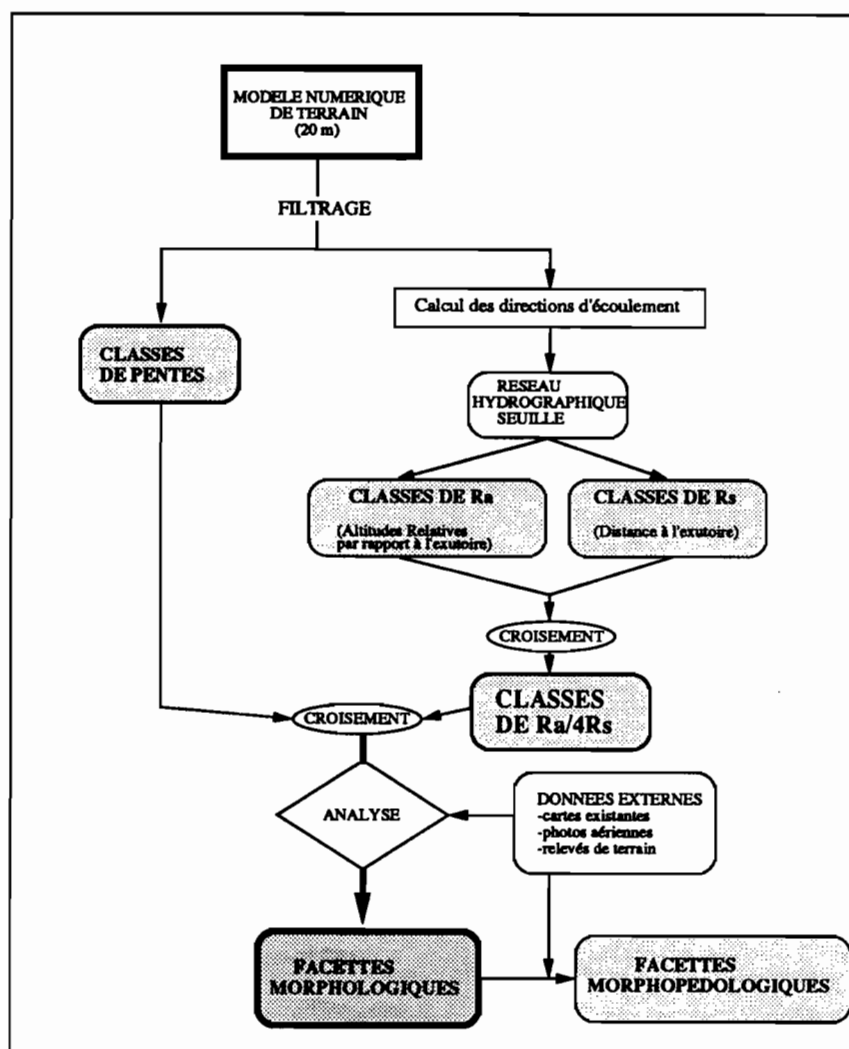


FIG. 6. — Schéma de la procédure de traitement.
Plan of the data processing.

drainage par une valeur appropriée. Cette valeur est généralement déterminée à partir de la carte topographique.

- *Fichier des pentes* : on calcule pour chaque maille du modèle le rapport de la différence d'altitude entre la maille considérée et la maille voisine la plus basse dans un voisinage de 3 x 3. Les valeurs obtenues sont regroupées en 6 classes (< 1 %, 1-2 %, 3-5 %, 6-9 %, 10-15 % et > 15 %) sur base de critères physiographiques et donc caractéristiques des unités morphopédologiques de référence.

Les deux premiers fichiers de base permettent ensuite de créer les fichiers suivants.

- *Fichier des relations altitudinales* : on transforme chaque altitude par rapport à une référence commune (le niveau de la mer) en une altitude par rapport à un point du réseau hydrographique (exutoire). Le fichier dérivé est un MNT où tout le réseau hydrographique est à une altitude nulle.

- *Fichier des relations spatiales* : on transforme la codification spatiale des données en remplaçant les coordonnées X,Y d'un point, par rapport à un point de référence commun, par une distance euclidienne jusqu'à un point du réseau hydrographique. Ces points sont reliés par une trajectoire de ruissellement.

Ces deux fichiers sont ensuite combinés dans un rapport Ra/4Rs. Les valeurs obtenues sont regroupées en 6 classes et exprimées en pour mille. Ce rapport, difficile à interpréter, peut être considéré (ANSOULT, *op. cit.*) pour un point donné comme son potentiel altimétrique par rapport au réseau hydrographique, ou, encore, être assimilé à la pente moyenne entre un point du relief et son exutoire dans le réseau hydrographique (plus le rapport Ra/Rs est élevé plus la pente moyenne est forte et inversement).

Ce fichier des potentiels altimétriques est ensuite croisé avec le fichier des pentes et constitue le fichier brut des 48 classes morphologiques.

RÉSULTATS

Les 48 classes morphologiques sont ensuite visualisées et comparées à une cartographie de référence qui, dans le cas présent, est constituée par la carte morphopédologique au 1/100 000^e (GUILLOBEZ et RAUNET, 1979). Cette comparaison permet de regrouper les 48 classes en 6 classes morphologiques. Les résultats de ce regroupement sont présentés au tableau I et à la figure 7.

TABLEAU I
Résultats du regroupement en 6 classes morphologiques des 48 classes obtenues
lors du croisement des fichiers Ra/4Rs et Pentes
(nombre de pixels par classe en fréquence absolue)
*Results of the regrouping in 6 morphological classes from the 48 achieved classes
by crossing of the Ra/4Rs and Slopes files*

		CLASSES DE PENTE en %					
		< 1	1 - 2	3 - 5	6 - 9	10 - 15	> 15
C L A S S E S D E R a/ 4 R s e n ‰	0	24 000	1 635	24	3	5	6
		1	1	3	5	6	6
		5 252	1 399	19	-	-	-
	1 - 1,9	1	1	3	5	6	6
		5 987	2 494	62	-	-	-
	2 - 2,9	1	1	3	5	6	6
		20 793	15 982	594	57	79	28
	3 - 4,9	2	2	3	5	6	6
		15 793	47 163	4 026	297	201	421
	6 - 9,9	2	2	3	5	6	6
R a/ 4 R s e n ‰	10 - 14,9	5 459	71 000	22 537	2 192	334	408
		3	3	3	5	6	6
	15 - 49,9	833	17 545	28 710	1 511	8 493	3 487
		4	4	4	5	6	6
‰	> 50	20	276	465	1 096	2 124	2 373
		4	4	4	4	4	6

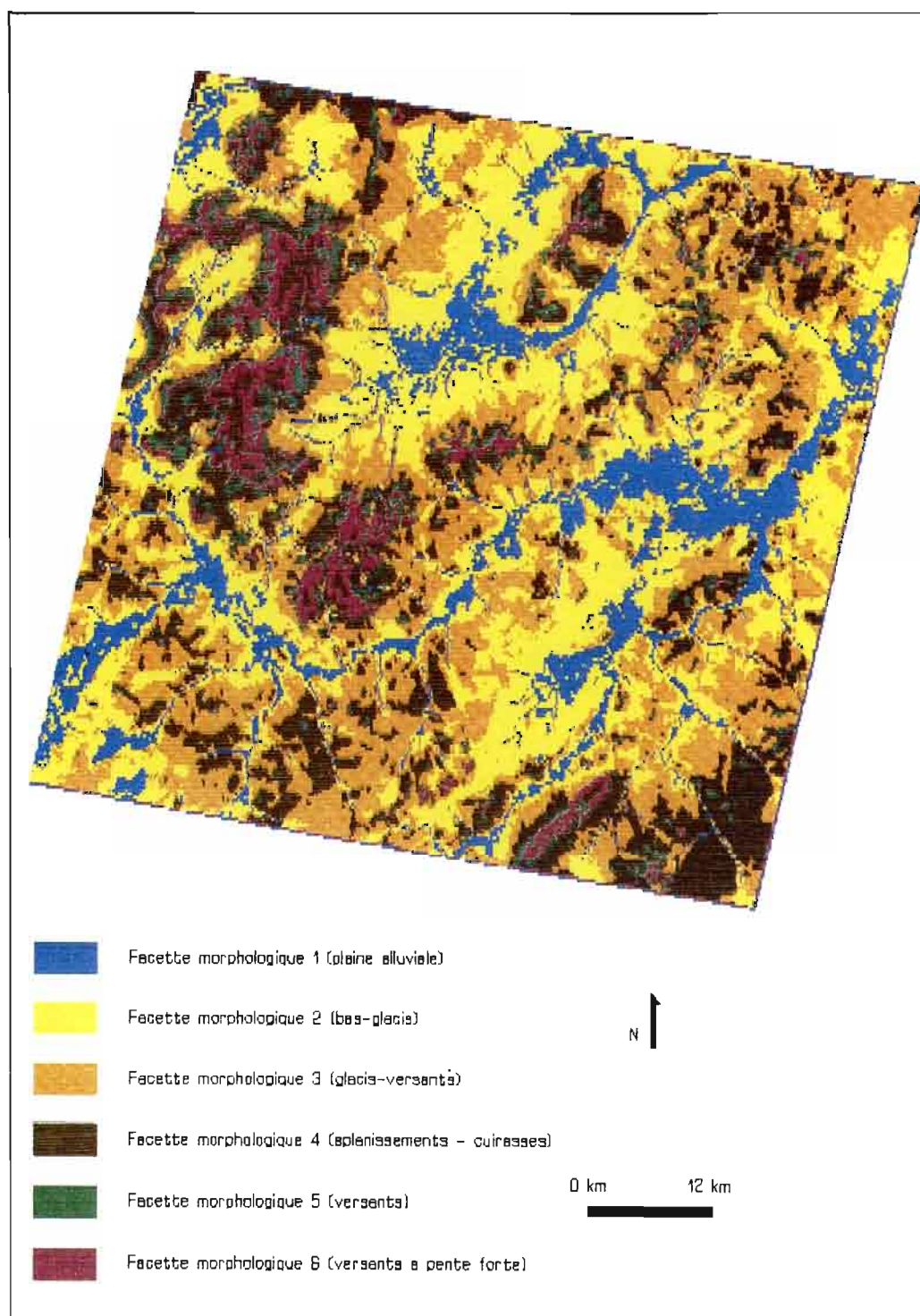


FIG. 7. — Les facettes morphologiques dérivées du MNT Spot.
The morphological facets.

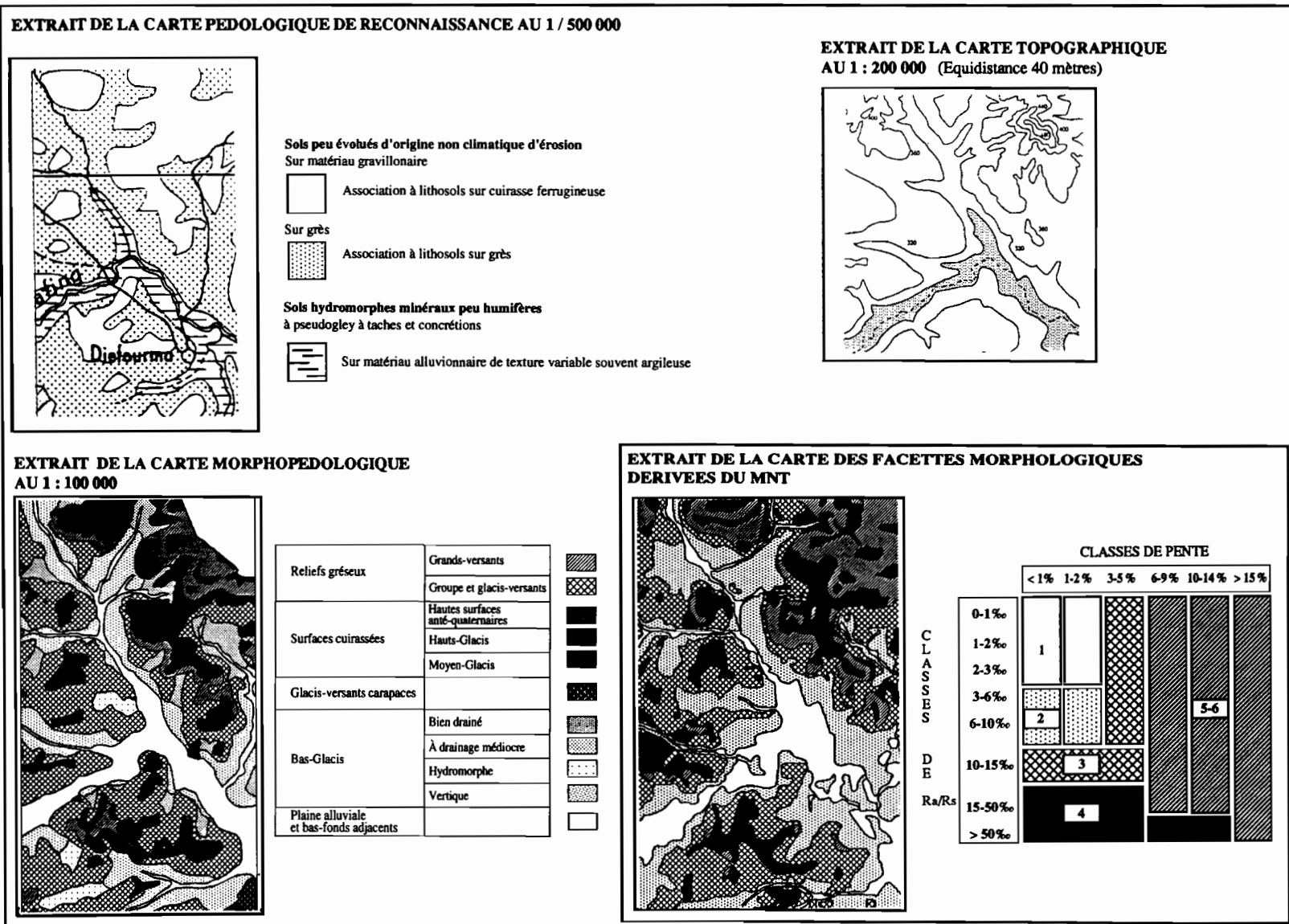


FIG. 8. — Comparaison entre la carte des facettes morphologiques issues du MNT, la carte morphopédologique de Guillobez et Raunet au 1/100 000^e, la carte de reconnaissance pédologique au 1/500 000^e et la carte topographique au 1/200 000^e.

Comparison between the morphological facets map from DEM, the morphopedological map (scale 1/100 000), the pedological surveying map (scale 1/500 000) and the topographical map (scale 1/200 000).

DISCUSSION

L'analyse de la figure 8 montre qu'il existe bien une analogie entre la carte des facettes morphologiques et la carte morphopédologique de référence. On reconnaît les principales formes du relief décrites par GUILLOBEZ et RAUNET (1979), à savoir : la plaine alluviale, le bas-glacis et les surfaces témoins des différents aplanissements, mais sans pour autant en retrouver de façon précise les limites.

L'introduction de variables décrivant la concavité et la convexité permettra très probablement de mieux préciser les limites entre les facettes morphologiques.

Pour aller plus loin dans l'analyse des résultats, il apparaît intéressant de croiser numériquement ces unités morphologiques avec la carte de référence. Les résultats de ce croisement établis sur une partie de la carte des facettes morphologiques sont présentés au tableau suivant.

TABLEAU II

Représentativité statistique des différentes facettes morphologiques par rapport à celles de la carte morphopédologique (GUILLOBEZ et RAUNET, 1979) (nb de pixels en fréquence absolue et pourcentages calculés par facette morphologique)
Statistical representation of the morphological facets with regard to the morphopedological units of reference
 (GUILLOBEZ and RAUNET, 1979)

	Plaine alluviale	Bas-glacis	Glacis-versants	Croupes et glacis-versants	Moyen-glacis	Haut-glacis	Grands versants
Facettes morpho	1	2	3	4	5	6	7
1 %	77%	16%					
Nb pixels	46 883	10 199	2 593	0	994	0	0
2	10%	43%	32%		14%		
	6 584	45 240	34 273	4 328	14 732	0	0
3		12%	33%	26%	27%		
	848	12 937	35 170	29 812	29 893	822	1 194
4				48%	40%		
	196	487	3 377	19 470	16 203	114	0
5			23%	32%	33%		
	100	276	2 573	3 528	3 637	252	453
6							
	0	135	116	462	49	478	281

L'analyse du tableau II montre bien les différences qui existent entre les deux cartes et permet d'établir les relations comme suit :

Facette 1

Cette classe recoupe plus de 77 % de l'unité *plaine alluviale* et empiète sur l'unité *bas-glacis* (16 %), ce qui paraît assez normal étant donné que la limite entre ces deux unités, au niveau altitudinal, est très étroite.

Facette 2

Cette classe recoupe plusieurs unités de la carte morphopédologique et correspond pour 43 % à l'unité *bas-glacis*, pour 32 % à l'unité *glacis-versant carapacé*, et pour 14 % à l'unité *moyen-glacis*. La distinction entre l'unité *bas-glacis* et l'unité *glacis-versant carapacé* ne peut se faire que par photo-interprétation et mesures de terrain.

Facette 3

Cette classe correspond pour plus de 59 % aux unités *glacis-versant carapacé* et *croupes et glacis-versant*, et pour 27 % à l'unité *moyen-glacis*.

Facette 4

Cette classe recoupe essentiellement l'unité *croupes et glacis-versant* (48 %) et les témoins d'aplanissement (40 %), c'est-à-dire les *moyens et haut-glacis* et les *surfaces anté-quaternaires*.

Facettes 5 et 6

Ces deux classes peu représentées restent assez hétérogènes puisqu'elles recoupent toutes les unités morphopédologiques mais dominent cependant au niveau des unités *croupes et glacis-versant*, *moyen*, *haut-glacis* et *grands versants*. Certaines confusions peuvent s'expliquer par le fait que le photo-interpréteur va classer, par exemple, un piton témoin d'une surface d'aplanissement dans l'unité *haut-glacis* alors que le traitement numérique le classera comme versant.

Ces résultats confirment ceux établis à partir de l'analyse visuelle, c'est-à-dire qu'une facette morphologique donnée se situe à cheval sur une à plusieurs unités morphopédologiques. Dans le cas des facettes 1 et 2, la correspondance est cependant plus étroite. Par contre, la facette 3 comprend plus de trois unités morphopédologiques et dans des proportions plus ou moins égales. Ces diffé-

rences s'expliquent en partie par le fait que la carte de référence est bien une carte à vocation pédologique et que sa réalisation a fait appel à d'autres critères (nature des sols) que purement morphologiques et à des processus mentaux permettant de confronter et de synthétiser des informations de nature différentes.

Les conclusions que l'on peut tirer sont fonction des objectifs poursuivis et de l'échelle relative :

— dans le cadre des statistiques agricoles, la carte des facettes morphologiques constitue un document utile pour l'amélioration des points de sondage. En effet, la carte des facettes morphologiques permet de délimiter les deux unités de paysage les plus importantes sur le plan agricole : la plaine alluviale et le bas-glacis ;

— dans le cadre d'une cartographie de type morphopédologique, le traitement d'un modèle numérique de terrain apparaît plus comme une information complémentaire permettant d'analyser le modelé sous un aspect morpho-

dynamique et de mieux caractériser les potentialités et les contraintes des sols associés ;

— dans le cadre d'une étude de l'environnement à l'échelle régionale (3 600 km²), les facettes morphologiques servent de base à une analyse de la répartition des principaux domaines d'occupation du sol (cultures, jachères et non cultivé) et fournissent une aide précieuse à l'appréhension des logiques qui gouvernent l'évolution des systèmes de production.

REMERCIEMENTS

Cette étude a pu être réalisée grâce au concours de la Région Wallonne de Belgique, de l'Agence de coopération culturelle et technique (ACCT) et du Centre commun de recherche d'Ispira.

Les auteurs remercient plus spécialement messieurs G. Mouchet, E. Bartholomé et L. Bock pour leurs apports scientifiques et critiques dans cette étude.

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

BIBLIOGRAPHIE

- AMEYAN (O.), 1986. — Quality of land facets as soil mapping units in an area of northern Nigeria. *Geoforum*, 17 (1) : 97-107.
- ANGE (A.), 1990. — *Stratification de l'espace rural et identification des contraintes du milieu à la production végétale* — Agronomie et ressources naturelles en régions tropicales. Montpellier, 12-15 septembre 1989. Montpellier, édit. Irat.
- ANSOULT (M.), 1988. — *Étude et modélisation de formes de la surface terrestre*. Thèse de doct., UCL, Louvain la Neuve.
- DOSSE (M.), KILIAN (J.), SAVARY (G.), 1982. — Campagne de simulation des données Spot : évolution des sols dégradés et étude du réseau hydrographique. *Agronomie Tropicale*, 38 (4) : 253-266.
- GUILLOBEZ (S.), RAUNET (M.), 1979. — *Étude morphopédologique de la haute vallée de la Volta Noire et ses bordures (Haute-Volta)*. Paris, Irat-Gersar, carte 1/100 000.
- HENQUIN (B.), AVRIL (C.), BOCK (L.), MATHIEU (L.) 1991. — Potentialités physiques et stratégies de mise en valeur du milieu dans le haut bassin du fleuve Gambie. Cas d'étude : le village de Téliré. *Annales de Gembloux*, 1991 (97) : 277-291.
- KILIAN (J.), 1990. — *Carte du milieu pour le développement rural* — Agronomie et ressources naturelles en régions tropicales. Montpellier, 12-15 septembre 1989. Montpellier, édit. Irat.
- RAUNET (M.), 1982. — Les terroirs agricoles du « Bas-glacis » de la haute vallée de la Volta Noire (Haute-Volta) : leur identification par approche géomorphologique et pédologique. *Agronomie Tropicale*, 37-40, 11 p.
- THEODOSSIOU (E.I.), DOWMAN (I.J.), 1990. — Heighting accuracy of SPOT. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 56 (12) 90 : 1643-1649.

Utilisation de la télédétection spatiale (données XS de Spot) pour la cartographie de l'occupation du sol en zones arides méditerranéennes : exemple d'Aïn Oussera (Algérie)

Roger MANIÈRE (1), Elisabeth BASSISTY (2), Jean-Claude CELLES (2), Saïd MELZI (3)

(1) Ura 1152 Écologie et Paléoécologie méditerranéennes, université d'Aix-Marseille III, 13397 Marseille cedex 13, France.

(2) Écologie et Phytosociologie, université de Nice Sophia-Antipolis, 06108, Nice cedex 2, France.

(3) Unité des Ressources biologiques terrestres, université des sciences et de la technologie H. Boumedienne,
BP 812 Alger-Gare, 16000 Alger, Algérie.

RÉSUMÉ

La présente note traite d'un exemple d'application concernant l'utilisation de l'imagerie spatiale à haute résolution (données XS de Spot) pour la cartographie de l'occupation du sol en zones arides méditerranéennes. L'exemple porte sur une zone steppique des hauts plateaux sud-algérois. La démarche empruntée se base sur une confrontation de données collectées sur le terrain et des données satellitaires acquises. Les auteurs orientent leurs travaux sur l'utilisation d'indices de végétation et de sols appropriés ainsi que sur l'analyse du comportement spectral de « polygones-tests ». Le calcul d'une « matrice de confusion » permet d'apprécier la qualité des résultats obtenus.

MOTS CLÉS : Télédétection — Haute résolution — Zones arides méditerranéennes — Données Spot — Cartographie.

ABSTRACT

SPOT-XS REMOTE SENSING DATA FOR LAND USE MAPPING IN ARID MEDITERRANEAN ZONES :
EXAMPLE OF AÏN OUSSERA (ALGÉRIE)

This paper treats an applied case study concerning the use of spatial high resolution imagery (Spot XS data) for mapping land use in arid mediterranean zones. The case study is on arid rangelands of the algerian steppe. The reasoning is based on the comparison of collected field data and remotely sensed data. The authors direct their work toward the use of appropriated vegetation and soil indices and the spectral behavior analysis of reference plots. An error matrix is calculated for assessing the accuracy of results.

KEYWORDS : Remote sensing — High resolution — Arid mediterranean zones — Spot data — Mapping.

INTRODUCTION

Pour faire face aux problèmes de développement des zones arides, l'évaluation des ressources végétales constitue l'une des priorités immédiates. Dans une telle démarche, l'utilisation de l'imagerie spatiale apporte, depuis plusieurs années déjà, une contribution non négligeable mais

s'accompagne d'un certain nombre de problèmes tout à fait spécifiques aux zones arides.

À moyenne échelle, les données télédétectées (*i.e.* : données MSS de Landsat) autorisent la mise en place d'inventaires des ressources végétales avec une précision souvent excellente, de même qu'elles apportent une information non négligeable sur la relation végétation-géomor-

phologie (JONES 1986 ; MANIÈRE et CHAMIGNON, 1986 ; LACAZE et JOFFRE, 1987 ; MANIÈRE *et al.*, 1989).

À grande échelle, avec l'arrivée des données à haute résolution spatiale, la perception des phytocénoses devient plus complexe et exige des approches approfondies qui s'appuient plus encore sur les données-terrain (DE WISPELAERE *et al.*, 1983 ; ESCADAFAL et POUGET, 1986 ; POUGET, 1989).

L'expérimentation présentée s'inscrit dans les différentes actions de recherche susceptibles d'être engagées dans le cadre de la compréhension et de la lutte contre la

désertification en zone steppique présaharienne. Conduite sur une zone représentative du Sud algérois, elle vise la perception des phytocénoses méditerranéennes par l'intermédiaire d'un inventaire phyto-écologique et d'images satellitaires (données multi-spectrales Spot-HRV).

ZONE D'ÉTUDE

Située à 150 km au sud d'Alger, notre zone d'étude prend place dans le vaste domaine steppique des Hauts-Plateaux maghrébins (fig. 1).

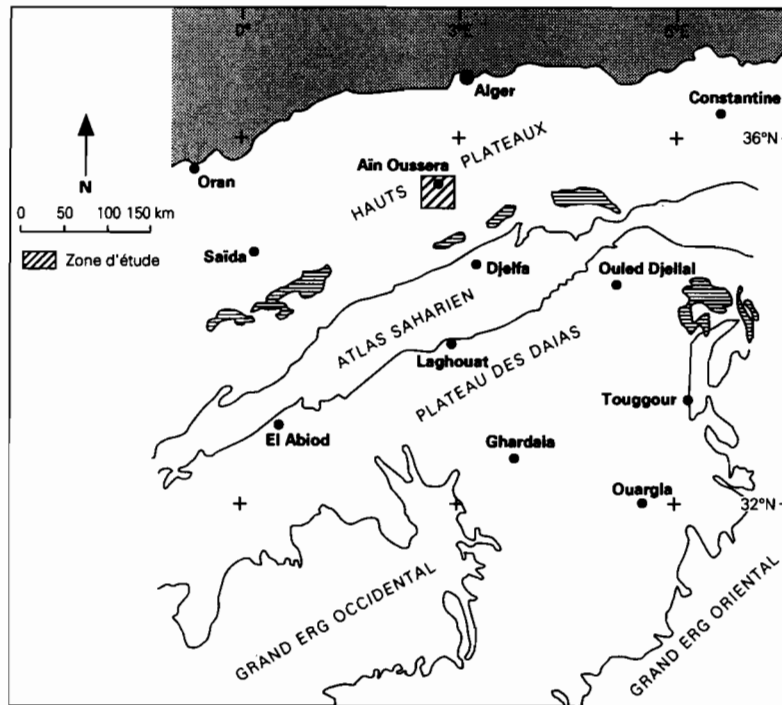


FIG. 1. — Localisation de la zone d'étude.
Location of the study area.

D'une superficie de 83 000 ha environ (2°44'E-3°02'E / 35°27'N-35°10'N), elle se trouve limitée au nord par le Chott Boughzoul, au sud par les premiers chaînons montagneux de l'Atlas saharien (monts de Guelt Es Stel, 1 000 à 1 200 m d'altitude, direction SO-NE). L'ensemble de la zone se présente sous la forme d'une étendue légèrement vallonnée, que dominent au nord quelques reliefs peu conséquents (altitude inférieure à 900 m). Du nord au sud, elle subit une élévation sensible d'altitude — de 700 à 900 m environ — qui marque la présence des monts de Guelt Es Stel. Le réseau hydrographique s'organise en un système endoréique dont les nombreux chenaux d'oueds ne manquent pas de caractériser le paysage.

La région étudiée s'intègre dans l'étage aride moyen à hiver frais, variante thermique macrohémérotherme, défini par LE HOUÉROU (1989) : 200-300 mm, 1°C < m < 3°C, 12°C < M < 15 °C.

Elle s'inscrit dans un contexte écologique régional : la végétation steppique algérienne qui, limitée par les isohyètes 100 et 400 mm, occupe environ 15 millions d'hectares. Bien qu'homogène du point de vue physiognomique, elle est diversifiée dans ses composantes écologiques ; deux espèces y marquent le paysage végétal : l'alfa (*Stipa tenacissima*) et l'armoïse (*Artemisia herba-alba*), auxquels s'associent des faciès liés au substrat ainsi qu'à l'état de dégradation du milieu (photo 1).



PHOTO 1. — Steppe à *Stipa tenacissima* dégradée.
Degraded steppe of Stipa tenacissima.

DONNÉES UTILISÉES

Deux types de données ont été utilisées :

- des données-terrain (inventaire phyto-écologique) ;
- des données-images (XS1, XS2, XS3 de Spot).

Données de terrain

La reconnaissance de terrain s'est effectuée du 06 au 12 mai 1992, période durant laquelle la végétation est en pleine phase de croissance. Les observations au sol ont été effectuées suivant un plan d'échantillonnage de type stratifié (LONG, 1974). Celui-ci s'est donc appuyé sur l'ensemble des informations existantes (cartes topographiques, inventaires phytoécologiques antérieurs) ainsi que sur un zonage écologique *a priori* de la région, basé sur l'interprétation visuelle de compositions trichromes (données HRV de Spot, 1986 et 1989) et sur des classifications non supervisées réalisées sur ces mêmes données.

Signalons que le positionnement géographique des relevés de terrain par rapport aux images a été facilité par l'utilisation d'un système GPS, tandis que les données Spot étaient mises sous forme de spatio-cartes recalées géométriquement.

S'appuyant sur ces images trichromes, l'emplacement des relevés (sites tests) a été choisi dans les zones paraissant les plus représentatives compte tenu des objectifs retenus (inventaire de l'occupation du sol au 1/50 000) et des niveaux de perception explorés (résolution au sol de 20 mètres). À terme, un inventaire phytoécologique a été réalisé, permettant de caractériser 53 parcelles suffisamment bien réparties géographiquement et thématiquement pour être considérées comme représentatives de la diversité écologique de la zone d'étude.

Chaque parcelle échantillonnée est décrite par :

- son type de couvert végétal (au sens d'IONESCO et SAUVAGE, 1962) ;
- un relevé phytosociologique (donnant une liste floristique exhaustive où chaque espèce est caractérisée par son abondance-dominance) ;
- l'évaluation quantitative du recouvrement végétal (global et spécifique) ainsi que celle du recouvrement des différents éléments de la surface du sol (sable, pellicule de battance, éléments grossiers et litière) par la méthode des points-quadrats (DAGET et POISSONET, 1971) ;
- la quantification de sa phytomasse épigée.



PHOTO 2. — Analyse *in situ*...
Field sampling.

Données-images

Fournies par Spot 1, les données télédétektées sont de type multispectral et sont acquises de façon quasi synchrone à la réalisation de l'inventaire de terrain. L'image provient de la scène 051-279 du 6 juin 1992, période optimale pour la perception des communautés végétales en régions semi-arides et arides.

MÉTHODE

L'ensemble des traitements numériques a été réalisé grâce au logiciel Geoimage 2.

Un certain nombre d'étapes ont ponctué ce travail :

PRÉ-TRAITEMENTS :

- programmation et acquisition des données Spot synchrones à l'inventaire de terrain (données 1992) ;
- élaboration de compositions trichromes (XS1=bleu, XS2=vert et XS3=rouge) après rehaussement du contraste et amélioration des données de base (1986, 1989, 1992) ;
- recalages géométriques des trois scènes Spot autorisant les comparaisons éventuelles ;

— mise en conformité géographique avec la carte topographique locale (IGN, feuilles d'Aïn Oussera et Guelt Es Stel au 1/50 000) et restitution cartographique à l'échelle pour servir de support au plan d'échantillonnage *in situ* (spatio-carte).

ACQUISITION DES DONNÉES DE TERRAIN :

- analyse visuelle des spatio-cartes ;
- élaboration de classifications non dirigées (ACP/CAH) permettant un pré-zonage thématique (par référence à la connaissance *a priori* du terrain) ;
- réalisation proprement dite de l'inventaire phytocécologique.

CONFRONTATION IMAGE-TERRAIN :

- localisation géographique des relevés phytocécologiques sur les images traitées ;
- calculs d'indices* (élaboration de néo-canaux) adaptés au type de milieu écologique étudié ;
- choix des bandes spectrales les plus appropriées ;
- confrontation entre données de terrain et données-images (canaux bruts et néo-canaux).

CLASSIFICATION SUPERVISÉE :

- numérisation interactive des polygones tests ;
- classification supervisée suivant le maximum de vraisemblance ;
- restitutions cartographiques polychromes au 1/50 000.

* Concernant les indices, notre choix s'est porté sur les suivants :

Indices de végétation :

$$\text{RVI} = \text{XS3/XS2 (Ratio Vegetation Index (KRIEGLER } et al., 1969))$$
$$\text{NDVI} = \frac{\text{XS3} - \text{XS2}}{\text{XS3} + \text{XS2}} \text{ (Normalised Difference Vegetation Index (ROUSE } et al., 1973))}$$

*Indice de brillance** :*

$$IB = V^-(XS1^2+XS2^2+XS3^2/3)$$

*Indice de rougeur des sols** :*

IR (Spot) : $\text{XS2}^2 / \text{XS1}^2$

** Ces deux derniers indices, adaptés aux données Spot, sont, en particulier, préconisés par POUGET *et al.* (1991) pour les zones méditerranéennes arides.

L'ordinogramme des principales phases développées au cours de ce travail est donné dans la figure 2.

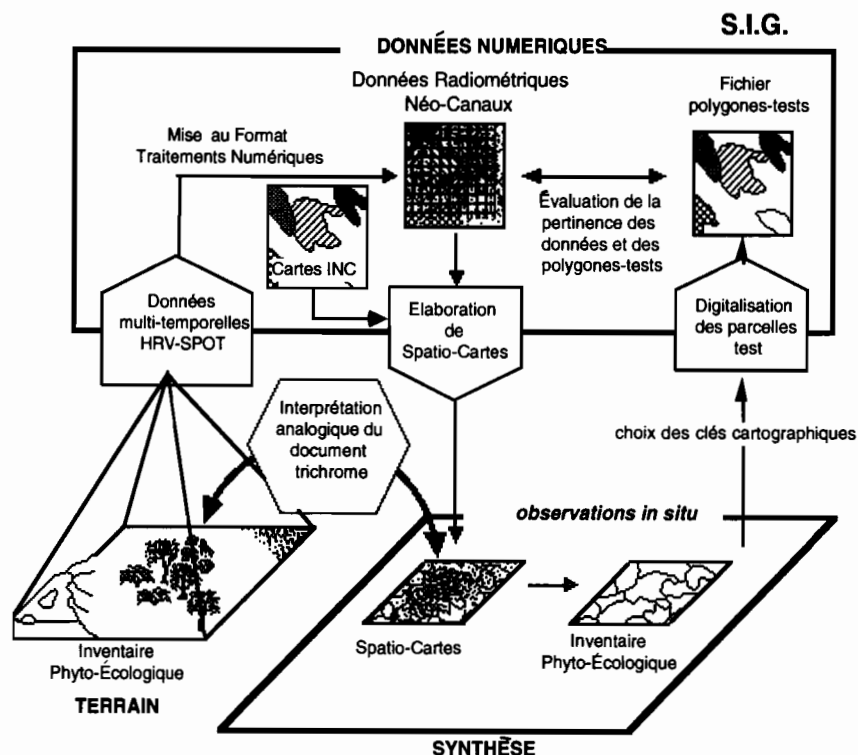


FIG. 2. — Processus méthodologique appliqué.
Applied methodological processes.

Deux volets essentiels ont marqué ce travail : l'analyse du comportement spectral des 53 sites tests, puis celle de 22 polygones tests, ainsi que l'évaluation qualitative de la classification supervisée pratiquée.

RÉSULTATS

Analyses spectrales

L'analyse des réponses spectrales des 53 sites tests (voir planche 1) combinée à l'analyse des résultats d'une Classification Ascendante Hiérarchique réalisée sur nos données-terrain nous a permis de retenir 22 thèmes susceptibles d'être cartographiés. Ces 22 entités constituent 22 polygones tests, supports de la classification dirigée.

La clé de cartographie ainsi définie est la suivante :

- code 1 : steppe à *Artemisia herba-alba*, état exceptionnel
(aha 1) recouvrement général de l'armoise : 20 à 30 %
recouvrement général dense : 40 à 50 %
PG élevée : 1400 kg/MS/ha
Pellicule de battance
- code 2 : steppe à *Artemisia herba-alba* en assez bon état
(aha 2) recouvrement général de l'armoise : 15 à 20 %
recouvrement général moyen : 30 à 40 %
PG moyenne : 1 000 kg/MS/ha
Éléments grossiers, pellicule de battance
- code 3 : steppe à *Artemisia herba-alba*,
(aha 3) faciès ensablés à *Plantago albicans*, assez bon état à bon état
recouvrement général de l'armoise : 15 à 30 %
recouvrement général moyen à dense : 30 à 50 %
PG moyenne : 1 000 à 1 500 kg/MS/ha
Voile sableux
- code 4 : steppe à *Artemisia herba-alba* dégradée,
(aha 4) faciès à *Atractylis serratuloides*, *Noaea mucronata*, *Peganum harmala*
recouvrement général de l'armoise faible : inférieur à 10 %
recouvrement général faible à dense : 15 à 50 %
PG faible : inférieur à 800 kg/MS/ha
plus ou moins ensablé
- code 5 : steppe à *Stipa tenacissima*, état exceptionnel
(alfa 1) recouvrement général de l'alfa dense : 25 à 30 %
recouvrement général : 30 à 35 %
PG élevée : supérieure à 1 200 kg/MS/ha
Éléments grossiers
- code 6 : steppe à *Stipa tenacissima* en assez bon état
(alfa 2) recouvrement général de l'alfa moyen : 10 à 20 %
recouvrement général : 15 à 25 %
PG moyenne : 800 à 1 000 kg/MS/ha
Éléments grossiers
- code 7 : steppe à *Stipa tenacissima* ensablée, état exceptionnel
(alfa 3) recouvrement général de l'alfa dense à très dense : 25 à 45 %
recouvrement général : 30 à 50 %
PG élevée : 1 500 kg/MS/ha
accumulation sableuse
- code 8 : steppe à *Stipa tenacissima* ensablée, assez bon état
(alfa 4) recouvrement général de l'alfa moyen : 15 à 25 %
recouvrement général : 20 à 30 %
PG moyenne : 900 à 1 100 kg/MS/ha
accumulation sableuse
- code 9 : steppe à *Stipa tenacissima* ensablée dégradée
(alfa 5) recouvrement général de l'alfa faible : inférieur à 10 %
recouvrement général : inférieur à 15 %
PG faible : inférieur à 700 kg/MS/ha
accumulation sableuse
- code 10 : steppe à *Stipa tenacissima* très ensablée, bon état
(alfa 6) recouvrement général de l'alfa : 25 à 30 %
recouvrement général : 30 à 35 %
PG élevée : 1 200 kg/MS/ha
forte accumulation sableuse
- code 11 : steppe à *Stipa tenacissima* très ensablée, assez bon état
(alfa 7) recouvrement général de l'alfa moyen : 10 à 20 %
recouvrement général : 15 à 25 %
PG moyenne : 800 kg/MS/ha
forte accumulation sableuse
- code 12 : faciès de dégradation extrême
(deg. ext.) (faciès à *Noaea mucronata*, *Atractylis serratuloides*, *Peganum harmala* ...)
recouvrement général très faible : inférieur à 10 %
- code 13 : faciès ensablés, fortement dégradés
(f. ens.) (faciès à *Plantago albicans*, *Schismus barbatus*...)
recouvrement général faible : inférieur à 20 %
- code 14 : végétation dense d'oued
(oued 1) (mosaïques à *Pistachia atlantica*, *Ziziphus lotus*)
- code 15 : végétation dense d'oued
(oued 2) (mosaïques à *Ziziphus lotus*, fonds d'oueds ensablés à *Artemisia campestris*, pelouses à *Cynodon dactylon*)
- code 16 : végétation dense d'oued (cultures de décrue)
(oued 3)
- code 17 : fonds d'oueds argileux (pellicule indurée)
(oued 4)
- code 18 : cultures
(cult. 1)
- code 19 : cultures (boisements)
(cult. 2)
- code 20 : sable
(sable)
- code 21 : urbain
(urbain)
- code 22 : sols nus (croûte calcaire, substrat affleurant)
(s. nus)

Le jeu de données radiométriques dont nous disposons permet d'analyser le comportement spectral de nos parcelles dans chaque canal (tabl. I à VII, fig. 3 à 7). L'analyse détaillée de ces documents préside au choix des canaux les plus judicieux à combiner.

TABLEAU I
Réponses spectrales moyennes des polygones tests dans les canaux bruts et néo-canaux
Spectral behavior of reference plots in the channels XS1, XS2, XS3 and the indices

	XS1		XS2		XS3		RVI		NDVI		IR		IB	
codes	m	σ	m	σ	m	σ	m	σ	m	σ	m	σ	m	σ
1	92,80	4,07	105,29	7,04	85,97	4,75	40,94	0,93	135,91	2,26	69,28	1,84	114,02	6,29
2	106,95	4,38	132,40	5,63	106,35	3,20	40,14	0,73	134,19	1,65	71,71	3,33	139,04	5,29
3	105,82	3,41	131,94	4,12	105,29	2,37	39,92	0,82	133,53	1,88	73,51	3,57	138,06	3,78
4	109,76	2,14	138,80	3,86	105,03	1,80	37,80	0,65	128,31	1,51	72,90	1,61	142,61	3,13
5	104,46	1,25	131,24	1,92	109,96	1,56	41,97	0,49	138,41	0,97	75,43	1,72	138,97	1,78
6	99,45	1,51	122,00	2,65	99,67	1,22	40,92	0,60	135,83	1,20	75,63	1,58	129,09	2,12
7	99,85	1,29	132,91	1,88	112,70	0,81	42,36	0,59	139,47	1,25	88,74	2,60	139,21	1,31
8	96,84	5,94	128,82	12,80	108,70	4,73	42,44	2,61	139,48	6,08	91,01	3,53	134,81	9,64
9	104,46	1,18	143,73	2,61	116,94	1,24	40,66	0,61	135,40	1,26	90,67	3,76	147,34	1,87
10	109,15	1,33	149,96	1,22	114,00	0,71	38,04	0,42	128,80	0,86	86,65	3,42	150,89	0,84
11	105,56	1,64	137,43	2,60	114,12	1,39	41,57	0,66	137,47	1,33	80,38	2,13	143,76	2,16
12	118,80	5,23	146,99	5,93	113,95	3,35	38,75	0,69	130,73	1,56	64,70	4,59	152,89	5,71
13	112,06	3,91	151,22	5,97	116,44	2,01	38,58	1,14	130,06	2,93	81,27	3,32	153,35	4,74
14	78,97	6,69	82,01	11,34	84,53	8,76	52,34	8,37	159,36	14,84	67,89	4,60	98,43	8,89
15	84,98	7,75	98,28	13,16	80,00	10,08	40,75	1,34	135,59	3,10	78,38	3,86	105,73	12,43
16	95,78	1,55	115,03	2,88	93,16	1,67	40,59	0,65	135,12	1,40	75,29	1,73	122,15	2,36
17	104,20	2,80	134,07	3,42	101,25	2,71	37,75	0,68	128,09	1,68	79,63	5,80	136,97	2,98
18	100,12	1,74	129,45	2,10	99,73	1,82	38,48	0,58	130,02	1,29	83,54	3,30	132,77	1,97
19	83,83	2,67	92,41	4,18	77,53	3,04	41,95	0,80	138,53	1,73	72,43	2,58	101,78	3,88
20	97,16	2,51	128,17	5,36	116,74	1,51	45,58	1,54	146,72	3,41	89,61	2,90	137,72	3,65
21	127,93	12,38	145,10	15,86	105,46	7,29	36,61	3,24	124,81	7,79	50,61	4,89	152,73	13,94
22	175,01	28,23	211,62	32,56	150,89	19,44	35,84	1,71	122,95	4,44	43,69	10,94	217,13	32,38

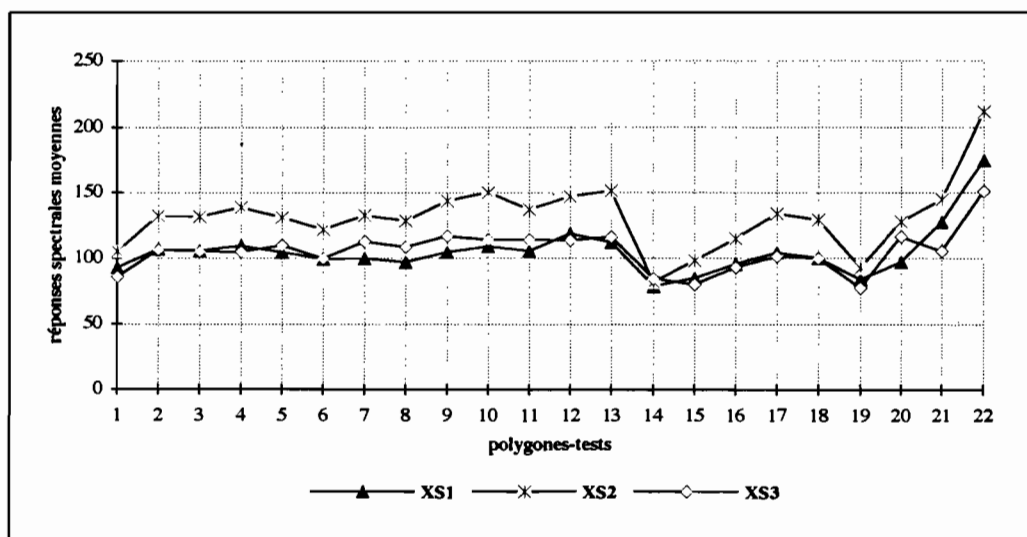


FIG. 3. — Réponses spectrales moyennes des polygones tests dans les canaux bruts (XS1, XS2, XS3).
Spectral behavior of reference plots in the channels XS1, XS2, XS3.

TABLEAU II

Matrice de corrélation des canaux bruts XS1, XS2, XS3
Correlation matrix from the channels XS1, XS2, XS3

	XS1	XS2	XS3
XS1	1,00	0,93	0,82
XS2	0,93	1,00	0,92
XS3	0,82	0,92	1,00

TABLEAU III

Matrice de corrélation des indices de végétation (NDVI, RVI)
Correlation matrix from the vegetation indices

	NDVI	RVI
NDVI	1,00	0,99
RVI	0,99	1,00

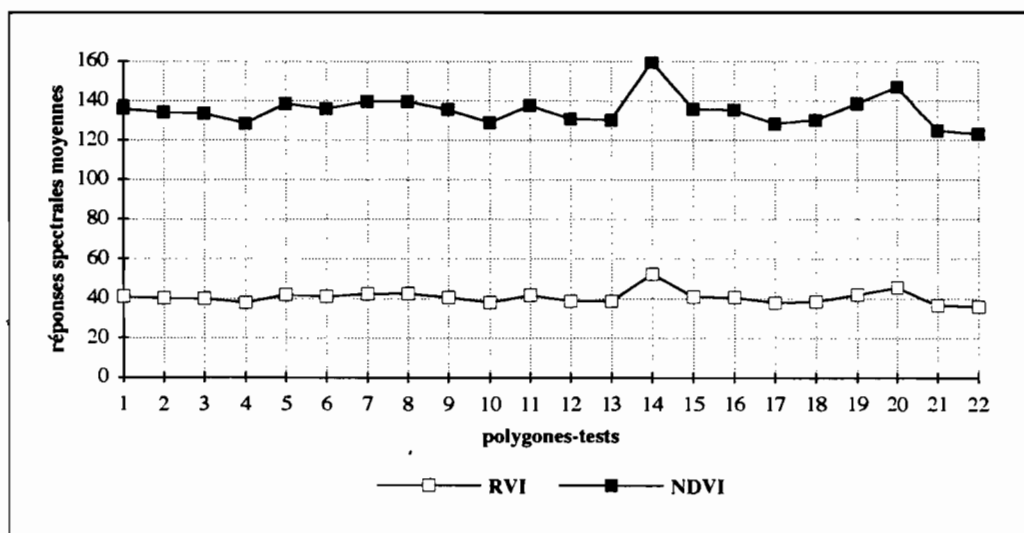


FIG. 4. — Réponses spectrales moyennes des polygones tests dans les néo-canaux NDVI et RVI.
Spectral behavior of reference plots in the NDVI and the RVI.

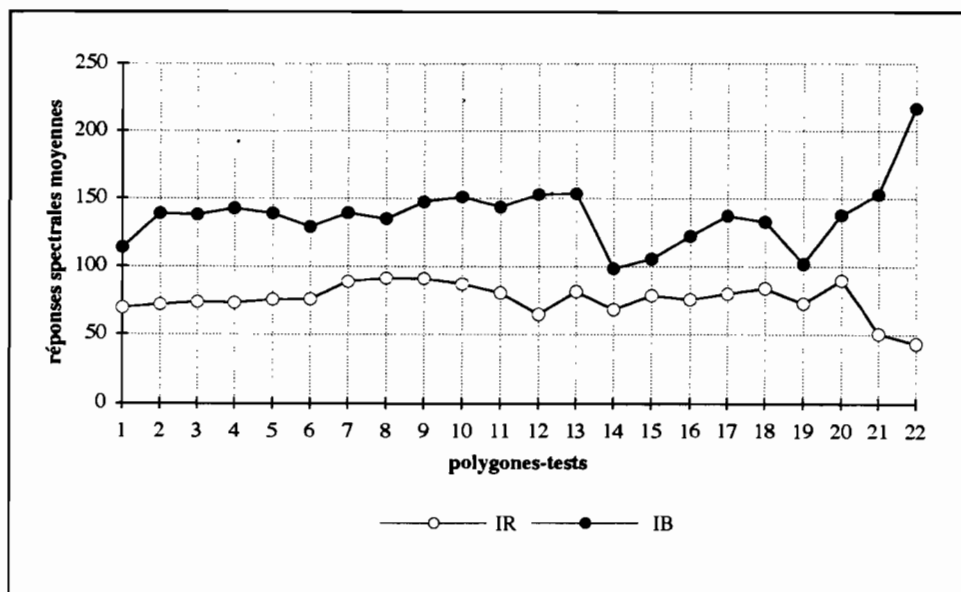


FIG. 5. — Réponses spectrales moyennes des polygones-tests dans les néocanaux IB, IR.
Spectral behavior of reference plots in the IB and the IR.

TABLEAU IV
Matrice de corrélation des indices de sol (IB, IR)
Correlation matrix from the soil indices

	IB	IR
IB	1,00	-0,29
IR	-0,29	1,00

TABLEAU V
Matrice de corrélation des canaux bruts et de l'indice de brillance
Correlation matrix from the channels XS1, XS2, XS3 and the brightness index

	XS1	XS2	XS3	IB
XS1	1,00	0,93	0,82	0,95
XS2	0,93	1,00	0,92	0,99
XS3	0,82	0,92	1,00	0,94
IB	0,95	0,99	0,94	1,00

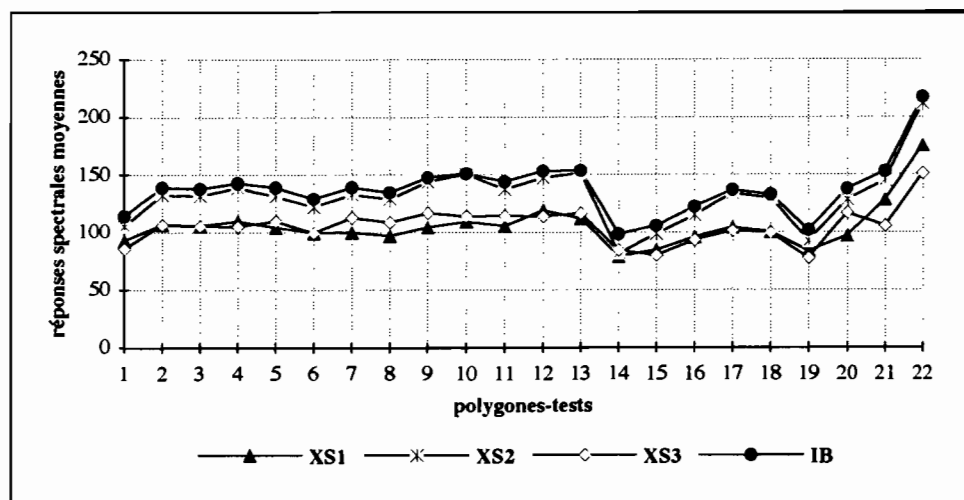


FIG. 6. — Réponses spectrales moyennes des polygones tests dans les canaux bruts et l'IB.
Spectral behavior of reference plots in the channels XS1, XS2, XS3 and the IB.

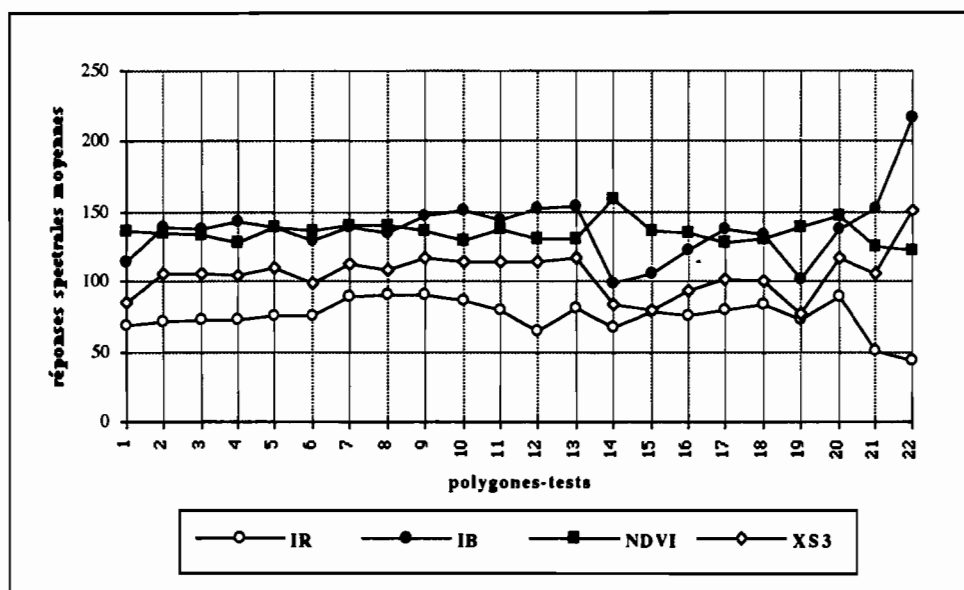


FIG. 7. — Réponses spectrales moyennes des polygones tests dans le canal brut XS3, le NDVI et les deux indices de sol.
Spectral behavior of reference plots in the channel XS3 and both soil indices.

Si nous analysons les réponses spectrales moyennes des parcelles test dans les canaux bruts XS1, XS2 et XS3 (fig. 3), il apparaît clairement que l'information radiométrique contenue dans ces trois canaux présente une certaine redondance, ce que confirme du reste la forte corrélation existant entre ces canaux (tabl. II).

Les indices de végétation (NDVI et RVI) sont (de façon prévisible) également très fortement corrélés (tabl. III) ; l'information radiométrique qu'ils contiennent présente en effet une configuration analogue (fig. 4). On note toutefois une dynamique plus pertinente de la courbe du NDVI.

La figure 5 (et tableau associé) indique une faible corrélation entre l'IB et l'IR. Remarquons (tabl. VII) que l'IR se montre très faiblement corrélé avec tous les canaux et néocanaux. L'IB, quant à lui, se montre moyennement corrélé aux indices de végétation et fortement aux canaux bruts, notamment au canal XS2 (fig. 6, tabl. V).

On remarque avec intérêt (tabl. VII) que les coefficients de corrélation du canal XS3 avec les indices de végétation présentent, d'une part, des valeurs beaucoup plus faibles que celles calculées pour les indices de végétation et les deux autres canaux bruts ; mais également, d'autre part, des valeurs beaucoup plus faibles que celles calculées pour l'IB et les indices de végétation.

TABLEAU VI
Matrice de corrélation du canal brut XS3, du NDVI
et des indices de sol
*Correlation matrix from the channel XS3, the NDVI
and the soil indices*

XS3	1,00	-0,43	0,94	-0,11
NDVI	-0,43	1,00	-0,69	0,24
IB	0,94	-0,69	1,00	-0,29
IR	-0,11	0,24	-0,29	1,00

TABLEAU VII
Matrice de corrélation des canaux bruts et néo-canaux
*Correlation matrix from the channels XS1, XS2, XS3
and the indices*

	XS1	XS2	XS3	NDVI	RVI	IB	IR
XS1	1,00	0,93	0,82	-0,73	-0,70	0,95	-0,56
XS2	0,93	1,00	0,92	-0,75	-0,72	0,99	-0,22
XS3	0,82	0,92	1,00	-0,43	-0,41	0,94	-0,11
NDVI	-0,73	-0,75	-0,43	1,00	0,99	-0,69	0,24
RVI	-0,70	-0,72	-0,41	0,99	1,00	-0,66	0,21
IB	0,95	0,99	0,94	-0,69	-0,66	1,00	-0,29
IR	-0,56	-0,22	-0,11	0,24	0,21	-0,29	1,00

Un certain nombre de conclusions s'imposent :

— certains canaux et néo-canaux présentent une forte corrélation entre eux, leur combinaison ne présente que

peu d'intérêt (cas en particulier des canaux bruts XS1, XS2, XS3 et de l'IB avec ces mêmes canaux) ;

— l'utilisation de l'IR, par contre, s'annonce fort prometteuse puisqu'il n'est que très faiblement corrélé avec tous les canaux ;

— l'IB présente un intérêt certain par le caractère complémentaire de l'information qu'il apporte vis-à-vis de l'IR ; cette qualité toutefois paraît insuffisante au regard du comportement spectral des polygones tests dans le canal XS3. Celui-ci, en effet, se montre non seulement suffisamment corrélé avec l'IB pour pouvoir être considéré comme tout autant instructif que lui, mais présente en outre l'avantage d'être, d'une part, moins corrélé à l'IR que ne l'est l'IB et surtout d'autre part, d'être nettement moins corrélé aux indices de végétation que ne l'est l'IB ; la décision de faire intervenir le canal XS3 dans la trichromie nous paraît à ce titre être un choix raisonnable ;

— en ce qui concerne les indices de végétation, notre préférence va au NDVI dont la courbe de réflectance présente une meilleure dynamique que celle du RVI.

À la lumière de cette analyse, la trichromie faisant intervenir les canaux suivants : NDVI, XS3, IR nous a semblé la plus pertinente à réaliser. Cette image se montre en effet d'une qualité visuelle particulièrement intéressante ; elle permet notamment de dissocier de façon très nette les faciès ensablés à partir desquels se dégagent un certain nombre de classes (planche 2).

Classification supervisée

Une classification supervisée a été réalisée à partir de la trichromie précédemment choisie (planches 1 et 2) et a fait l'objet du calcul d'une matrice de confusion (STORY et CONGALTON, 1986) permettant d'en apprécier la pertinence (tabl. VIII).

Les valeurs des pourcentages « d'erreur d'omission » et « d'erreur de commission » permettent de quantifier la précision avec laquelle les différents thèmes ont été classifiés et dans quelle mesure les pixels de l'image sont, pour chaque thème envisagé, correctement classifiés ; l'examen de la matrice de confusion elle-même permet ensuite de préciser quels sont les thèmes présentant des confusions thématiques.

C'est ainsi que l'on note une confusion thématique très nette entre :

— les thèmes de cultures et d'oueds (codes 19 [cult. 2] et 15 [oued 2], codes 18 [cult. 1] et 17 [oued 4]) ;

— les sols nus et l'urbain (codes 22 et 21) ;

de même qu'au sein de nos thèmes à armoise : codes 2 (aha 2) et 3 (aha 3) et de façon plus discrète au sein de nos thèmes à alfa (codes 11 [alfa 7] et 5 [alfa 1] en particulier), ainsi qu'entre :

— nos thèmes à alfa ensablés (codes 7 à 11) et les faciès dégradés ensablés (code 13) ;

TABLEAU VIII
Matrice de confusion et calculs d'erreurs associés
Error matrix

codes	aha1	aha2	aha3	aha4	alfa1	alfa2	alfa3	alfa4	alfa5	alfa6	alfa7	deg ex	f.ens.	oued1	oued2	oued3	oued4	cult1	cult2	sable	urbain	s.nus	
classe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	total
aha1	1	66												3	3	2		2	5				101
aha2	2		12			7					1												98
aha3	3			76	1	4						1						1					97
aha4	4			8	67												6						101
alfa1	5			1	85		5													1			99
alfa2	6		1			88																	100
alfa3	7						98	2															100
alfa4	8						1	92	3									1		3			100
alfa5	9						4	7	81														99
alfa6	10									87													100
alfa7	11				11		1	1	6		79										1		99
deg ex	12		5	5								85	2								2	1	100
f.ens.	13						3	4	2	4			81										100
oued1	14	1						2						91	1	1			4		1		101
oued2	15	6		2		3								3	84	8		3					99
oued3	16															85							100
oued4	17				5					1							59						100
cult1	18			1	1	2												4	92				100
cult2	19	2												1					72				100
sable	20						1				1									94			101
urbain	21											2		2							79		99
s. nus	22											9	1								88		100
total	109	69	122	94	98	115	113	108	92	92	101	108	97	100	93	96	70	134	91	104	80	108	2194

 confusions thématiques les plus remarquables révélées par la valeur du pourcentage "d'erreur d'omission"

 confusions thématiques les plus remarquables révélées par la valeur du pourcentage "d'erreur de commission"

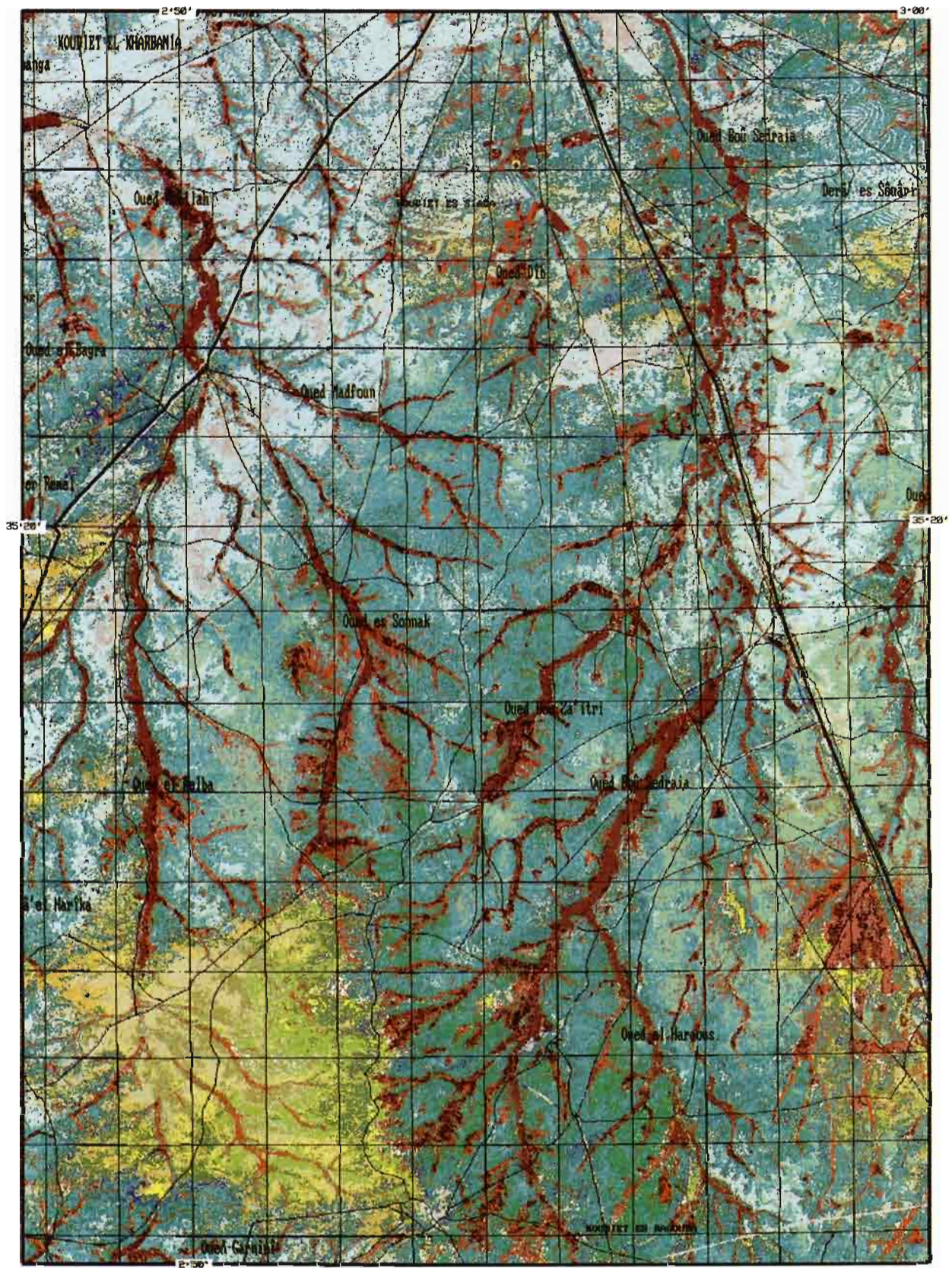
somme de la diagonale (nombre total de pixels correctement classifiés) : 1810

précision globale : 82% (1810 / 2194)

"erreur d'omission" : (nombre de pixels du thème x correctement classifiés / nombre total de pixels attribués au thème x)

"erreur de commission" : (nombre de pixels du thème x correctement classifiés / nombre total de pixels appartenant à la classe x)

		"erreur d'omission"	"erreur de commission"
aha1	1	85%	85%
aha2	2	74%	
aha3	3		87%
aha4	4	93%	86%
alfa1	5	87%	86%
alfa2	6	86%	99%
alfa3	7	87%	98%
alfa4	8	85%	92%
alfa5	9	88%	82%
alfa6	10	95%	87%
alfa7	11	81%	86%
deg ex	12	85%	85%
f.ens.	13	84%	81%
oued1	14	91%	90%
oued2	15		
oued3	16	89%	85%
oued4	17	84%	
cult1	18		92%
cult2	19	72%	72%
sable	20	95%	98%
urbain	21	91%	79%
s. nus	22	88%	85%



- le code 1 (aha 1) et le code 16 (oued 3) ;
- le code 2 (aha 2) et les faciès de dégradation extrême (code 12).

L'analyse de cette matrice de confusion conduit à retenir trois points essentiels qui mettent l'accent sur les difficultés méthodologiques rencontrées, difficultés liées à la confusion thématique engendrée par :

- une confusion spectrale (proximité de la réponse spectrale de deux thèmes) (cas en particulier de l'urbain et des sols nus mais aussi de l'arboise dense [codes 1 (aha 1)] et de la végétation dense d'oued (codes 9 à 11) voire également des thèmes à alfa ensablée et des faciès dégradés ensablés [influence de la réponse spectrale du sable]) ;
- des lacunes au sein de notre échantillonnage (cas prévisible pour les confusions existant entre les codes des oueds et ceux des cultures (1), cas possible pour les codes 2 [aha 2] et 3 [aha 3]) ;
- la localisation géographique trop imprécise des relevés de terrain en général et de certains relevés en particulier compte tenu du fait que les thèmes étudiés se présentent fréquemment sous forme de mosaïques (origine probable de la confusion existant entre les codes 1 [aha 1] et 16 [oued 3], les codes 12 [deg. ext.] et 2 [aha 2], les codes 2 [aha 2] et 3 [aha 3] ainsi que les thèmes à alfa).

Ces deux derniers points en particulier limitent l'utilisation d'un certain nombre de données-terrain lors de la prise interactive des polygones tests (relevés que l'on sait mal localisés et/ou qui sont uniques pour le thème considéré). Rappelons à ce propos que les impondérables difficultés liées aux conditions de prospection du terrain représentent un facteur limitant non négligeable influençant la bonne conduite de l'échantillonnage.

Notons pour finir que la pertinence globale de notre classification s'avère satisfaisante (82 %) ; l'approche méthodologique qui sous-tend cette étude peut donc être considérée comme globalement satisfaisante. Il paraît clair cependant que l'amélioration de la classification thématique, dans ce type de milieu, est encore possible et passe avant tout par une amélioration, non seulement de l'échantillonnage *in situ* qui se doit d'être représentatif et équilibré, mais également du contenu de nos relevés (choix des paramètres à identifier) et du degré de précision de leur localisation.

Le fond du problème dans ce type d'approche reste l'adéquation entre données-terrain et données-images. Un certain nombre d'auteurs mettent l'accent sur ce problème de qualité des observations au sol : LONG (1978) et DE

WISPELAERE *et al.* (1983) notent que, quelle que soit la méthode d'analyse utilisée, l'exploitation des données satellitaires passe par une bonne connaissance de la réalité-terrain ; ESCADAFAL et POUGET (1986) estiment pour leur part que, dans les projets de télédétection, les données-terrain ne sont pas toujours satisfaisantes (précision du repérage, adaptation des observations à la problématique de la télédétection), ce qui ne va pas sans poser bien des problèmes.

CONCLUSIONS

À la suite de ce travail, il apparaît clairement que l'utilisation des données haute résolution spatiale apporte, par leur qualité de perception des écosystèmes méditerranéens steppiques, une aide précieuse aux problèmes de connaissance, de gestion et d'aménagement qui se posent actuellement en Afrique du Nord.

Néanmoins, l'hétérogénéité fréquente des phytocénoses en milieu steppique ainsi que la forte influence du sol sur les signatures spectrales obligent les utilisateurs à « calibrer » de façon précise les données dont ils disposent. La recherche de combinaisons de canaux les plus pertinentes et les mieux adaptées aux objectifs poursuivis constitue par ailleurs de toute évidence une étape nécessaire.

Il faut insister sur le caractère indispensable de la réalisation d'un inventaire *in situ* approprié. Il convient en effet d'établir avec précision, objectivité et perspicacité les modalités d'un échantillonnage de terrain en harmonie non seulement avec les objectifs poursuivis mais également avec la problématique de base liée à la perception des écosystèmes arides (prise en compte obligée du système « sol-végétation »). Tout repose finalement sur un problème de stratégie d'échantillonnage écologique où se côtoient données-images et données-terrain et dont les classifications obtenues traduisent (ou trahissent) la précision et la rigueur (MANIÈRE, 1987).

D'un point de vue technique, l'expérimentation menée souligne l'intérêt des inventaires phyto-écologiques traditionnels permettant une description claire et quantifiée du milieu, néanmoins la recherche de paramètres de description les mieux adaptés reste encore à faire ; est également soulevé le problème de la localisation géographique précise des relevés au sein de la zone d'étude pour laquelle l'utilisation d'un système de positionnement par satellite s'avère indispensable.

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

(1) Ces deux thèmes n'ont pas fait l'objet d'un véritable échantillonnage, leur classification ne rentrant pas dans le cadre de nos préoccupations. Pour les oueds notamment — qui sont le siège de mosaïques nombreuses — une typologie détaillée pourrait être réalisée en faisant appel à l'utilisation d'un masque et d'un échantillonnage approprié.

BIBLIOGRAPHIE

- DAGET (P.), POISSONNET (J.), 1971. — Une méthode d'analyse phytoécologique des prairies. Critères d'applications. *Ann. Agron.*, 22 (1) : 5-41.
- DE WISPELAERE (G.), TORRES (C.), NOEL (J.), 1983. — *Application des données de simulation Spot à l'étude de la végétation sahélienne du Ferlo sénégalais*. Désertification, simulation d'images Spot, Images / GDTA, Toulouse.
- ESCADAFAL (R.), POUGET (M.), 1986. — Luminance spectrale et caractères de la surface des sols en région aride méditerranéenne (Sud tunisien). *ITC Journal*, 1 : 19-23.
- IONESCO (T.), SAUVAGE (C.), 1962. — Les types de végétation du Maroc : essai de nomenclature et de définition. *Rev. Geogr. Maroc*, 1-2 : 75-86.
- JONES (A.R.), 1986. — The use of Thematic Mapper imagery for geomorphological mapping in arid and semi-arid environments. In : *Proc. Symp. on Rem. Sens. for Resources Development and Environmental Management*, Enschede, August 1986 : 273-280.
- KRIEGLER (F.), MALILA (W.), NALEPKA (R.), RICHARDSON (W.), 1969. — Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition. In : *Proc. of the 6th Int. Symp. on Rem. Sens. of Env.*, University of Michigan, Ann Arbor : 97-131.
- LACAZE (B.), JOFFRE (R.), 1987. — Caractérisation de formations végétales méditerranéennes à partir des données « Thematic Mapper », une étude de cas en Andalousie (Espagne). *Int. Jour. of Rem. Sens.*, vol. 8, n° 9 : 1319-1333.
- LE HOUEROU (H.N.), 1989. — Classification écoclimatique des zones arides de l'Afrique du Nord. *Ecol. Med.*, XV (3-4) : 95-144.
- LONG (G.), 1974. — *Diagnostic phytoécologique et aménagement du territoire. Principes généraux et méthodes*. Paris, Masson, 252 p.
- LONG (G.), 1978. — Compatibilité entre besoins exprimés et potentiels et possibilités offertes par la télédétection spatiale dans le cas des zones arides des pays en voie de développement de la région méditerranéenne. In : *Proc. of an Int. Conf. on Earth Observation from Space and Management of Planetary Resources*, Toulouse, 6-11 March 1978 : 115-160.
- MANIÈRE (R.), 1987. — *Télédétection spatiale et aéroportée et systèmes d'informations géocodées sur l'environnement : principes généraux et étude de quelques domaines d'applications*. Thèse doct. d'État, univ. Aix-Marseille III.
- MANIÈRE (R.), CHAMIGNON (C.), 1986. — Cartographie de l'occupation des terres en zone aride méditerranéenne par télédétection spatiale. *Ecologia Mediterranea*, XII (1,2) : 159-185.
- MANIÈRE (R.), COURBOULES (J.), CELLES (J.C.), CHAMIGNON (C.), BOUZENOUNE (A.), MELZI (S.), DJEBAILI (S.), KERMAD (M.), 1989. — *Inventaire des ressources naturelles renouvelables en zone aride méditerranéenne : évaluation de l'apport des données à moyenne résolution spatiale (Landsat MSS)*. Photo-Interprétation. Images aériennes et Spatiales, 89-3 et 4-3 : 17-30.
- POUGET (M.), 1989. — *Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection. Applications : exemple de la région de Tataouine (Tunisie)*. Paris, Orstom, coll. Études et Thèses, 317 p.
- POUGET (M.), MADEIRA (J.), LE FLOC'H (E.), KAMAL (S.), 1991. — Caractéristiques spectrales des surfaces sableuses de la région côtière nord-ouest de l'Égypte : applications aux données satellitaires Spot. In : *Deuxièmes journées de télédétection, caractérisation et suivi des milieux terrestres en régions arides et tropicales*, Paris, Orstom : 27-38.
- ROUSE (J.W.), HASS (R.H.), SCHELL (J.A.), DEERING (D.W.), 1973. — *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*. Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symp., NASA : 309-317.
- STORY (M.), CONGALTON (G.), 1986. — Accuracy assessment : a user's perspective. *Phot. Engin. and Rem. Sens.*, 52 (3) : 397-399.

Contribution de données multitemporelles Spot à l'identification des risques d'érosion

L'exemple des sols limoneux du nord de la France *

Renaud MATHIEU (1), Christine KING (2), Yves LE BISSONNAIS (3)

(1) Orstom-Chili, Casilla 53390, Santiago 1, Chili.

(2) BRGM-Département géophysique et imagerie géologique, Direction de la recherche, BP 6009, 45060 Orléans cedex 2, France.

(3) Inra-Service d'étude des sols et de la carte pédologique de France, Ardon, 45160 Olivet, France.

RÉSUMÉ

Dans les régions du nord de l'Europe, les sols limoneux, sensibles à la dégradation structurale, sont fréquemment exposés à une érosion par ruissellement concentré. Cette érosion génère des écoulements boueux, parfois très importants, qui occasionnent des dégâts substantiels aux infrastructures et aux équipements collectifs.

Une méthode est proposée afin, d'une part, de cartographier les surfaces potentiellement ruisselantes à partir d'images Spot et, d'autre part, d'évaluer à l'échelle de bassins versants élémentaires (BVE) la pertinence de ces bilans vis-à-vis de l'érosion effective.

Trois campagnes de terrain ont été effectuées pendant l'hiver 1991-1992 afin de mesurer un indice de dégradation structurale de surface sur une soixantaine de parcelles réparties sur un site test de 4 500 ha. La combinaison de ces indices avec l'information radiométrique extraite des images Spot (KJ 37-248 du 22/01, 04/03 et 14/05) permet de mettre en œuvre les classifications des sols nus selon leur susceptibilité à ruisseler. Au cours du même hiver, une cartographie exhaustive des signes d'érosion qui sert de base à l'évaluation des volumes de perte en terre a aussi été réalisée. Ces deux informations sont intégrées au niveau des BVE qui contrôlent le ruissellement potentiel maximal et sont issues du traitement d'un modèle numérique de terrain. Elles sont alors combinées afin d'étudier les relations qui peuvent exister entre les surfaces potentiellement ruisselantes et l'intensité de l'érosion observée.

À la lumière des résultats obtenus lors de ces premiers traitements, la méthode d'estimation des surfaces potentiellement ruisselantes par imagerie satellitaire s'est avérée tout à fait pertinente pour les milieux de sols limoneux. Les corrélations obtenues entre ces surfaces et l'érosion effective demeurent faibles ($R=0,48$). Néanmoins, comparées avec d'autres méthodes, elles confirment l'intérêt d'utiliser une source d'information satellitaire. Enfin, il apparaît d'une part que les faibles conditions d'érosivité durant la période de notre étude constituent un handicap pour valider notre méthode et d'autre part que le choix de la date optimale d'observation pose problème à partir du moment où elle peut varier selon la répartition des pluies au cours de l'hiver.

MOTS CLÉS : Télédétection — Spot — Érosion — Ruissellement — Modèles spatiaux.

* Note d'auteur : cet article a été soumis en version anglaise à la revue *Soil Technology*.

ABSTRACT

CONTRIBUTION OF MULTITEMPORAL SPOT DATA FOR EROSION HAZARD ASSESSMENT :
EXAMPLE OF LOAMY SOIL OF NORTHERN FRANCE

The loamy soils of the Northern European loess belt are quite sensitive to soil-structure degradation, and commonly are exposed to erosion caused by concentrated runoff, in particular during winter (AUZET, 1987 ; POESEN, 1989 ; BOARDMAN, 1990). Successive rainfall events, usually of low intensity, cause crusting at the scale of individual plots. This reduces the infiltration capacity of the soil and generates potential runoff from the soil. Notwithstanding the generally low relief, this potential runoff transforms itself in an actual runoff which progressively concentrates in downstream thalwegs and artificial depressions. This concentration lead to rills and gullies and may create mud flows that, when strong, can create major problems because of the damage they cause to infrastructures and other installations vital to Man (MONNIER et BOIFFIN, 1986 ; DE PLOEY, 1989).

In a such context, a previous evaluation of the erosion risk at a medium scale (1:50,000 — 1:250,000) and over large surfaces is indispensable to define a regional strategy of soil conservation. The spatial models which are now developed are generally limited by the volume of raw data that they request for expressing the spatial variability of the input parameters (KING et al., 1992). Remote sensing is a new tool for obtaining the spatial and temporal distributions of certain parameters of the earth's surface, covering large areas, at relatively low cost and with a cartographic precision compatible with map scales of 1:25,000 to 1:50,000 (HELLDEN et OLSSON, 1986 ; BOCCO et VALENZUELA, 1988). Since the spatial resolution now available does not allow direct observation of small-scale erosion phenomena, such as rills and gullies (EVANS, 1990), it is necessary to study indirect phenomena that are related to erosion, such as soil truncation or changes in vegetation cover (FRAZIER et CHENG, 1989 ; DE VLEGHER, 1990 ; KING et DELPONT, 1993). In the case of the loamy soil of Northern France, such criteria correspond to structural degradation of the soil surface called crusting (COURAULT, 1989 ; KING et al., 1989).

Our work had a double aim : i) using multitemporal Spot data for a test area, we mapped the variations in surface conditions or "states" that can range from rough ploughing to crusting, ii) at the level of a spatial unit of erosion (Elementary Watershed), the surfaces that potentially are affected by runoff were compared with estimated soil loss according to a model developed by AUZET et al. (1993). Our method proceeded in three steps : 1) extraction, 2) integration and 3) comparison of data (Fig. 2).

Two maps of bare-soil surfaces with three levels of structural degradation of soil surface (level 1 = no degradation — F0, level 2 = medium degradation — F0-F1 and F1, level 3 = strong degradation — F1-F2 and F2) were generated from the automatic interpretation of two satellite images (22 January and 4 March). At the same time as recording the two sets of Spot data, two series of about 70 plots were surveyed and the structural degradation states were described (Tab. I). For each of the reference plots and dates, the radiometric data from Spot images were combined with the structural degradation level measured in the field. In both cases a good relationship was found (Fig. 3). This relationship was used to carry out two statistically validated classifications according to the algorithm of maximum similarity (Tab. 3).

Each linear erosion shape (rills, gullies) observed on the test site was mapped in late March 1992 (Fig. 1) and dissected into several portions of homogeneous cross-section, for which the width and average depth were measured (AUZET et al., 1993). Those data were integrated in a Geographic Information System and used to work out a precise evaluation of soil loss during the winter of 1991-1992.

The elementary watersheds (EW) of the test site (Fig. 1) were determined automatically with a digital elevation model (DEM) that was generated from the interpolation of contours of an IGN topographical map at scale 1:25,000 (CHERY et al., 1992). The EW is defined as the impluvium of the last branch of a temporary drainage network (BOIFFIN et al., 1988). Because of the spatial discontinuity of runoff (impluvium) and incisions (drainage network) it is considered as the basic spatial unit to assess erosion risk (AUZET et al., 1990).

In order to compare surfaces with potential runoff with soil loss, the classifications and the map of erosion features were integrated at the scale of the EWs thanks to GIS technics. A new set of variables was generated (Tab. IV) and correlation analysis were performed to study the relationships that might exist between the proportion of degraded soil and the intensity of erosion, as well as the effect that the period of satellite-image acquisition has on such relationships.

This work has shown that the remote sensing method for mapping and estimating surfaces potentially affected by runoff, is quite reliable for areas underlain by loamy soil (Fig. 3, Tab. III). This method which does not rely on hypothesis or empirical relationships between the climate/soil/vegetation/slope parameters and soil loss should be quite easily applicable to other environments. However, the correlation between such surfaces and effective erosion

remains low ($R=0.48$), even though it confirms the interest of using satellite data rather than other sources of information (Tab. IV, V). It became clear that the conditions of low erodibility during the period of our study were a handicap to validate our method ; another problem is caused by the choice of the optimum observation period, which can vary as a result of winter rainfall events. In a second step other important criteria which act on the runoff concentration stage such as the shape of the EWs, the spatial organization of surface states within the EW or the potential incisable length (AUZET et al., 1993 ; DE ROO, 1993) should be introduced in the model. Indexes could be developed (eg. catchment compacity index) to weight the effect of the surfaces with potential runoff on soil loss at the level of the EWs.

KEYWORDS : Remote sensing — Spot — Erosion — Runoff — Spatial models.

INTRODUCTION

Depuis plusieurs décennies, les changements intervenus dans les systèmes de production agricole, comme la modification des rotations et des pratiques culturales, ont conduit à une multiplication des observations d'érosion hydrique des sols dans le nord de la France (LEFEVRE, 1958 ; DOUAY *et al.*, 1980 ; AUZET, 1987) ainsi que plus généralement sur l'ensemble de la ceinture loessique du nord-ouest de l'Europe (POESEN, 1989 ; BOARDMAN, 1990).

Les plateaux limoneux du nord-ouest de la France, caractérisés par des sols à faible stabilité structurale, sont soumis à une érosion fréquente par ruissellement concentré, principalement active pendant la période hivernale. La succession d'événements pluvieux généralement de faible intensité induit à l'échelle parcellaire l'apparition d'une croûte de battance qui, réduisant les capacités d'infiltration du sol, génère un volume de ruissellement potentiel. Malgré un relief modéré, les eaux accumulées à la surface des zones qui contribuent au ruissellement se concentrent alors progressivement en aval au sein du réseau de drainage naturel (talweg) et artificiel (traces d'engins agricoles) où de nombreuses incisions se développent (rigoles, ravines). Ce phénomène a été largement décrit par de nombreux auteurs (MONNIER et BOIFFIN, 1986 ; AUZET, 1987 ; DE PLOEY, 1989).

Dans ce contexte, certains travaux de recherche se sont orientés vers deux types d'études complémentaires. Le premier type aborde la compréhension des mécanismes à diverses échelles, de la « placette » expérimentale de quelques centaines de cm^2 sous pluie simulée ou de la parcelle cultivée (BOIFFIN, 1984 ; FARRES, 1987 ; LE BISSONNAIS *et al.*, 1989 ; OUVRY, 1989 ; EIMBERCK, 1989) jusqu'aux bassins versants (DUCK et McMANUS, 1990 ; AUZET *et al.*, 1993). Ces travaux s'intéressent principalement à l'identification des facteurs intervenant sur l'ensemble du processus érosif ainsi qu'à leur classification au sein d'un système hiérarchique. Encore à un stade beaucoup moins avancé, le second type s'appuie sur les connaissances déterministes acquises lors des étapes précédentes pour dé-

velopper des modèles spatiaux d'évaluation des risques d'érosion à des échelles moyennes (1/50 000-1/250 000) et sur des surfaces qui peuvent atteindre plusieurs milliers de km^2 (KING et LE BISSONNAIS, 1992).

La mise au point de tels modèles se heurte à la nécessité de disposer de données exprimant la variation spatiale des paramètres d'entrée qu'ils requièrent. La télédétection spatiale, au travers des satellites dédiés aux ressources terrestres tels que les séries Landsat TM ou Spot, est un outil de nouvelle génération qui permet d'obtenir la distribution spatiale de certains paramètres de la surface terrestre à un moment donné, sur une large zone et à un coût relativement faible (HELLDEN et OLSSON, 1986 ; BOCCO et VALENZUELA, 1988). Par ailleurs, la capacité de visite fréquente et régulière des sites étudiés par les plates-formes satellitaires facilite l'introduction de variables temporelles et les résolutions spatiales aujourd'hui utilisées peuvent atteindre une précision cartographique considérée comme compatible avec des échelles de 1/25 000-1/50 000. (KING *et al.*, 1989 ; CYR *et al.*, 1991). Néanmoins la gamme de résolution actuellement disponible ne permet pas encore d'envisager une cartographie directe des signes d'érosion tels que les rigoles ou même les ravines (EVANS, 1990). Ainsi, comme l'ont résumé KING (C.) et DELPONT (1993), il est nécessaire d'étudier des critères indirects révélant en surface la présence de phénomènes érosifs ou associés à l'érosion tels que par exemple la mise à nu des horizons sous-jacents des sols communément appelée « troncature » (FRAZIER et CHENG, 1989 ; DUBUCQ *et al.*, 1991) ou la modification des couvertures végétales (DE Vlieghe, 1990). Dans le cas des sols limoneux du Nord-Pas-de-Calais, ces critères indirects correspondent par exemple à la dégradation structurale de la surface des sols (croûte de battance). Cette dernière peut affecter des superficies très importantes qui favorisent le ruissellement puis l'érosion.

Dans l'étude qui suit, nous proposons sur une zone test :

— de cartographier les variations de la dégradation structurale de l'état de surface, du labour grossier à la battance, à partir de données multitemporelles Spot ;

— d'évaluer, au niveau d'une unité spatiale de fonctionnement de l'érosion, la pertinence du bilan des surfaces potentiellement ruisselantes issu de la télédétection vis-à-vis de l'érosion effective (perte en terre) selon le modèle développé par AUZET *et al.* (1993).

Pour cela, nous nous baserons sur certains travaux (KING C., 1985 ; KING C. *et al.*, 1989 ; COURAULT, 1989) qui ont montré l'existence d'un gradient de réflectance croissant dans le domaine proche infrarouge lié à la diminution de la rugosité de surface, elle-même en relation avec la fermeture de l'état de surface et la battance.

MATÉRIELS

Localisation et contexte agro-écologique de la zone d'étude

La zone d'étude, située dans le département du Pas-de-Calais, dans le nord de la France, appartient à un bassin sédimentaire dont le substrat est composé de roches calcaires recouvertes d'une épaisse couche de limons loessiques (jusqu'à 5-6 m). Le paysage géomorphologique se caractérise par une succession de plateaux sub-horizontaux à légèrement ondulés, accompagnés de pentes longues faibles à modérées (1 à 4 % sur les sommets, 8 à 10 % sur les versants), entrecoupés d'étroites vallées. L'horizon pédologique est principalement représenté par des luvisols (FAO) fortement sensibles à la dégradation structurale sous l'effet des pluies (sols limoneux à faible taux de matière organique) dont la hauteur annuelle oscille entre 750 et 1 100 mm. La plupart des événements pluvieux se concentrent de septembre à mars et sont généralement de faible intensité : temps de retour de deux ans d'une pluie de 20 mm/2 h et de 10 ans d'une pluie de 30 mm/2 h (PINGUET, 1985). Le paysage agricole de type *openfield* est dominé par la grande culture (blé, orge, pommes de terre, lin, pois).

Le site test étudié, Campagne-les-Hesdin (4 500 ha), est l'un des quatre sites pilotes sélectionnés par l'Inra comme représentatif de l'ensemble de la région. Il fait l'objet d'un suivi agronomique, pédologique et climatique depuis plusieurs années pour l'étude des phénomènes d'érosion (KING D. *et al.*, 1992). Une base de données géographiques détaillée décrit ce site sous le système ARC/ Info : parcellaire, morphologie, bassin versant élémentaire (BVE), carte géologique et pédologique au 1/10 000, occupation annuelle du sol.

Données satellitaires

Trois images du satellite Spot couvrant la frange côtière de la Manche, de Cayeux-sur-Mer à Boulogne (KJ 37-248), ont été acquises en janvier (22/01), mars (04/03) et mai (14/05) de l'année 1992. Chacune des images est disponible dans un format multispectral (3 bandes spectrales : vert, rouge, proche infrarouge) et digital. La capacité de

programmation de la plate-forme Spot a permis d'obtenir des scènes exemptes de couverture nuageuse malgré la période hivernale et bien réparties sur la période la plus active au regard des phénomènes d'érosion.

Données de terrain

COLLECTE DE DONNÉES DE RÉFÉRENCE POUR L'INTERPRÉTATION DES IMAGES

Simultanément à l'acquisition des images, trois séries de soixante-dix parcelles ont été enquêtées afin de fournir des références de terrain pour l'interprétation automatique des données satellitaires. Deux groupes de parcelles ont été distingués en fonction du taux de recouvrement des cultures estimé visuellement : taux supérieur à 30 % et taux inférieur à 30 %. Au-delà d'un seuil de 30 % de couverture végétale, le signal radiométrique enregistré par les systèmes de télédétection opérant dans les domaines visible et proche infrarouge n'est plus influencé de façon significative par le sol sous-jacent. En conséquence, les caractéristiques de la surface du sol ne peuvent être observées. Dans ce cas, le type de culture a été noté pour permettre la discrimination des zones en végétation. Inversement les parcelles du second groupe sont assimilées à des « sols nus », un indice de dégradation de l'état de surface a été relevé. Cet indice exprime le degré de fermeture de l'état de surface à un moment donné et concerne donc une dégradation structurale de la couche superficielle du sol. Cinq classes ont été considérées afin de couvrir l'ensemble des variations rencontrées sur le terrain (tabl. I). Elles décrivent les étapes successives de la dégradation structurale de l'état de surface du sol : l'état fragmentaire initial poreux qui fait suite à un travail du sol et où toutes les mottes et agrégats sont distincts (F0), la fermeture de la surface et la formation de croûtes structurales (F1) et enfin la formation de croûtes sédimentaires ou battance. Cette classification a été inspirée du système de classification conceptuel et descriptif de BOIFFIN (1984), basé sur une description de l'aspect de la surface du sol. Des problèmes de « subjectivité » liés à l'interprétation sont difficilement évitables. Le choix des parcelles enquêtées a d'abord été réalisé à partir de l'analyse des compositions colorées des images puis confirmé sur le terrain. Cette démarche a retenu des champs aisément identifiables sur les images, de grande taille (minimum d'environ 2 ha), en situation morphologique plane et caractéristiques d'un état de surface homogène. Chaque parcelle échantillonnée a fait l'objet de trois ou quatre notations ponctuelles de l'indice de dégradation de l'état de surface basées sur l'évaluation du degré de fermeture de la porosité, de la disparition des angles vifs sur les agrégats ainsi que de la proportion et de l'épaisseur des micro-croûtes sédimentaires.

En dernier lieu, il est nécessaire de souligner que la principale difficulté liée à ce travail de terrain résidait dans l'absolue nécessité de minimiser le laps de temps entre la

collecte des données sur le terrain et la prise de vue satellitaire afin d'éviter d'intégrer des modifications rapides pouvant intervenir à la surface des sols sous l'effet des pluies (changement de stade de dégradation) ou de travaux culturels (rupture de la croûte de battance). La difficulté matérielle de respecter strictement cette règle dans le cas de l'image de mai a, en partie, contribué à l'impossibilité de son interprétation.

TABLEAU I

Système de classification des états de dégradation structurale de la surface des sols (d'après BOIFFIN, 1984)

Classification system of soil surface structural degradation (After BOIFFIN, 1984)

Code	Description de l'état de surface
F0	état fragmentaire initial poreux, travail du sol récent
F0-F1	état intermédiaire
F1	apparition de croûtes structurales
F1-F2	état intermédiaire
F2	apparition de croûtes sédimentaires, battance

ESTIMATION DES PERTES EN TERRE

Les signes d'érosion linéaires (griffes, rigoles, ravines), observés exhaustivement sur le site test de Campagne-les-Hesdin, ont été cartographiés à la fin du mois de mars, juste avant les travaux culturels de printemps qui sont susceptibles d'effacer une grande partie des incisions. Dans la zone agro-écologique étudiée, la pratique courante du labour d'automne a pour conséquence la disparition de la plupart des manifestations d'érosion apparues au cours de l'hiver précédent. Ainsi la carte réalisée, représentative du réseau d'incision formé au cours de l'hiver 1992 (fig. 1), permet d'estimer des volumes annuels de perte en terre. Ces derniers seront utilisés comme élément de validation des bilans des surfaces potentiellement ruisselantes issus de la télédétection. Les pertes en terre provenant d'une érosion diffuse ou en nappe sont sur ce type de milieu considérées comme très faible au regard des pertes occasionnées par l'érosion par ruissellement concentré (MONNIER *et al.*, 1986 ; EIMBERCK, 1989). Contrairement à l'équation universelle des pertes en terre (USLE) de

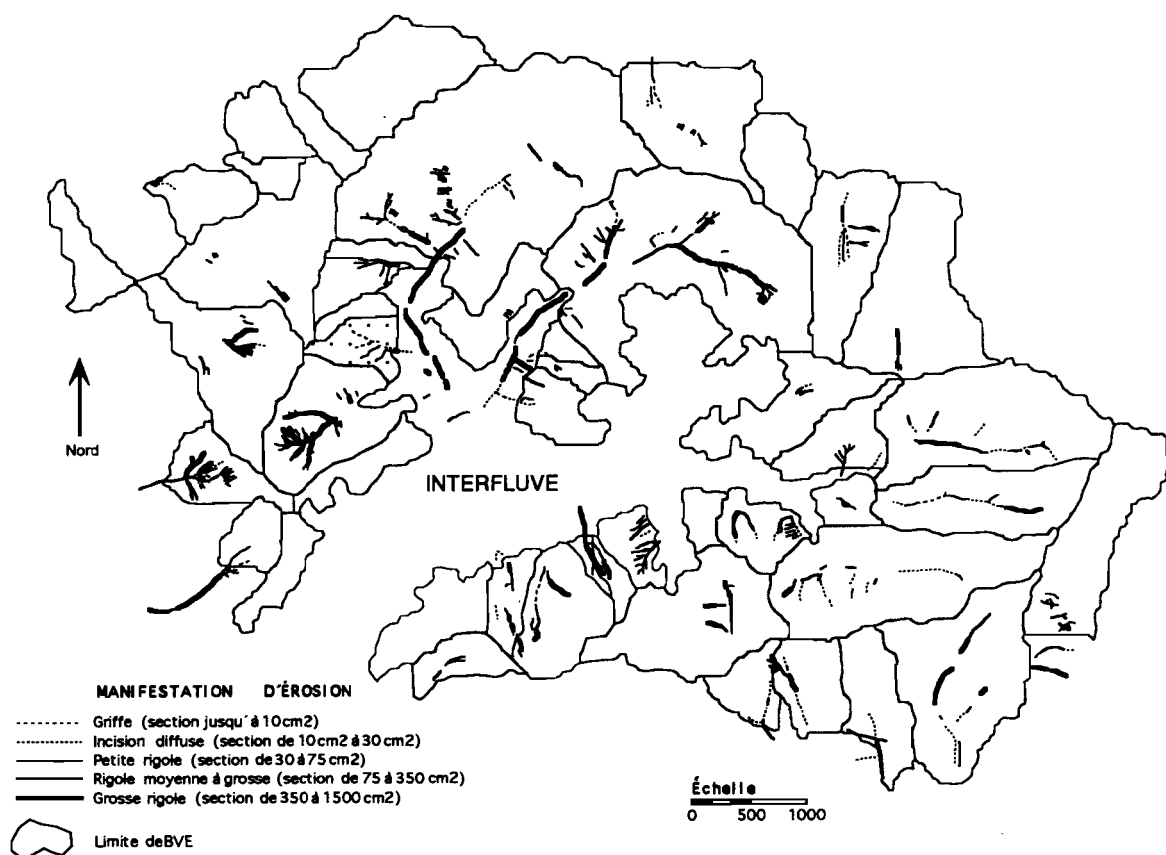


FIG. 1. — Carte des BVE et des signes d'érosion observés en mars 1992 (site expérimental de l'Inra — Campagne-les-Hesdin).
Map of the Ews and of the erosion traces observed in March 1992 (experimental site of Inra — Campagne-les-Hesdin).

WISCHMEIER et SCHMITH (1978), cette estimation découle directement des manifestations d'érosion observées sur le terrain et non d'un modèle empirique basé sur une pondération des principaux paramètres intervenant en amont du processus érosif.

Pour déterminer les volumes de perte en terre, les formes d'érosion linéaires observées ont été segmentées en plusieurs portions de section homogène pour lesquelles ont été relevées la largeur et la profondeur moyenne (AUZET *et al.*, 1993). Les parties graphique et sémantique (attribut) de chacun de ces éléments ont été numérisées et intégrées au sein du système ARC/Info. Les 3 paramètres longueur, largeur et profondeur qui caractérisent les tronçons d'érosion ont permis de dériver un nouvel attribut : le volume en creux de perte en terre. Les techniques de croisement automatique de données géoréférencées communes des systèmes d'information géographique (SIG) facilitent alors l'expression des volumes de pertes en fonction d'une ou plusieurs unités géographiques prédéfinies (bassins versant, communes).

Le MNT et la carte dérivée des bassins versant élémentaires (BVE)

Le BVE est défini comme un bassin hydrologique de premier ordre correspondant à l'impluvium de la branche ultime du réseau de drainage temporaire (BOIFFIN *et al.*, 1988). Il est caractérisé par un talweg d'une longueur mi-

nimum de 300 m, un exutoire unique, et est considéré comme l'unité spatiale de base de fonctionnement de l'érosion où sont observés ruissellement et incision.

Sur la zone test, la délimitation des BVE a été réalisée grâce au traitement automatique d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT). Un MNT est une représentation digitale et simplifiée du relief qui est reproduit par le codage des altitudes en chaque point d'une matrice. Le degré de fidélité des produits qui en sont dérivés dépend de la résolution spatiale de la grille d'échantillonnage et de la précision des altitudes qui sont ici respectivement de 50x50 m et de 1 m. Le MNT utilisé a été généré à partir de l'interpolation de courbes de niveau extraites d'une carte topographique IGN au 1/25 000 (CHERY *et al.*, 1992).

MÉTHODE

La méthode utilisée procède en trois étapes (1 - extraction, 2 - intégration, 3 - comparaison) agencées selon l'organigramme de la figure 2. À partir des données satellitaires sont extraites les surfaces de sols nus à différents états de dégradation et à partir du MNT sont extraits les BVE qui contrôlent le ruissellement potentiel maximal. Ces deux informations sont alors combinées et confrontées aux bilans d'incision et perte en terre intégrés sur ces mêmes bassins versants.

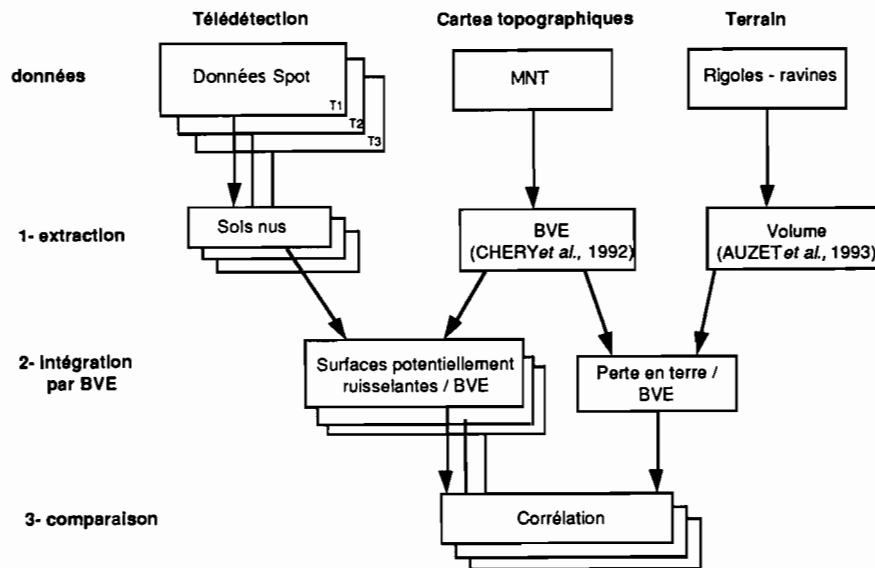


FIG. 2. — Méthodologie.
Methodology.

Extraction d'information des données Spot

L'exploitation des données satellitaires Spot a pour objectif de produire des cartes qui expriment à un moment

donné la distribution spatiale de différents niveaux de dégradation structurale de l'état de surface des sols.

La méthode utilisée combine deux techniques classiques de traitement d'image : les masques supervisés pour éli-

miner les surfaces en végétation ou pour annuler les surfaces urbanisées, et les techniques de classification multispectrale selon l'algorithme du maximum de vraisemblance pour classer les états de surface des sols nus. Ces dernières méthodes s'appuient sur des parcelles de référence dont les caractéristiques radiométriques permettent d'identifier et de sélectionner des populations de pixels similaires en termes statistiques. Le traitement de chacune des images a été réalisé individuellement.

SÉLECTION DES PARCELLES DE RÉFÉRENCE

Pour chacune des parcelles de référence, l'information radiométrique des images Spot a été mise en relation avec les variables relevées sur le terrain (indice de dégradation structurale, type de culture). La digitalisation à l'écran de chaque parcelle de référence sur la base de compositions fausse couleur a permis d'extraire les statistiques de base (moyenne et écart type) des valeurs radiométriques pour chacun des trois canaux originaux (vert, rouge, proche infrarouge) et deux nouveaux canaux composites : l'indice de végétation normalisé (NDVI) et l'indice de brillance (IB).

$$NDVI = 128 \left(\left[\frac{PIR - \text{rouge}}{PIR + \text{rouge}} \right] + 1 \right)$$

$$IB = \sqrt{\text{rouge}^2 + PIR^2}$$

MASQUES

Avant de réaliser les classifications, la population des sols nus de chaque image a été isolée. Les objets suivants ont été éliminés de l'étude grâce à l'utilisation des techniques de masquage basées sur des images binaires :

- les zones comprenant un taux de couverture végétal supérieur à 30 % : dans ce cas la composante du signal électromagnétique réfléchi provenant de la couverture pédologique est trop faible pour être caractérisée. Le masque a été généré à partir du seuillage du canal NDVI, choix du seuil résultant de l'analyse du comportement radiométrique de la végétation ;

- les affleurements calcaires sont généralement caractérisés par une forte réflectance dans les domaines spectraux étudiés et peuvent introduire des confusions avec les sols battants. Or, à l'inverse de ces dernières, les plages calcaires sont peu sensibles à la dégradation structurale et donc au ruissellement. L'approche multitemporelle a montré que l'évolution relative des réponses spectrales de ces deux surfaces au cours de l'hiver permet de les discriminer. Contrairement aux confusions observées en janvier, l'IB des plages calcaires en mars est beaucoup plus élevé que celui des zones battantes. Le canal IB de mars a été seuillé pour isoler les affleurements calcaires et le masque

résultant appliqué aux images de janvier et mai en raison du caractère permanent de ces unités dans le paysage ;

- les zones urbaines qui ont été délimitées à partir de l'interprétation visuelle d'une composition fausse couleur.

CLASSIFICATION MULTISPECTRALE

La méthode du maximum de vraisemblance a été utilisée pour classer les sols nus selon trois nouveaux groupes d'états de surface : (1) état de surface non dégradé, (2) état de surface à dégradation intermédiaire et (3) état de surface dégradé. L'information radiométrique extraite des parcelles de référence permet de décrire statistiquement les caractéristiques spectrales de chaque classe au moyen de son vecteur moyenne et de la matrice de covariance. L'algorithme du maximum de vraisemblance calcule alors pour chaque pixel sa probabilité d'appartenance à chaque classe et lui attribue la classe de plus forte probabilité.

Intégration par bassin versant élémentaire

Du fait de la disjonction spatiale des phénomènes de ruissellement (impluvium) et d'incision (réseau de collecte des eaux) au sein d'un BVE, il est nécessaire, pour confronter les données acquises par voie satellitaire aux manifestations d'érosion relevées sur le terrain, de se situer à l'échelle des BVE et donc d'intégrer chacun de ces paramètres à cette échelle. D'autre part, la généralisation des variables au niveau des BVE permet de limiter le nombre de données à manipuler ce qui est une étape fondamentale pour envisager la transposition de cette étude pilote à une échelle régionale. Cette intégration est facilitée par les techniques de traitement digital de données géoréférencées propres aux systèmes d'information géographique et décrites par KING (D.) *et al.* (1992).

VARIABLES

Quatre types de données ont été intégrés par BVE :

- les cartes de dégradation d'état de surface ;
- la carte des signes d'érosion (réseau linéaire de rigoles et ravines) ;
- la carte du parcellaire agricole afin de décrire le découpage de l'espace agraire ;
- la carte des zones urbanisées.

Deux types de nouvelles variables ont ainsi été créés (tabl. II) :

- les pourcentages de surface occupés par chaque classe d'état de surface au sein de chaque BVE et pour chacune des dates (variables 1, 2, 3, 2-3) ;
- une estimation des pertes en terre (m³/ha) par BVE calculée à partir de l'intégration de la carte des signes d'érosion (variables SL).

À ces variables principales, il faut ajouter le pourcentage de zone urbanisée ainsi que le nombre de champs et la taille moyenne du parcellaire par BVE.

TABLEAU II
Variables obtenues suite à l'intégration par BVE
Variables generated from the integration process by BVE

Nom Variables	Description	Indice de date		
1	sols non dégradés (%). F0	Janvier	Mars	Mai
2	sols en transition (%). F0-F1, F1	Janvier	Mars	/
3	sols dégradés (%). F1-F2, F2	Janvier	Mars	/
2-3	Σ des variables 2 et 3 (%). F0-F1 à F2	Janvier	Mars	/
SL	perte en terre (m ³ /ha)	hiver entier		

/ : données non disponibles

% : pourcentage de surface par BVE

SÉLECTION DE BVE

Dix-neuf BVE sur les trente-sept initialement disponibles ont été préalablement sélectionnés. Le processus de sélection a considéré pour chacun des BVE un ou plusieurs des critères suivants : une proportion de zone urbanisée maximum (70 %), une surface totale minimum (25 ha), une proportion minimum d'état de surface dégradé (25 %) et une taille minimum de la moyenne parcellaire (0,5 ha). Bien que le choix des seuils reste la principale difficulté d'une telle sélection, ils ont été déterminés afin d'éliminer les BVE les moins représentatifs qui ont une caractéristique susceptible de fortement modifier le processus érosif rencontré dans ces milieux. D'autre part, si seulement 50 % des BVE du nombre ont été conservés, ils représentent 80 % de la surface initialement étudiée.

Analyse des corrélations

Des analyses de corrélation ont été réalisées afin d'étudier les relations qui peuvent exister entre la proportion des surfaces dégradées (variables 2, 3 et 2-3) et l'intensité de l'érosion (variable SL). D'autre part, l'influence de la période d'acquisition des images satellitaire sur ces relations a pu être abordée grâce à l'approche multitemporelle. L'hypothèse de travail suppose qu'à l'échelle du BVE une augmentation de la proportion d'état de surface dégradé induit une augmentation des pertes en terre. On se situe donc dans le cadre d'un modèle probabiliste où, par exemple, l'organisation spatiale des états de surface au sein du BVE n'est pas prise en compte. Cette approche implique aussi que le niveau de fermeture de l'état de surface est le paramètre prépondérant déterminant l'intensité de l'érosion (AUZET *et al.*, 1993).

RÉSULTATS

Les résultats peuvent être divisés en trois catégories.

Comportement radiométrique de la dégradation structurale de surface

Les cinq classes d'état de surface décrites sur le terrain se répartissent en trois groupes de comportement radiométrique distinct. Le « scattergramme » proche infrarouge (PIR) — rouge des données de janvier (fig. 3) résume ce résultat. Ces trois groupes sont organisés le long du très classique « axe des sols » de la manière suivante :

- groupe 1 : état de surface non dégradé, F0 ;
- groupe 2 : état de surface à dégradation intermédiaire, F0-F1, F1 ;
- groupe 3 : état de surface dégradé, F1-F2, F2.

Extraction d'information des données Spot

En concordance avec le schéma précédent, une classification automatique, validée par des méthodes statistiques sur les trois canaux originaux de Spot (vert, rouge, PIR), a été réalisée pour chacune des dates de janvier et de mars où des résultats similaires ont été trouvés.

Cette analyse radiométrique confirme la relation existant entre la réflectance PIR enregistrée par Spot et le degré de fermeture de l'état de surface, lui-même lié à la rugosité du sol (KING, 1985 ; COURAULT, 1989).

Les confusions interclasses au sein des groupes ont montré clairement les limites existantes pour aller plus loin dans la discrimination radiométrique des états de surface étudiés selon la méthode qui a été suivie. Certains points peuvent être mis en avant pour expliquer cette limitation :

- l'interaction d'autres paramètres édaphiques sur le signal radiométrique enregistré par Spot tels que l'humidité, la texture ou le taux de matière organique, etc.
- l'utilisation d'indices de dégradation structurale descriptifs qui peut conduire à une certaine subjectivité ;
- la difficulté de totalement intégrer les variations intraparcelle de l'état de surface dans le système de collecte des références de terrain ; un relevé sur le terrain est assimilé à une valeur moyenne de réflectance d'un large groupe de pixels.

Classification des états de surface des sols nus

Malgré des confusions certaines aux bornes de chaque groupe défini, le comportement radiométrique des sols nus sert de base à la mise en œuvre d'une classification multispectrale sur l'ensemble du site test. Les performances de cette classification sont très bonnes pour les données de janvier 1992 (tabl. III). Celles-ci sont évaluées principalement par rapport à la précision du producteur et à la précision de l'utilisateur qui correspondent respectivement à la proportion de pixels bien classés dans une classe par rapport au nombre de pixels identifiés sur le terrain dans

cette classe et à la proportion de pixels bien classés dans une classe par rapport à l'ensemble des pixels classés dans cette classe.

Ces performances sont très similaires pour les données acquises en mars : classe 1, 98,4 % de précision producteur et 82,2 % de précision utilisateur ; classe 2, 79,9 % et 88,4 % et classe 3, 88,5 % et 97,2 %. En revanche au mois de mai, les sols nus sont pratiquement tous au même stade de semis de printemps, avec très peu de parcelle encroûtée. D'autre part une proportion très importante de la surface étudiée est sous végétation. Aucune cartographie des stades de dégradation n'a donc pu être tentée.

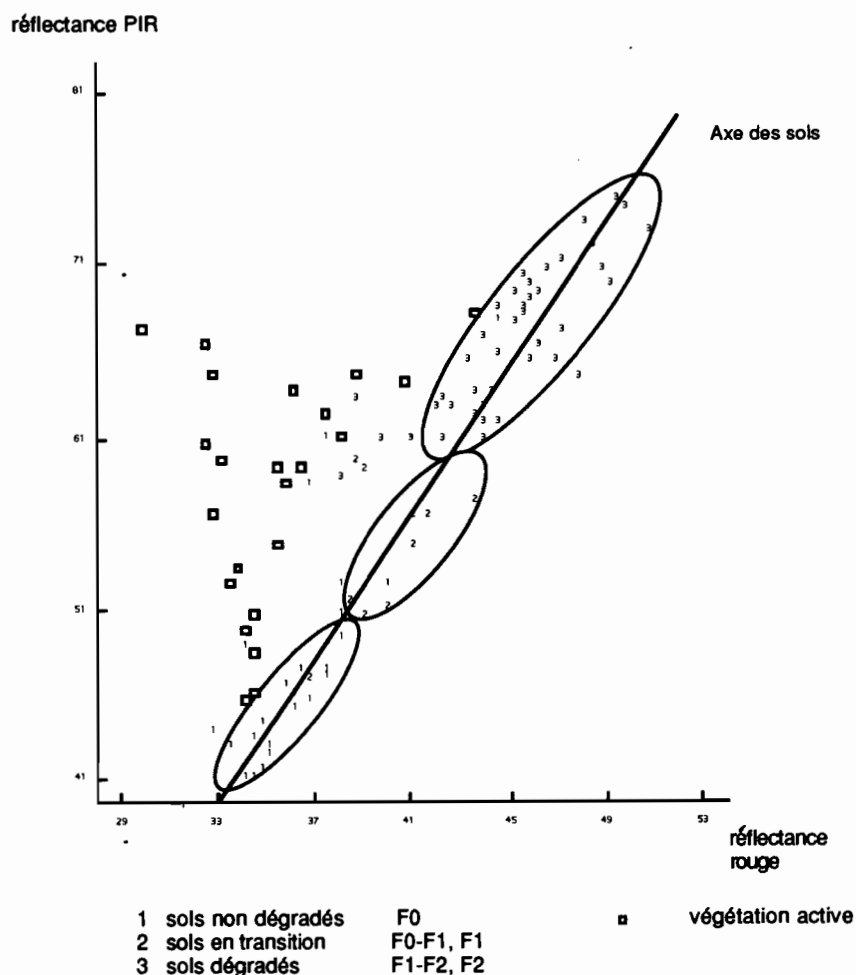


FIG. 3. — Scattergramme PIR sur rouge : comportement radiométrique des différents états de dégradation de l'état de surface du sol (données de janvier).

Scattergram NIR versus red reflectance : radiometric behaviour of the different soil surface degradation levels (January date).

TABLEAU III

Performances de la classification de l'image Spot de janvier (22/01/1992) : matrice de confusion
Quality of the classification of the January Spot image (22/01/1992) : confusion matrix

Classification Image	Classe 1	Classe 2	Classe 3	PP (%)	Total Moyenne*
Classification Terrain					
Classe 1	896	287	0	75,7	1183
Classe 2	139	680	100	74,0	919
Classe 3	44	17	667	91,2	728
PU (%)	83,0	69,1	87,0	/	79,7*
Total - Moyenne*	1079	984	767	80,3*	2830

Classe 1 F0
 Classe 2 F0-F1, F1
 Classe 3 F1-F2, F2

PU Précision Utilisateur
 PP Précision Producteur

Cette analyse des classifications montre comment s'établit un bilan cartographique des sols nus à trois stades de dégradation en janvier (Pl. 1) comme en mars. Ce bilan sert de support à l'intégration par bassin versant.

Corrélation état de surface – pertes en terre

Pour rechercher des corrélations significatives entre les faits observés et les indices détectés par voie satellitaire, nous avons testé plusieurs hypothèses :

1 — Seules les surfaces dégradées (variable 3) influent sur le ruissellement de chaque BVE ;

2 — Les surfaces dégradées (variable 3) et les surfaces dites de transition (variable 2) contribuent simultanément au ruissellement (variable 2-3).

Les corrélations entre ces différentes variables et les pertes en terre (SL) sont faites d'une part séparément à chaque date d'observation, puis en recherchant un effet cumulé des surfaces contributives de mars sur janvier. La variable correspondante Σ intègre les surfaces de la classe 2-3 de janvier et les nouvelles surfaces apparues en classe 2 ou 3 entre janvier et mars. Cette variable est obtenue par une combinaison logique des deux images classées. On note une augmentation significative des zones contribuant au ruissellement avec en moyenne 23 % de surface en plus et une variation totale selon les BVE de 0 à 49 %.

Une seule relation significative a été identifiée entre l'importance des surfaces potentiellement ruisselantes et les pertes en terre (tabl. IV). Elle concerne les surfaces dégradées avant la fin du mois de janvier. Il apparaît que les surfaces observées dégradées en mars ne sont pas liées au volume de perte en terre. D'autre part, en dépit de l'augmentation des surfaces contributives au ruissellement entre janvier et mars, Σ -SL n'a donné aucun résultat probant ($R = 0,39$). Ce résultat semble confirmer l'influence prépondérante des surfaces dégradées avant janvier sur le développement des incisions.

TABLEAU IV

Coefficients de corrélation (R) entre les surfaces battantes et les pertes en terre

Correlation coefficients (R) between crusting areas and soil loss

Variable	2 (F0-F1, F1)	3 (F1-F2, F2)	2-3 (F0-F1 à F2)
Date			
Janvier	0,29 *	0,4 *	0,48 **
Mars	0,29 *	-0,06 *	-0,39 *
Σ	/	/	0,39 *

(*) Non significatif (**) $P < 0,05$

DISCUSSION

À la lumière des résultats obtenus lors de cette expérimentation, trois questions doivent être discutées et approfondies :

1 — Quelle est la qualité de l'estimation des surfaces potentiellement ruisselantes (SPR) par voie satellitaire ?

2 — Cette estimation est-elle suffisante pour être utilisée comme un indicateur prédictif de l'érosion compte tenu des conditions climatiques de l'hiver 1991-1992 ?

3 — Quelles sont les implications d'une érosion « conjoncturelle » sur le choix des données satellitaires pertinentes ?

La méthode d'estimation des SPR par imagerie satellitaire s'est appuyée sur les relations entre la rugosité des sols et la réflectance visible — PIR (COURAULT, 1989). Elle s'est avérée tout à fait pertinente pour les milieux de sols limoneux (fig. 3 et tabl. III). Avec cette approche s'ouvrent ainsi les possibilités d'une acquisition de paramètres spatialisés de même nature que ceux mis en relation avec l'érosion par AUZET *et al.* (1993) : les états de surface. Les travaux de recherche actuels s'appuient sur ces relations pour développer une approche prédictive de

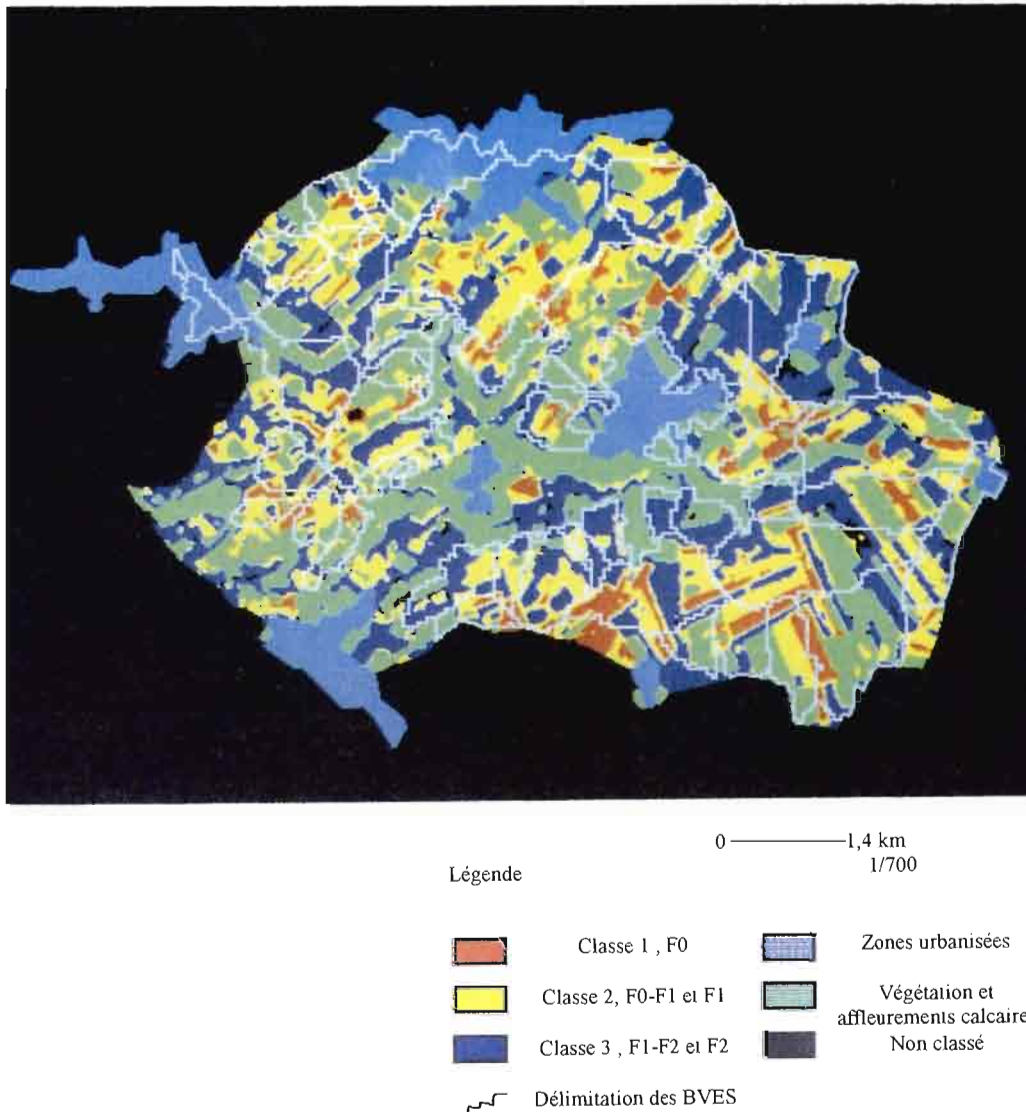


PLANCHE 1. — Classification de l'image Spot de janvier (22/01/92) sur le site test de Campagne-les-Hesdin avec incrustation des Bassins versants Élémentaires.

Classification of the January Spot image (22/01/92) focusing on the INRA's test site of Campagne-les-Hesdin with incrustation of the elementary watersheds.

l'érosion (KING D. et LE BISSENNAIS, 1992). Dans cette perspective, la question est de savoir si les estimations des SPR fournies par télédétection de façon spatialisée peuvent s'utiliser comme des indicateurs prédictifs.

Pour valider cette hypothèse, nous avons proposé dans cette étude une méthode qui s'appuie sur les résultats de mesure de l'érosion effective. Les résultats obtenus sont à restituer dans le cadre des conditions d'établissement des relations entre surfaces contributives et terres exportées (AUZET *et al.*, 1993). Celles-ci ont été établies à partir de données collectées sur vingt bassins versants pendant

trois hivers successifs (soixante points). Elles ont donné un coefficient de corrélation de 0,73. Parallèlement, les auteurs montrent que la variabilité interannuelle est forte puisque, pour chaque hiver pris individuellement, les résultats varient de 0,37 à 0,82. D'autre part, on constate que les corrélations s'améliorent avec l'augmentation de l'intensité érosive annuelle moyenne caractérisée par une augmentation des pertes en terre. Ainsi l'hiver 1990-1991 ($R^2 = 0,82$) est caractérisé par une production de sédiments comprise entre 0 et 12 m³/ha alors que l'année 1989-1990 ($R^2 = 0,37$) n'enregistre qu'une variation de 0 à 3 m³/ha.

Dans notre cas, la variation des pertes en terre observée varie de 0 à 1,8 m³/ha, ce qui est encore inférieur aux situations analysées ci-dessus. Les conditions d'érosivité très faibles durant notre étude constituent donc un handicap pour le type de validation que nous avons préconisé et peuvent expliquer en bonne part la faiblesse des corrélations obtenues. En revanche, ces résultats sont du même ordre que ceux obtenus sur le même site par LE BISSONNAIS et CHERY (*à paraître*) selon une autre méthode. L'estimation des surfaces potentiellement ruisselantes est obtenue par la combinaison spatiale de deux informations collectées systématiquement sur le secteur de Campagnes-Hesdin : la texture des sols dérivée d'une carte pédologique au 1/10 000 et l'occupation du sol de l'hiver considéré selon le parcellaire cadastral. Les textures sont

reclassées en fonction de leur sensibilité à la dégradation structurale et l'occupation du sol est décrite selon quatre groupes de cultures organisés en fonction de leur susceptibilité à favoriser ou à limiter la battance : cultures d'hiver, prairies, cultures de printemps précoces et tardives. Le croisement de ces deux couches de données selon un système de poids permet alors d'obtenir par BVE des pourcentages de SPR. La corrélation entre ces estimations et l'érosion effective est comparée à nos résultats (tabl. V). L'estimation par voie satellitaire obtenue le même hiver sur le même site semble mieux identifier la part des surfaces contributives du ruissellement puisque l'on observe une corrélation plus élevée dans ce dernier cas. Cela confirme l'intérêt d'user de cette source d'informations spatialisées.

TABLEAU V
Comparaison de deux méthodes d'évaluation spatiale
des risques d'érosion
Comparison of two methods of spatial assessment of erosion risk

Méthode	Combinaison spatiale « texture/occupation du sol »			États de surface images de Spot
	1989-1990	1990-1991	1991-1992	1991-1992
Hiver				
R	0,37	0,45	0,30	0,48

R : coefficient de corrélation calculé entre les Surfaces Potentiellement Ruisselantes (SPR) et les pertes en terre par BVE.

Notre approche multitemporelle visait à extraire un bilan cumulé des surfaces potentiellement ruisselantes au cours des saisons sensibles (hiver et printemps). Les résultats ont montré que seule l'image de janvier est pertinente (tabl. IV). Ceci souligne les difficultés d'une approche multitemporelle, lorsque la définition de la date optimale d'observation n'est pas connue *a priori* et surtout peut varier selon les conditions pluviométriques de l'hiver. Dans notre étude, l'année 1991-1992 est caractérisée par une forte concentration des pluies d'automne. Sur une moyenne de 380 mm de pluies d'octobre à février, 78 % sont tombés en automne, dont un pic de 54 % pour le seul mois de novembre. Les pluies se sont donc concentrées avant le 22 janvier, date de prise de vue de la première image. Seules les parcelles ensemencées se sont encroûtées dès les premières pluies d'automne et ont généré un fort ruissellement. Les incisions n'ayant été observées que dans les parcelles de semis les plus précoces, on peut penser qu'une image acquise antérieurement aurait permis de cerner avec une plus grande exactitude l'enveloppe des SPR. On se heurte alors à une autre difficulté technique générée par les couverts nuageux qui interdisent toute ac-

quisition d'image dans ces domaines de longueur d'onde. La faisabilité d'une détection précoce des SPR est alors à tenter grâce aux techniques radar (SOLBERG, 1992) qui mobilisent actuellement l'attention de plusieurs équipes.

Les SPR par BVE sont des mesures directes et objectives qui intègrent l'ensemble des paramètres déterminant le déclenchement de la première étape du processus érosif : la dégradation structurale de la surface du sol. Dans un deuxième temps, l'affinement des corrélations SPR — la perte en terre pourrait être envisagée par la prise en compte d'autres critères qui agissent sur l'écoulement et la concentration érosive du ruissellement tels que l'organisation spatiale intra-BVE des états de surface, la morphologie des BVE ou la longueur du réseau d'incision potentiel (AUZET *et al.*, 1993 ; DE ROO, 1993). Dans le milieu étudié, la pente n'influence pas significativement l'intensité de l'érosion. L'intégration de ces nouveaux critères pourrait être réalisée grâce au développement d'indices à l'échelle des BVE (indice de compacité des BVE, indice de contiguïté des états de surface, indice de longueur du réseau de drainage) qui seraient utilisés pour pondérer l'effet des SPR sur les pertes en terre.

CONCLUSION

Le premier intérêt de cette méthode est de proposer un moyen d'estimation fiable des surfaces potentiellement ruisselantes à une date donnée et de pouvoir en établir un bilan cartographique sur de vastes régions. Cette méthode devrait s'avérer relativement facile à transposer à d'autres milieux car elle n'est pas affectée par des hypothèses ou des relations empiriques entre le complexe climat/sol/végétation/pente et les pertes en terre. L'information fournie, les surfaces potentiellement ruisselantes, est une composante peu ou pas biaisée d'un modèle d'érosion qui, lui, dépendra de chaque milieu et contexte climatique.

Les limites de cette étude se sont ici heurtées aux conditions d'érosivité faible de cet hiver. Elles n'ont pas per-

mis de transposer les estimations réalisées par bassin versant en indicateur prédictif de l'érosion, mais les principes des corrélations à établir entre érosion effective et indicateurs satellitaires restent une voie incontournable pour envisager de mettre en place des méthodes prédictives de l'érosion sur des bases régionales.

REMERCIEMENTS

Cet article, publication scientifique N93029 du BRGM, a été réalisé dans le cadre d'un projet de recherche financée par le Programme national de télédétection spatiale (PNTS), le BRGM et l'Inra. Les auteurs souhaitent remercier le professeur J.C. Taylor, directeur du département de télédétection de Silsoe College (UK) pour sa participation à ce travail.

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

BIBLIOGRAPHIE

- AUZET (A. V.), 1987. — L'érosion des sols cultivés en France sous l'action du ruissellement. *Annales de Géographie*, 537 : 529-556.
- AUZET (A. V.), BOIFFIN (J.), PAPY (F.), LUDWIG (B.), MAUCORPS (J.), 1993. — Rill erosion as a fonction of the characteristics of cultivated catchments in the north of France. *CATENA*, 20 : 41-62.
- BOARDMAN (J.), 1990. — « Soil erosion on the South Downs : a review ». In : Boardman (J.), Foster (I. D. L.) et Dearing (J. A.), éd. : *Soil Erosion on Agricultural Land*, Chichester, John Wiley and Sons : 87-106.
- BOCCO (G.), VALENZUELA (C. R.), 1988. — Integration of GIS and image processing in soil erosion studies using ILWIS. *ITC Journal*, 14 : 309-313.
- BOIFFIN (J.), 1984. — *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*. Thèse doct. ingénieur, Paris, Ina-PG, 320 p.
- BOIFFIN (J.), PAPY (F.), EIMBERCK (M.), 1988. — Influence des systèmes de culture et risques d'érosion dans le Pays de Caux. *Agronomie*, 8 (8) : 663-673.
- CHERY (P.), LE BISSONNAIS (Y.), KING (D.), DAROUSSIN (J.), 1992. — Définition et délimitation des Unités Spatiales de Fonctionnement (USF) du ruissellement et de l'érosion. In : Buche (P.), King (D.), Lardon (S.), éd. : *Gestion de l'Espace Rural et Système d'Information Géographique*, Paris, Inra : 133-147.
- COURAULT (D.), 1989. — *Étude de la dégradation des états de surface du sol par télédétection. Analyses spectrales, spatiales et diacroniques*. Thèse doct. université Paris-VI, 214 p.
- CYR (L.), PERRAS (S.), BONN (F.), PESANT (A.), WILLM (T.), 1991. — « Évaluation de la couverture du sol en milieu agricole par mesure in-situ et images multitemporelles pour la modélisation de l'érosion hydrique ». In : *5th International Colloque Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Courchevel, France : 659-662.
- DE PLOEY (J.), 1989. — Erosional systems and perspectives for erosion control in European loess areas. *Soil Technology Series*, 1 : 93-102.
- DE ROO (H. B.), 1993. — Validation of the ANSWERS catchment model for runoff and soil erosion simulation in catchments in the Netherlands and United Kingdom. *Hydrogis* 93, I2AHS n° 211 : 465-474.
- DE Vlieghe (B. M.), 1990. — « Environmental degradation mapping in Euboia (Central Greece) using multisource satellite data ». In : *10th EARSel Symposium « New European Systems, sensors and application »*, Toulouse, France : 297-305.
- DOUAY (F.), MASSON (F.), PELLETIER (J. L.), 1980. — *Érosion des terres agricoles du Nord - Pas-de-Calais*. Report SRAE - université de Lille, 40 p.
- DUBUCQ (M.), DARTEYRE (J. P.), REVEL (J. C.), 1991. — Identification et cartographie de surface de l'érosion et de la battance des sols du Lauragais à partir de croisement de données Spot et d'un MNT. *ITC Journal*, 2 : 70-76.
- DUCK (R. W.), McMANUS (J.), 1990. — Relationships between catchment characteristics, land use and sediment yield in the Midland Valley of Scotland. In : Boardman (J.), Foster (I. D. L.), Dearing (J. A.), éd. : *Soil Erosion on Agricultural Land*, Chichester, John Wiley and Sons : 87-106.
- EIMBERCK (M.), 1989. — Facteurs d'érodabilité des sols limonneux : réflexions à partir du cas du Pays de Caux. *Cah. Orstom, série Pédol.*, vol. XXV, n°s 1-2 : 81-94.
- EVANS (R.), 1990. — « Discrimination and monitoring of soils ». In : Steven (M. D.), Clark (J. A.), éd. : *Applications of Remote Sensing in Agriculture*, Butterworths : 75-95.
- FARRES (P. J.), 1987. — The dynamics of rainsplash erosion and the role of soil aggregate stability. *CATENA*, 14 : 119-130.
- FRAZIER (B. E.), CHENG (Y.), 1989. — Remote sensing of soils in the Eastern Palouse region with Landsat Thematic Mapper. *Remote Sensing of Environment*, 28 : 317-325.
- HELLDEN (U.), OLSSON (L.), 1986. — « Soil erosion, fuelwood and land use assessment in Ethiopia, an approach to envi-

- ronmental monitoring and planning ». In : *20th Symposium International of Remote Sensing of Environment ERIM* : 220-234.
- KING (C.), 1985. — *Étude des sols et des formations superficielles par télédétection*. Thèse de doct. ingénieur, Paris, Ina-PG. Document BRGM n° 96, 174 p.
- KING (C.), MAUCORPS (J.), AUMONIER (F.), RENAUX (B.), LENOIRE (N.), 1989. — Détection d'indices d'érosion par Spot dans les sols limoneux du Nord - Pas-de-Calais, une étude multidate. *Bulletin SFPT*, 14 : 10-13.
- KING (C.), DELPONT (G.), 1993. — Spatial assessment of erosion : contribution of remote sensing, a review. *Remote Sensing Review*, vol. 7 : 223-232.
- KING (D.), LE BISSEONNAIS (Y.), 1992. — Rôle des sols et pratiques culturales dans l'infiltration et l'écoulement des eaux : exemple du ruissellement et de l'érosion sur les plateaux limoneux du nord de l'Europe. *C.R. Acad. Agriculture* : 91-105.
- KING (D.), LE BISSEONNAIS (Y.), HARDY (R.), EIMBERCK (M.), MAUCORPS (J.), KING (C.), 1992. — Spatialisation régionale de l'évaluation des risques de ruissellement. *Revue des Sciences de l'Information Géographique et de l'Analyse Spatiale*, 2 (2) : 229-246.
- LE BISSEONNAIS (Y.), BRUAND (A.), JAMAGNE (M.), 1989. — Laboratory experimental study of soil crusting : relation between aggregate breakdown mechanisms and crust structure. *CATENA*, 16 : 377-392.
- LEFÈVRE (P.), 1958. — Quelques phénomènes d'érosion en Picardie. *Annales Agronomiques*, 1 : 91-129.
- MONNIER (G.), BOIFFIN (J.), 1986. — Effects of the agricultural use of soils on water erosion : the case of cropping systems in Western Europe. In : Chisci (G.), Morgan (R. P. C.), éd. : *Soil Erosion in European Community : Impact of Changing Agriculture*, Balkema, Boston, Rotterdam : 210-217.
- MONNIER (G.), BOIFFIN (J.), PAPY (F.) 1986. — Réflexions sur l'érosion hydrique en conditions climatiques et topographiques modérées. Cas de systèmes de grande culture de l'Europe de l'Ouest. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, vol. XXII, n° 2 : 123-131.
- OUVRY (J. F.), 1989. — Effets des techniques culturales sur la susceptibilité des terrains à l'érosion par ruissellement concentré : expérience du Pays de Caux (France). *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, vol. XXV, n° 1-2 : 157-169.
- PINGUET (A.), 1985 — *Aperçu sur la pluviométrie en pays de Caux*. Doc. Interne, Bioclimatologie, Inra, Avignon.
- POESEN (J. W. A.), 1989. — Conditions for gully formation in the Belgian Loam Belt and some ways to control them. *Soil Technology Series*, 1 : 39-52.
- SOLBERG (R.), 1992. — « Monitoring soil erosion in agricultural fields by ERS-1 SAR ». In : *12th Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Houston, USA : 1356-1359.
- WISCHMEIER (W. H.), SCHMITH (D. D.), 1978. — « A universal soil loss equation to guide conservation farm planning ». In : *Trans. 7th Int. Congr. Soil Sci.* V1 : 418-425.

Spatialisation d'une étude pédologique localisée sous forêt tropicale dense à l'aide d'une image *Thematic Mapper* *

Frédérique SEYLER (1), Boris VOLKOFF (2)

(1) Orstom, BP 5045 34032 Montpellier cedex, France.

(2) Orstom, 32, av. Henri-Varagnat, 93140 Bondy, France.

RÉSUMÉ

Une méthodologie de cartographie des sols sous forêt est mise au point au Sud-Cameroun. Elle comporte quatre étapes : (1) la caractérisation de l'organisation pédologique d'un site représentatif correspondant à une unité de paysage ; (2) la recherche de relations entre organisation profonde et caractères de surface ; (3) la reconnaissance de ces caractères de surface sur une image de télédétection ; (4) la spatialisation. Un exemple est proposé dans le sud-est du Cameroun. Un secteur de 2 500 hectares est analysé sur le terrain à l'échelle du 1/25 000. Le traitement numérique d'une image Landsat Thematic Mapper a permis de distinguer les ensembles forestiers qui sont en relation avec l'organisation du sol. Une spatialisation au 1/360 000 est proposée. Ses avantages et ses limites sont discutés.

MOTS CLÉS : Cartographie — Sols — Télédétection — Forêt — Sud-Est-Cameroun.

ABSTRACT

SPATIALIZATION OF A LOCAL SOIL STUDY UNDER DENSE TROPICAL FOREST USING A LANDSAT THEMATIC MAPPER IMAGE

A method of soil mapping under forested cover is studied in South Cameroon. Four steps are proposed : (1) The study of the three dimensional organization of a sample area. (2) The enhancement of relationship between deep organization and surface features. (3) The recognition of the surface features on a remote sensing image. (4) Mapping. A case study is proposed in South East Cameroon. A 2,500 ha wide area is described at the scale of 1/25,000. Correlated forest structures are recognized on a processed Landsat TM image. A 1/360,000 mapping is discussed.

KEYWORDS : Mapping — Soils — Remote sensing — Forest — South East Cameroon.

INTRODUCTION

Les sols et formations superficielles sous forêt tropicale sud-camerounaise sont mal connus. Les raisons de cette méconnaissance sont liées à la présence même de la forêt. La forêt gêne les accès, empêche toute vision spatiale

quand on est sur le terrain et rend difficile l'exploitation des couvertures de photographies aériennes et d'images satellite.

Notre objectif est de trouver une méthode de cartographie des sols sous forêt à l'aide de la télédétection.

* Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un programme de recherches conjoint Orstom-ministère de la Recherche scientifique du Cameroun.

La télédétection est largement utilisée en géologie. Les images de télédétection sont en général très riches d'informations sur la structure géologique du substratum, en particulier dans les zones où les affleurements sont rares. Les caractères de surface tels que la forme et la direction du réseau hydrographique, certaines variations de végétation ou des accidents topographiques révèlent des changements de lithologie ou des directions de fracture (BESNUS *et al.*, 1992 ; DEROUIN *et al.*, 1992 ; DUMONT, 1986 ; LOWMAN *et al.*, 1992). Les géologues utilisent couramment ces méthodes d'interprétation structurale des images sans que les caractères de surface « révélant » ces structures profondes soient clairement identifiés et répertoriés.

La télédétection est également utilisée en pédologie. Dans certains cas, les caractères intrinsèques de la référence des sols peuvent être directement pris en compte (ESCADAFAL, 1989 ; MADEIRA NETTO, 1991). La plupart du temps la télédétection est basée sur l'interprétation des unités de paysage. Dans chaque unité de paysage, l'individualisation des formations superficielles – les manteaux d'altération des roches et les sols associés – est en relation étroite avec la topographie (BOULET, 1976 ; CHAUVEL, 1976 ; FRITSCH, 1984).

La végétation révèle également un certain nombre de caractéristiques du sol. Les relations de la végétation avec le sol, si elles apparaissent clairement sous végétation de

savane, sont plus difficiles à mettre en évidence en milieu tropical forestier. Peu d'études systématiques sont consacrées à la mise en évidence de ces relations (LESCURE *et al.*, 1985). Quelques exemples montrent que les relations peuvent être établies (LETQUZEY, 1985 ; LUCAS, 1989).

La démarche adoptée ici comprend les étapes suivantes :

- la caractérisation de l'organisation pédologique d'un site test, une unité paysagique représentative d'une région forestière ;
- la recherche sur ce site des relations existantes entre l'organisation pédologique, la topographie et la structure du couvert forestier ;
- la reconnaissance sur des images de télédétection des caractères de surface mis en relation avec l'organisation des sols ;
- la spatialisation de ces caractères.

Nous prendrons l'exemple d'une unité paysagique située dans le bassin versant amont de la Boumba, dans le sud-est du Cameroun (fig. 1) pour exposer les premiers résultats de notre travail. Après une localisation géographique rapide, nous exposerons les résultats de l'étude de terrain, qui concerne un bassin de 2 500 hectares, décrit à l'échelle 1/25 000. Ensuite, une extrapolation à l'échelle du 1/360 000 sera proposée à l'aide d'une image Landsat *Thematic Mapper*. Une discussion nous permettra d'évaluer les limites et les avantages de la méthode proposée.

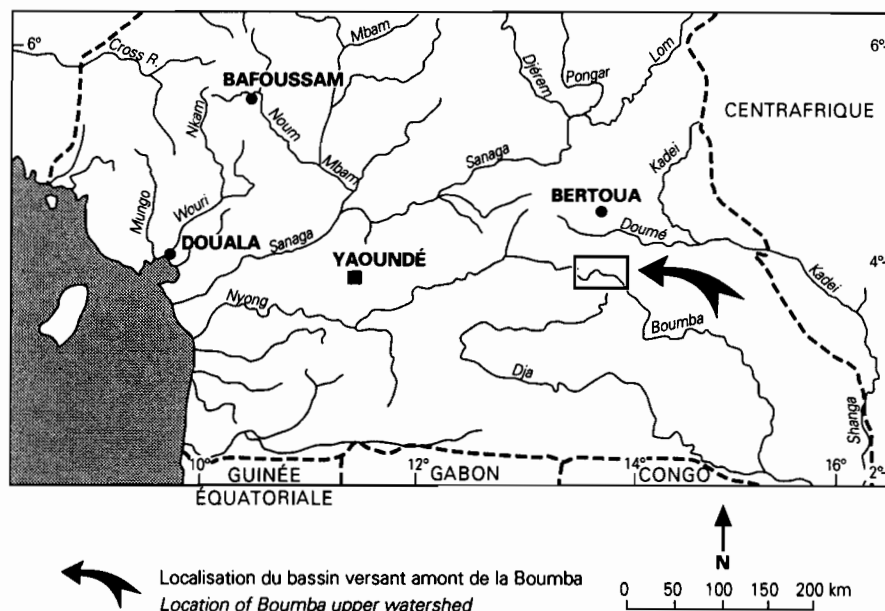


FIG. 1. — Carte de situation du bassin versant amont de la Boumba.
Location of Boumba upper watershed.

LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE DU BASSIN AMONT DE LA BOUMBA

La zone forestière du Sud-Cameroun se situe entre 2° et 4° de latitude nord et 10° et 16° de longitude est. Elle est caractérisée par un climat équatorial à deux saisons sèches. La pluviosité en moyenne annuelle est de 1 600-1 800 mm. Le maximum des pluies dans la région étudiée advient au mois d'octobre au cours de la grande saison des pluies (septembre à novembre). Une deuxième saison des pluies ou petite saison des pluies se situe entre mars-avril et juin. Au total on ne trouve pas plus de trois ou quatre mois à pluviosité inférieure à 50 mm.

La zone forestière se divise en deux grands domaines biogéographiques. Un domaine à forêt sempervirente sur la façade atlantique et un domaine à forêt semi-décidue de l'intérieur. Le bassin versant amont de la Boumba se trouve dans le domaine de la forêt semi-décidue.

La Boumba est un affluent de la Ngoko et appartient au bassin du fleuve Congo. Son bassin versant amont se situe au centre du quadrilatère formé par les villes d'Abong Mbang, Batouri, Yokadouma et Lomié. À l'est, une zone déprimée et marécageuse marque le domaine incertain de partage des eaux entre le Nyong et la Boumba. Les reliefs sont au nord et au sud et culminent au mont Guimbiri au nord, à 920 m d'altitude. L'altitude moyenne de la Boumba à son amont est d'environ 620 m.

Près de ses sources, la Boumba coule sur un ensemble de gneiss, amphibolites et granulites. Ensuite, elle traverse des schistes chloriteux et sériciteux et des quartzites. À l'endroit du secteur d'étude, la roche mère est une quartzite ferrugineuse.

ÉTUDE DU SITE TEST DE KANIOLS

Méthodologie

ÉTUDE DE LA TOPOGRAPHIE

Les cartes topographiques disponibles sur la zone sont au 1/200 000 et d'une qualité médiocre comme toutes les cartes publiées sur la zone forestière. Un relevé approximatif au 1/20 000 du secteur d'étude a donc dû être réalisé (mesure des distances avec une chaîne d'arpenteur, mesure des déclivités avec un clinomètre).

ÉTUDE DES FORMATIONS SUPERFICIELLES

Les formations superficielles ont été étudiées dans des fosses réparties le long des principaux versants (fig. 2). Quelques sondages ont montré la généralisation de certaines variations latérales en particulier en bas de versants. Les fosses atteignent pour la plupart l'altération de la roche à structure conservée. Leur profondeur varie entre 3 et 13 m. La caractérisation des organisations pédologiques est uniquement basée sur des critères morphologiques de terrain. Des analyses chimiques, pétrographiques et miné-

ralogiques sont en cours et permettront de préciser ultérieurement ces caractérisations.

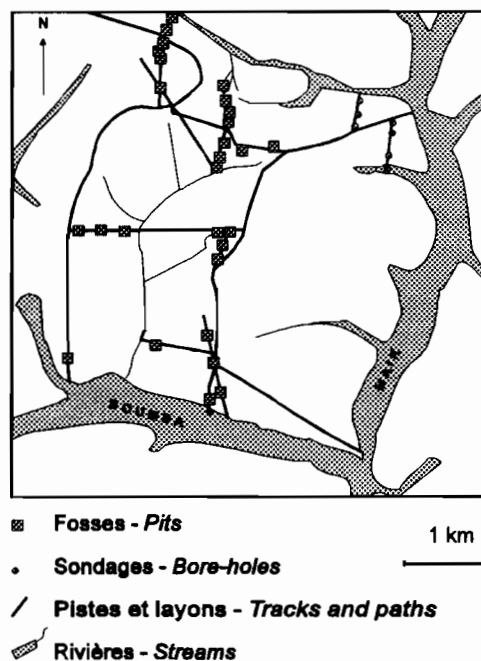


FIG. 2. — Carte de répartition des fosses et sondages.
Distribution map of pits and bore-holes.

ÉTUDE DE LA STRUCTURE FORESTIÈRE

Autour de la plupart des fosses pédologiques, quatre carrés de 25 m x 25 de côté ont été délimités et à l'intérieur de chacun des carrés les arbres ont été comptés et leur diamètre mesuré. Les chablis et les arbres morts ont été également comptés. Pour certaines de ces fosses, un relevé botanique des arbres de diamètre supérieur à 6 cm a été effectué. La structure du sous-bois a été systématiquement décrite. L'étude statistique de ces relevés systématiques est en cours. Ne seront utilisées ici que des descriptions qualitatives de ces relevés.

Les résultats de l'étude de terrain

LA TOPOGRAPHIE

La zone d'étude est limitée au sud par la Boumba, à l'est par la Maik et à l'ouest et au nord par des marigots secondaires. La morphologie est dissymétrique, avec des points hauts représentés par une série de collines hautes (720 m) et moyennes (680 m), un versant court vers le nord, et un versant long et entaillé vers le sud (fig. 3). Ce versant long est caractérisé par une série d'ondulations ou basses collines ne dépassant pas 670 m d'altitude et s'abaissant régulièrement vers la Boumba. Des entailles médianes forment des versants courts et pentus sans nouvelle rupture de pente vers le marigot.

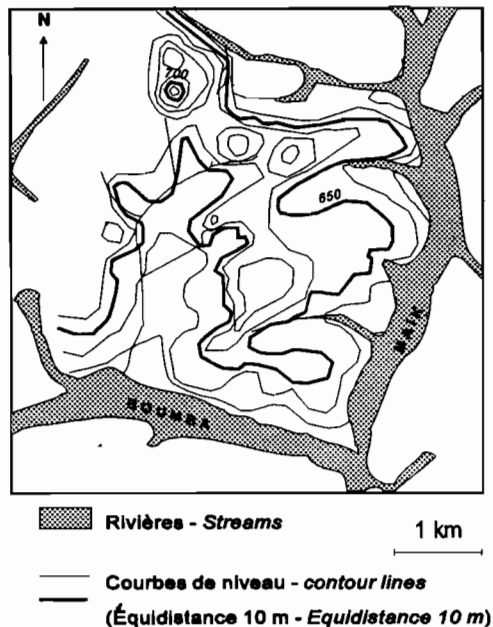


FIG. 3. — Carte topographique.
Topographic map.

LA CARACTÉRISATION DES SOLS

La roche mère n'affleure qu'à un seul endroit. Il s'agit d'une quartzite ferrugineuse, litée, avec des alternances de lits blancs de quartz et de muscovite et de lits noirs de ferromagnésiens. Tous les sols appartiennent à la classe des sols ferrallitiques (CPCS, 1967).

Les principaux volumes pédologiques

— *L'isaltérite* : l'isaltérite conserve le litage de la roche. Les lits clairs de la roche sont ameublés. Les passées à muscovite donnent un toucher doux caractéristique. Des passées quartzieuses se retrouvent en filons grossiers jusqu'au sommet de l'altérite. Par places, les lits noirs de ferromagnésiens se transforment en indurations ferrugineuses, très denses, qui ne conservent que rarement leur aspect lité.

— *L'allotérite* : elle n'est jamais très épaisse. Elle se présente comme un mélange de poches pédoturbées, rouges et meubles, très argileuses, sans éléments grossiers, et de plages lithorelictuelles, le passage de l'altérite à structure conservée aux horizons pédoturbés étant toujours rapide, sur un mètre au maximum.

— *L'ensemble cuirassé 1* : cet ensemble cuirassé est une superposition de plusieurs horizons :

— au sommet, un horizon nodulaire, à nodules bruns ou violacés, souvent à cortex ;

— une cuirasse en dalles continues, ou en blocs métriques. Du haut vers le bas, on distingue trois faciès de cuirasse, un faciès nodulaire à nodules bruns tendant vers un faciès pisolitique, un faciès massif à volumes beiges,

et un faciès alvéolaire à volumes indurés violacés riches en quartz, les alvéoles étant remplies de matrice meuble rouge ;

— à la partie inférieure, un horizon à cailloux violacés contournés à surface bosselée, généralement aplatis, et emballés dans une matrice meuble rouge à structure nettement microagregée.

Cet ensemble cuirassé n'est jamais au contact des horizons altéritiques, isaltérite et allotérite, il en est séparé par une certaine épaisseur de matériau rouge pédoturbé sans éléments ferrugineux indurés.

— *L'ensemble cuirassé 2* : cet ensemble repose en revanche toujours sur l'altérite. Il se confond d'ailleurs souvent avec l'allotérite. Dans son faciès le plus développé, il présente des blocs cuirassés à volumes indurés arrondis rouges, à plages jaunes ou brunes, à volumes lithorelictuels avec des vacuoles remplies de quartz. Il se présente parfois sous forme d'accumulations d'éléments grossiers ferruginisés.

— *L'horizon meuble rouge* : il est présent dans tous les profils. Il est taché de matière organique en surface (10 R 3/4), sa couleur varie de 10 R 3/6 à 2,5 YR 4/6. Son épaisseur est d'une extrême variabilité, de quelques centimètres (30 à 50 cm) jusqu'à plus de 10 m. Sa structure est généralement polyédrique peu nette à sous-structure microagregée. La structure polyédrique peut s'effacer dans des profondeurs intermédiaires et tendre vers une structure massive. Les racines sont nombreuses en surface et diminuent rapidement en taille et concentration. On trouve cependant des radicelles à toute profondeur, même à grande profondeur (13 m). Cet horizon ne comporte aucun élément grossier. Des paillettes de muscovite et des taches jaunâtres lithorelictuelles peuvent apparaître lorsque ce matériau surmonte directement l'altérite.

Les organisations latérales

Quatre types d'organisations latérales ont été reconnus (fig. 4).

(1) Séquence sur haute colline : elle est caractérisée par un ensemble cuirassé 1 bien développé. Les horizons nodulaires de l'ensemble cuirassé 1 apparaissent à moins de 50 cm de profondeur au sommet de la colline. Le versant court voit un amincissement des horizons ferruginisés : la cuirasse continue passe à des blocs de cuirasse puis l'horizon nodulaire subsiste seul, en passées décimétriques dans l'horizon rouge meuble. L'horizon rouge meuble sans éléments nodulaires, peu épais sur le sommet, s'épaissit sur le versant.

(2) Séquence sur colline moyenne : le versant s'est allongé. Les horizons ferruginisés de l'ensemble cuirassé 1 sont surmontés par un horizon rouge meuble épais de 3 à 5 mètres. L'épaisseur totale du sol au-dessus de l'altérite peut atteindre 10 m. Une rupture de pente marque le passage au marigot par un versant très raide. Les éléments

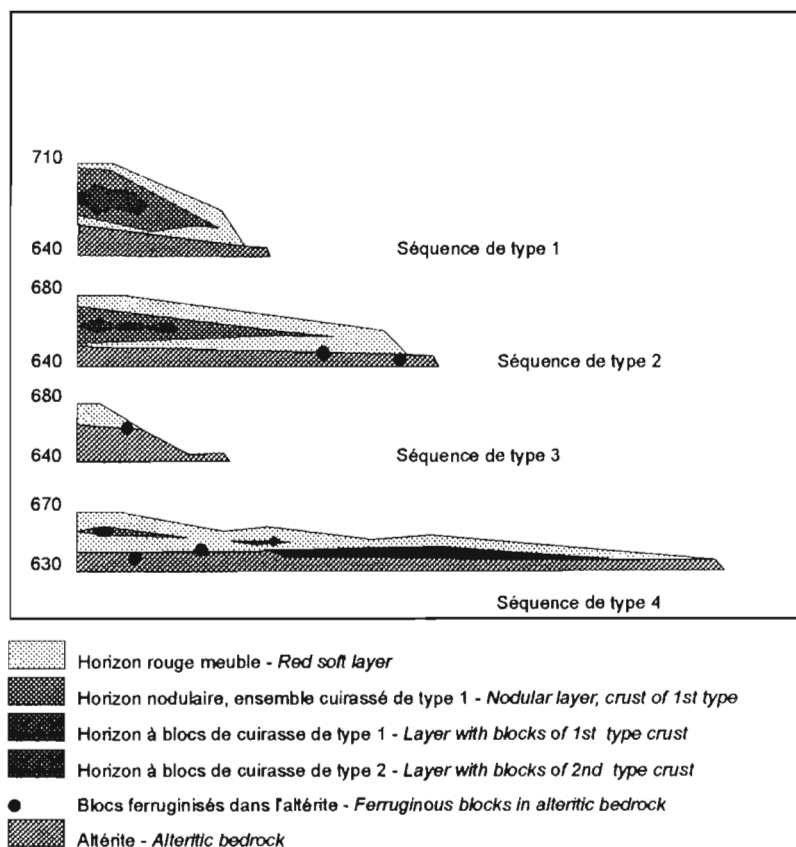


FIG. 4. — Séquences schématiques.
Schematic toposequences.

indurés de l'ensemble cuirassé 1 disparaissent progressivement sur la pente. Des indurations ferrugineuses sont parfois observées dans l'altérite en bas de versant.

(3) Séquence des entailles médianes des collines moyennes et basses : l'amont des entailles est formé de sols rouges non nodulaires peu épais sur altérite (50 cm à 1,5 m). La roche affleure dans l'entaille la plus profonde.

(4) Séquence des basses collines : les sols sont caractérisés par la présence d'un ensemble cuirassé 2 sous un épais horizon rouge meuble. Des éléments de l'ensemble cuirassé 1 peuvent exister encore par endroits sous forme d'un horizon nodulaire à débris de cuirasse ou simplement sous forme d'une fine passée nodulaire au sein de l'horizon rouge meuble au-dessus de l'ensemble cuirassé 2.

L'organisation à l'échelle du secteur étudié

À l'échelle du secteur d'étude, l'organisation pédologique peut être caractérisée de la façon suivante (fig. 5) :

(1) des horizons nodulaires et cuirasses de type 1 proche de la surface, présents sur les collines hautes ;

(2) un horizon rouge meuble épais à ensemble cuirassé 1 sur les collines moyennes ;

(3) des sols rouges peu épais sur altérite dans les entailles du domaine médian ;

(4) des sols rouges meubles moyennement épais surmontant un ensemble cuirassé 2 sur les collines basses du versant sud ;

(5) certains points élevés du versant sud à sols rouges moyennement épais sur cuirasse 2 présentent aussi des éléments indurés de type 1 dans leur horizon rouge meuble supérieur.

L'ORGANISATION DE LA COUVERTURE FORESTIÈRE

Trois types forestiers ont été reconnus :

(1) une forêt à arbres de taille moyenne homogène avec deux ou trois espèces dominantes et un sous-bois dégagé de *Rhinorea* sp. très constant ;

(2) une forêt avec des tailles d'arbres beaucoup plus hétérogènes, un sous-bois qui peut par endroit devenir dense avec beaucoup de lianes. Ce type forestier également caractérisé par des espèces de lumière plus nombreuses indique une ambiance perturbée avec des chutes d'arbres et (ou) de branches.

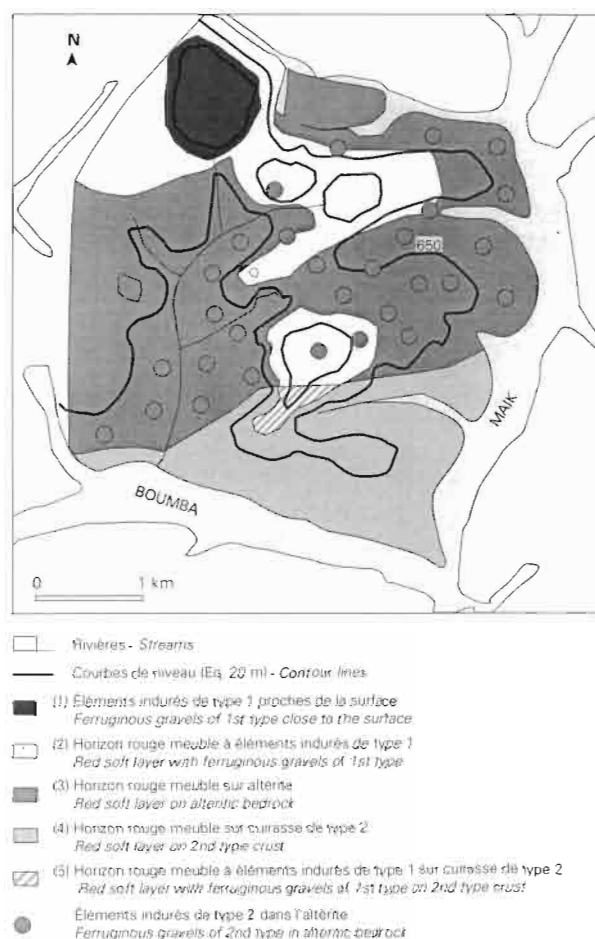


FIG. 5. — Carte de répartition des organisations pédologiques.
Distribution map of soil systems.

(3) une forêt avec des tailles d'arbres hétérogènes, une grande variabilité spécifique et un sous-bois sombre et dégagé.

Le type 2 est le plus répandu, le type 1 se rencontrant sur les collines les plus hautes et le type 3 uniquement sur le bas du versant long (fig. 6).

ANALYSE D'UNE IMAGE THEMATIC MAPPER

Méthodologie

L'image analysée est une image Landsat *Thematic Mapper* acquise en décembre 1984. La zone étudiée sur le terrain ne représente que 1/100 de la surface couverte par l'image.

L'image est sans nuages mais de qualité médiocre. Les canaux dans le domaine du visible, soit les canaux 1, 2 et 3, respectivement le bleu, vert et rouge, sont inutilisables. Seuls les canaux 4, 5 et 7 dans le domaine du proche infrarouge ont été utilisés.

L'objectif de l'étude est de mettre en évidence les caractères de surface mis en relation sur le terrain avec l'organisation pédologique. Dans ce but, l'image a été améliorée (amélioration de contraste par équipopulation) puis traitée. Seront présentés ici les résultats d'une classification barycentrique (basée sur la distance euclidienne pondérée) et d'une analyse en composantes principales (ACP). Ces traitements ont facilité une interprétation graphique de l'image.

Résultats des traitements et interprétation d'image

Sont présentés sur la planche 1 quatre portions d'image centrées sur le secteur d'étude. Chaque imagerie est représentée à l'échelle 1/90 000 avec une orientation nord 7°.

L'amélioration de contraste par équipopulation permet de rendre perceptibles sur une composition colorée des canaux 4, 5 et 7 les entailles du réseau hydrographique et certaines associations de couleur témoignant de réponses différentes de la surface (planche 1 a).

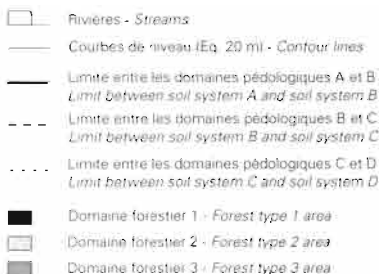


FIG. 6. — Carte de répartition des types forestiers.
Distribution map of forest types.

La classification barycentrique suivie par un lissage (planche 1 c) permet la reconnaissance de trois principales classes de radiométries de la surface : en violet, la classe de radiométries correspondant au domaine des hautes collines, en vert la classe des entailles médianes, et en jaune, la classe de radiométries représentées majoritairement dans le bas du versant. La matrice de confusion de la classification montre une mauvaise séparation des classes 1 et 3 et 2 et 3, mais une relativement bonne séparation des classes 1 et 2. Spatialement seuls les sommets des plus hautes collines sont bien caractérisés par la classe 1. Les entailles médianes sont bien caractérisées par la classe 2. La classe 3 recouvre indifféremment la zone du bas de versant et les collines moyennes.

Les trois canaux dans l'infrarouge ne sont pas très corrélés (contrairement aux canaux dans le visible quand ils peuvent être utilisés). Néanmoins, une analyse en composantes principales permet de regrouper 83 % de la variante totale de l'image sur deux axes principaux et surtout de concentrer le bruit sur le troisième axe qui peut ainsi être éliminé. Les variations de couleur, et surtout d'organisa-

tions de couleurs (texture de l'image), représentatives de différences dans la réponse de la surface, sont discernables sans traitement particulier (sur la composition colorée des trois canaux 4, 5 et 7), mais sont plus faciles à délimiter sur une image en deux canaux puisque les associations de couleur sont plus simples (planche 1b). Ainsi, le jaune est nettement dominant sur les collines hautes. L'association vert/jaune est caractéristique des versants courts des entailles médianes. L'association rouge/jaune à plages rouges larges caractérise presque toute la surface du versant. Une association jaune/rouge/vert caractérise le bas de versant.

L'interprétation graphique de la composition colorée en rouge/vert des axes 1 et 2 de l'ACP (planche 1 d) réduit à un trait simplifié les entailles médianes afin de bien mettre en évidence les trois autres associations de couleurs. Est représentée en jaune l'association vert/jaune des hautes collines, en rouge l'association rouge/jaune des collines moyennes et basses, et en vert, l'association jaune/rouge/vert du bas de versant.

RELATIONS SOL/SURFACE/IMAGE À L'ÉCHELLE DU SECTEUR D'ÉTUDE ET SPATIALISATION

Interprétation des résultats de l'étude de terrain : relations sol/surface

Le tableau I récapitule les concordances entre les différents domaines, topographiques, pédologiques et forestiers.

La carte de répartition des types forestiers (fig. 6) montre l'absence de concordance entre les limites des domaines forestiers et pédologiques ainsi que leur recouvrement partiel qui constitue les domaines I, II et III du tableau I.

Interprétation de l'image au niveau du secteur d'étude : relations sol/surface/image

L'interprétation de l'image au niveau du secteur d'étude montre que, à cette échelle et pour cette gamme de longueur d'onde (infrarouge), l'image de la surface est l'image de l'organisation des ensembles forestiers. La plage jaune (planche 1 d) coïncide avec la forêt des hautes collines (domaine forestier 1, fig. 6) ; la plage rouge (planche 1 d) correspond à la forêt des collines moyennes et basses (domaine forestier 2, fig. 6) et la plage verte (planche 1 d) recouvre la forêt de bas de versant (domaine forestier 3, fig. 6). À ces trois domaines s'ajoute le domaine des versants courts et pentus des entailles médianes qui dessine une auréole étroite autour du tracé des marigots.

L'image de la surface, pour trois canaux infrarouges avec un pixel de 30 m, à travers l'organisation forestière, « révèle » donc l'espace des organisations pédologiques suivantes :

TABLEAU I
Corrélations entre domaines pédologiques et forestiers
Correlations between soils and forest domains

	<i>Hautes collines à ensemble cuirassé 1 proche de la surface</i> (1) fig. 5	<i>Collines moyennes à ensemble cuirassé 1 sous horizon rouge épais</i> (2) fig. 5	<i>Entailles médianes à sol peu épais sur altérite</i> (3) fig. 5	<i>Basses collines à ensemble cuirassé 2</i> (4) & (5) fig. 5
Forêt homogène à sous bois dégagé des hautes collines	Domaine I			
Forêt hétérogène à sous bois dense intermédiaire		Domaine II		
Forêt hétérogène à sous bois dégagé de bas de versant				Domaine III

— le domaine à ensemble cuirassé 1 proche de la surface, localisé sur les hautes collines, caractérisé par une forêt homogène à sous-bois dégagé ;

— le domaine des entailles médianes, à versants courts et pentus, et à sol peu épais sur altérite ;

— le domaine des sols rouges épais à moyennement épais, indifféremment sur ensemble cuirassé 1, sur ensembles cuirassés 1 et 2 superposés, ou sur ensemble cuirassé 2 faiblement à moyennement développé, sur collines moyennes et basses, caractérisé par une forêt hétérogène à sous-bois dense et touffu ;

— le domaine des sols rouges moyennement épais, sur ensemble cuirassé 2 très développé, en bas de versant, caractérisé par une forêt hétérogène à sous-bois dégagé.

Spatialisation

La planche 2 présente à l'échelle 1/360 000 la spatialisation obtenue à partir des relations énoncées ci-dessus sur une région de 40 x 50 km autour du secteur test étudié. Le passage à l'échelle 1/360 000 revient à moyenner 4 pixels, donc à passer de la résolution 30 m à la résolution 60 m.

La planche 2 a présente la composition colorée des canaux 4, 5 et 7 pour la zone concernée. Le cadre rouge entoure le secteur d'étude.

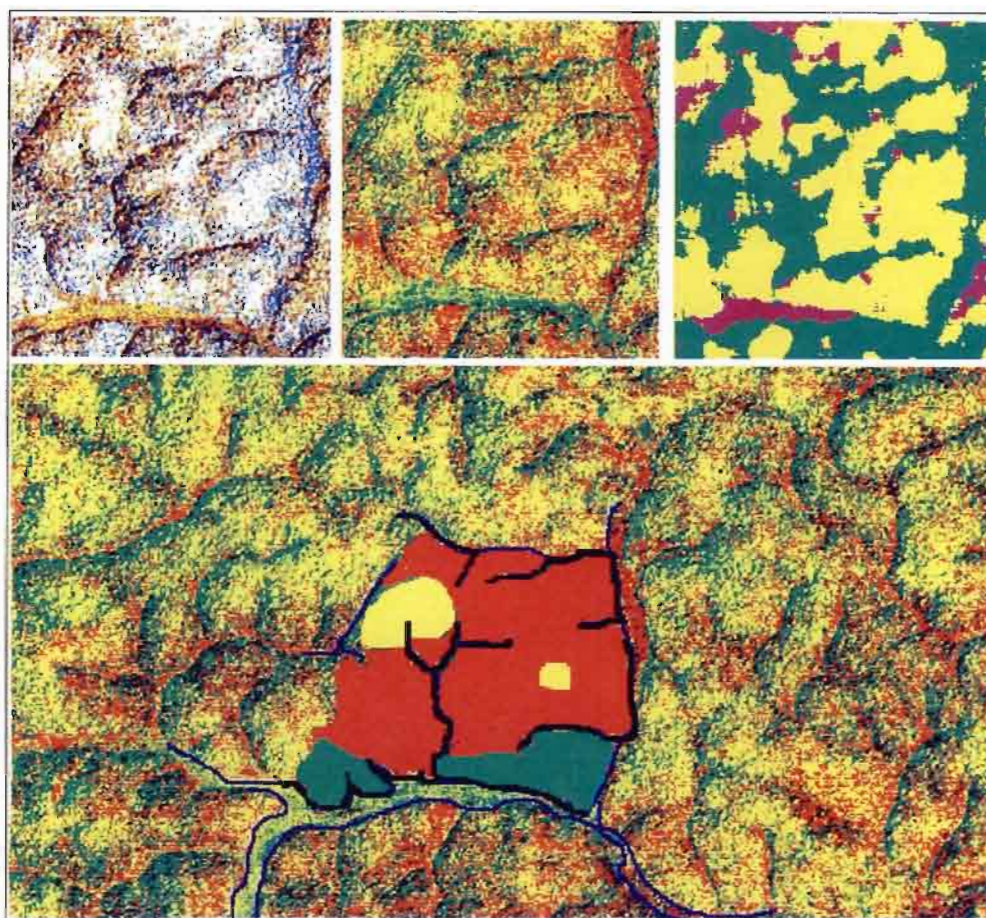
La planche 2 b est la spatialisation obtenue.

Le domaine des versants courts et pentus des entailles médianes n'a pas pu être représenté à cette échelle. En revanche, la même association de radiométries, largement représentée spatialement, a été délimitée comme le domaine des quartzites sub-affleurantes. En effet une vérification rapide sur toute la zone concernée a pu montrer que cette association de radiométries mise en relation sur la zone test avec les versants courts et pentus des entailles médianes était également caractéristique des plus hauts sommets à sols très peu épais formant les chaînes quartzitiques qui délimitent au nord et au sud le bassin versant amont de la Boumba.

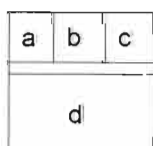
À cette échelle, la zone test est englobée dans un domaine (jaune, planche 2 b) de sols rouges à ensemble cuirassé 1 proche de la surface. En effet, le fait qu'il subsiste sur tous les petits bassins versants voisins un système de collines hautes à système cuirassé 1 a été jugé prépondérant pour la spatialisation.

Sont représentées en orange des plages de sols rouges épais. Dans ces domaines, les systèmes de hautes collines sont absents.

Enfin, en bleu sont spatialisés les domaines de bas de versant à ensemble cuirassé 2 développé.



0 1 5 km

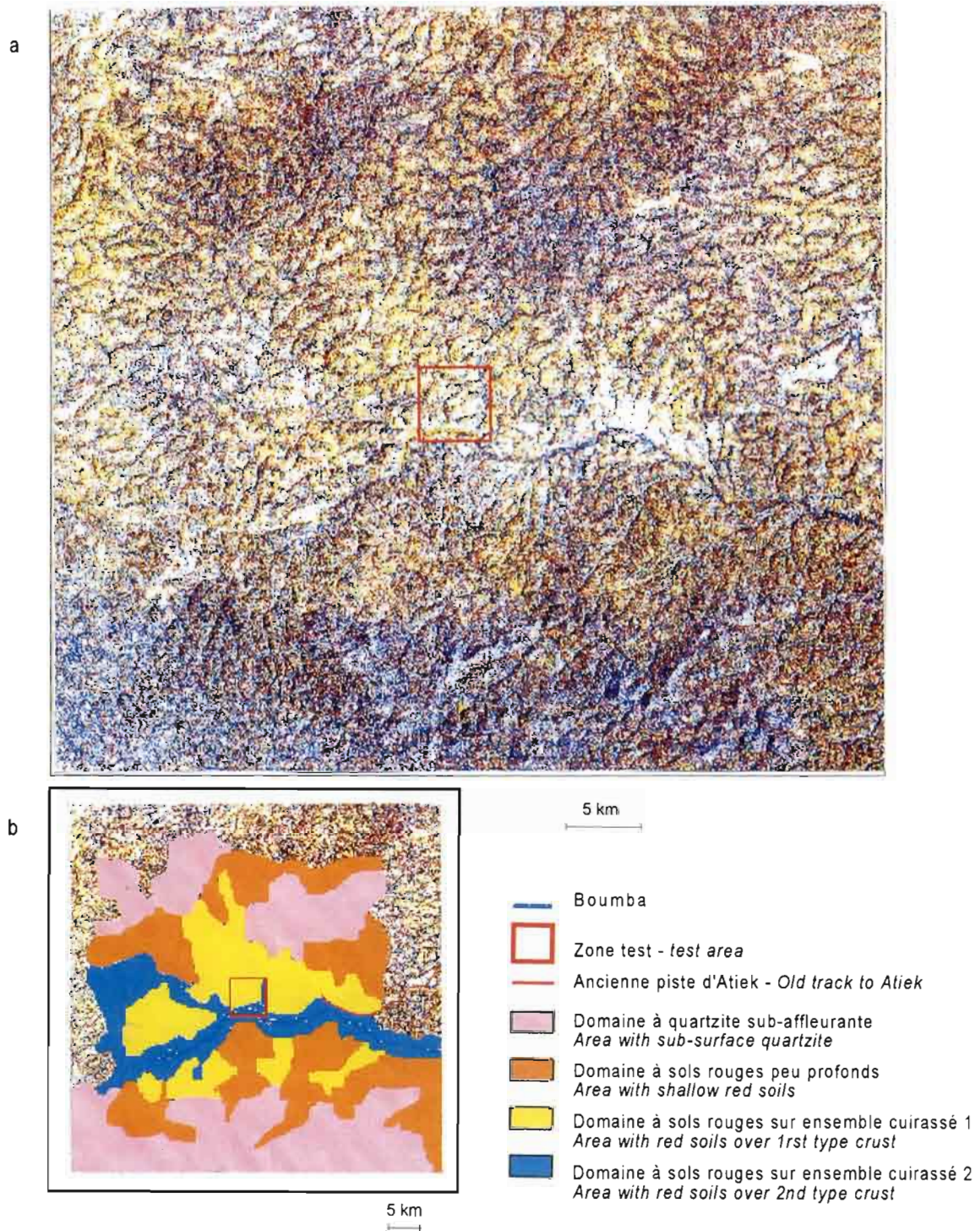


- a : Landsat TM composition colorée des canaux 4, 5 et 7
Thematic Mapper channels 4,5 and 7 color composite
- b : Composition colorée en rouge et vert des axes 1 et 2 de l'A.C.P. -
Axis 1 and 2 of P.C.A. color composite (red-green)
- c : Classification barycentrique -
Classification by a weighted Euclidian distance method
- d : Interprétation sur les axes de l'A.C.P. à l'échelle de la zone test
Interpretation on PCA axis at the scale of the test area

d : Légende

- Domaine à association de pixels jaune - vert
Mixing area of yellow-green pixels
- Domaine à association de pixels rouge - jaune
Mixing area of red-yellow pixels
- Domaine à association de pixels jaune - rouge - vert
Mixing area of yellow-red-green pixels
- Marigots
Streams

PLANCHE 1



a : Image Landsat TM composition colorée des canaux 4,5 et 7,
Thematic Mapper channels 4,5 and 7 color composite

b : Cartographie d'une zone de 40 x 50 km par extrapolation
Mapping of an area of 40 x 50 km by extrapolation

PLANCHE 2

CONCLUSION

Les canaux 4, 5 et 7 (domaine spectral de l'infrarouge proche) de l'image Landsat TM du bassin versant amont de la Boumba, dont la résolution spatiale est de 30 m, donnent essentiellement l'image de l'organisation spatiale du couvert forestier.

L'organisation spatiale du couvert forestier de la zone test étudiée est en relation : (1) avec la topographie, (2) avec l'épaisseur de l'horizon rouge meuble, et (3) avec la présence au-dessus de l'altérite d'un ensemble cuirassé 2 développé.

L'image à pleine résolution (30 m) permet donc de distinguer quatre domaines d'organisation pédologique :

- un domaine de sol rouge peu épais sur ensemble cuirassé 1 (hautes collines) ;
- un domaine de sol rouge peu épais sur altérite (versants pentus des entailles médianes) ;
- un domaine de sol rouge épais (moyennes et basses collines) ;
- un domaine de sol rouge moyennement épais sur cuirasse 2 (bas de versant).

La spatialisation au 1/360000 revient à grouper plusieurs petits bassins versants d'organisation équivalente. Les critères de regroupement sont donnés par l'image elle-même, puisque le changement d'échelle modifie la perception des associations de pixels.

Ainsi, le passage au 1/360000 nous oblige à regrouper plusieurs bassins versants élémentaires sur le critère présence ou absence de système des collines hautes à sol rouge peu épais sur ensemble cuirassé 1. Dans la zone test étudiée, le système des collines hautes à sol rouge peu épais sur ensemble cuirassé 1 est moins représenté spatialement que l'ensemble des sols rouges épais. Ce secteur a cependant été englobé dans un ensemble de bassins versants à système de hautes collines qui se distingue des ensembles de bassins versants où ce système de hautes collines est absent.

Deux domaines spatialement très distincts, mais d'organisation pédologique proche, comme ceux (1) des plus hauts sommets à quartzite sub-affleurante et (2) des versants pentus des entailles médianes à sols peu épais sur altérite, sont représentés par la même association de radiométries dans l'infrarouge proche de Landsat TM.

La spatialisation au 1/360 000 permet donc de délimiter quatre grands groupes de bassins versants :

- un premier groupe (violet, planche 2 b) où le système de sol prépondérant est un sol rouge peu épais sur quartzite ;
- un groupe 2 (jaune, planche 2 b) où le système de sol prépondérant est un sol rouge peu épais sur ensemble cuirassé 1 ;
- un groupe 3 (orangé, planche 2 b) où le système de sol prépondérant est un sol rouge épais ;
- un groupe 4 (bleu, planche 2 b) où le système de sol prépondérant est un sol rouge sur ensemble cuirassé 2 développé.

La conclusion essentielle est donc que dans le domaine forestier tropical du Sud-Cameroun, l'analyse des relations sol/surface/image d'une zone test correspondant à une unité de paysage (échelle kilométrique) permet une spatialisation des principales organisations pédologiques à l'aide des canaux infrarouge de résolution 30 m d'une image Landsat TM.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Gaston Achoundong, chercheur à l'Herbier national du Cameroun, pour les relevés botaniques, Joseph Ohandja, Samuel Ndaka et Eugène Andéla de l'Institut de recherche agronomique du Cameroun, pour leur aide précieuse sur le terrain, et Henri Robain, chercheur à l'Orstom, pour ses visites à Kaniols qui ont enrichi de son expérience le présent travail.

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

BIBLIOGRAPHIE

- BESNUS (Y.), YESOU (N.), ADERKAOU (S.), POLET (J.), 1992. — « Analyse d'images satellitaires par ondelettes. Application à l'étude du cisaillement Sud Armoricain, Bretagne, France ». *14^e réunion des Sciences de la Terre*, Toulouse, 1992, 22 p.
- BESSOLES (B.), 1969. — Synthèse simplifiée des connaissances sur la géologie du Cameroun. *Bull. Dir. Min. Géol. Cameroun*, n° 5 : 185-218.
- BOULET (R.), 1974. — *Toposéquences de sols tropicaux en Haute-Volta. Équilibres dynamiques et bioclimatiques*. Thèse doct. univ. Strasbourg, 272 p.
- CHAUVEL (A.), 1976. — *Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées*. Thèse doct. univ. Strasbourg, 532 p.
- CPCS (Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols), 1967. — *Classification des sols*, 96 p.
- DEROIN (J. P.), CHOROWICZ (J.), CURNELLE (R.), 1992. — Utilisation de l'imagerie SPOT en géologie régionale. Contribution à l'étude de la tectonique hercynienne du Bas-Languedoc méditerranéen (France). *C.R. Acad. Sc.*, sér. 2, vol. 314 (5) : 511-517.

- DUMONT (J. F.), 1986. — Identification par télédétection de l'accident de la Sanaga (Cameroun). Sa position dans le contexte des grands accidents d'Afrique centrale et de la limite nord du craton congolais. *Géodynamique*, 1 (1) : 13-19.
- ESCADAFAL (R.), 1989. — *Caractérisation de la surface des sols arides par observation de terrain et par télédétection. Applications : exemple de la région de Tataouine (Tunisie)*. Thèse doct. univ. Paris-VI, 317 p.
- FRITSCH (E.), 1984. — *Les transformations d'une couverture ferrallitique en Guyane française*. Thèse doct. univ. Paris-VII, 190 p.
- LESCURE (J. P.), BOULET (R.), 1985. — Relationship between soil and vegetation in a tropical rain forest in French Guiana. *Biotropica*, 17 (2) : 155-164.
- LETOUZEY (R.), 1985. — Notice de la carte phytogéographique du Cameroun au 1/500 000. *ICIV*, Toulouse : 95-240.
- LOWMAN (P. D.), WHITING (P. J.), SHORT (N. M.), LOHMAN (A. M.), 1992. — « Fracture patterns of the Canadian shield : a lineament study with Landsat and orbital radar imagery. » In : *International Conference on Basement Tectonics*, 7, Kingston, 1987/08/17 : 139-159.
- LUCAS (Y.), 1989. — *Systèmes pédologiques en Amazonie brésilienne. Équilibres, déséquilibres et transformations*. Thèse doct. univ. Poitiers, 157 p.
- MADEIRA NETTO José da SILVA, (1993). — *Étude quantitative des relations constituants minéralogiques – Réflectance diffuse des latosols brésiliens. Application à l'utilisation pédologique des données satellitaires TM (Région de Brasília)*. Thèse doct. univ. Paris-VI, 232 p.

Pédologie et système d'information géographique

Comment introduire les cartes de sols et les autres données sur les sols dans les SIG ? *

Pierre BRABANT

Orstom, 32, av. Henri-Varagnat, 93140 Bondy.

RÉSUMÉ

L'importance croissante des études sur l'environnement, les performances de l'informatique favorisant le développement des SIG et le fait que le sol constitue un élément majeur de notre environnement terrestre nous amènent à poser cette question. Comment introduire dans un SIG les cartes de sols et les autres données sur les sols pour que cela puisse servir aux acteurs du développement rural et contribuer à aider les planificateurs dans leur prise de décision ?

Les études de sols se situent dans un environnement rural qui est différent d'un environnement urbain. Celui-ci, construit par l'homme, est donc artificiel, fait d'objets à formes géométriques, hiérarchisés, ordonnés et emboîtés, identifiables de visu, formant des motifs répétitifs (par exemple, blocs d'immeubles séparés par des rues). Cela est relativement facile à structurer dans un SIG, d'où le développement beaucoup plus rapide et spectaculaire des SIG « urbains » que des SIG « ruraux ».

L'environnement rural forme un continuum, ayant rarement des formes géométriques mais de nombreuses propriétés pouvant fluctuer de manière apparemment aléatoire. La question est donc de savoir comment structurer l'espace rural avec sa couverture pédologique et les données qui les décrivent pour les stocker dans un SIG.

Nous proposons pour cela une structure à 4 niveaux, hiérarchisés et emboîtés :

Le niveau 1 est le plus important et forme l'ossature du SIG. Il est constitué par les Unités naturelles de terrain (ou UNT), comparables à des terroirs au sens agricole du terme.

Elles sont définies par des caractéristiques stables du terrain : topographie, formes du modelé, nature de la roche, du sol, de la végétation spontanée, forme du réseau hydrographique. Ces unités sont identifiables sur des images aérospatiales et présentent un motif répétitif des variations de certaines propriétés. Par exemple, le sol est constitué d'une combinaison d'horizons ordonnés en fonction de la topographie et du modelé. Les UNT sont toujours géocodées dans le SIG.

Le niveau 2 correspond à des subdivisions d'une UNT correspondant aux différentes Unités de modelé (UM) identifiables dans cette UNT. Ces formes sont ordonnées dans le paysage selon un motif répétitif : sommet, versant, bas-fond par exemple. Les objets du niveau 2 sont géocodés dans le SIG ou simplement modélisés, si l'échelle des cartes est trop petite.

Le niveau 3 correspond à des subdivisions dans une Unité de modelé correspondant à différentes Unités de sol (US), identifiables dans cette UM et généralement disposées dans le même ordre répétitif. Les objets du niveau 3 sont parfois géocodés mais plus souvent modélisés, l'échelle de la carte étant généralement trop petite.

* Cet article a déjà été publié dans le *Cah. Orstom*, vol. XXVII, n° 2, 1992. Une inversion de pages s'étant produite, nous le republions dans ce numéro.

Au niveau 4 chaque Unité de sol est subdivisée en horizons, disposés dans un ordre déterminé du sommet à la base du sol. Les objets du niveau 4 sont modélisés dans le SIG sauf dans le cas des cartes tomographiques à grande échelle, rarement disponibles.

Le découpage de l'espace rural sur la base des Unités naturelles de terrain en quatre niveaux hiérarchisés et emboîtés satisfait : (1) aux conditions requises par l'informatique, (2) aux exigences des changements d'échelle, (3) aux besoins des utilisateurs du développement rural car ces unités correspondent à la dimension des unités d'aménagement, (4) aux objectifs de la science du sol : faire reconnaître le rôle majeur du sol dans la gestion de l'environnement.

MOT CLÉS : SIG — Cartes de sol — Données sur les sols.

ABSTRACT

SOIL SCIENCE AND GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM. HOW TO INTRODUCE SOIL MAPS AND THE OTHER SOIL DATA INTO GIS ?

The growing importance of environmental studies, the development of geographical information system through progress in information technology and the fact that the soil is a major element in our terrestrial environment these factors together lead us to ask how soil maps and other soil data can be integrated into a GIS in a way that is useful to those involved in rural development and helpful to planners in their decision-making.

The rural environments in which soil studies are carried out are very different from urban environments. Urban environments, being man-made and artificial, constitute orderly, hierarchical arrangements of interlocking, geometrically-shaped objects which are identifiable on sight and form repeating patterns, eg. of blocks of buildings separated by streets. All this makes the urban environment relatively easy to structure in a GIS, and accounts for the fact that urban GIS have developed far more rapidly than rural GIS.

The rural environment, by contrast, is a continuum in which forms are rarely geometrical and where numerous different properties can vary in an apparently random way. The problem is to find a way of structuring rural space, its soil mantle and the data that describe them, so that they can be stored in a GIS.

What we propose is a hierarchical structure of four levels, each composed of units that readily subdivide into units of the level below.

Level 1 is the most important and forms the backbone of the GIS. It is composed of Natural terrain units, or NTUs, comparable in concept to land systems.

NTUs are defined by stable terrain features : topography, landform, type of rocks and soils, natural vegetation, pattern of drainage network. They can be identified from satellite imagery, and present a repeating pattern of variations of certain properties. For example, the soil consists of a combination of horizons arranged according to topography and landform. NTUs are always geocoded in the GIS.

Level 2 is composed of Landform units (LUs), the subdivisions identifiable within the NTUs. These units show up as repeating motifs in the landscape : eg. summit, slope and bottom land. The level 2 units are either geocoded in the GIS or, if the map scale is too small for this, simply modelled.

Level 3 is composed of the subdivisions of the LUs; these are its different Soil units (Sus) identifiable within the LUs and generally arranged in the same repeating pattern. Sus are sometimes geocoded but are more often modelled, map scale being generally too small for geocoding.

At Level 4, each soil unit is subdivided in specific order from the surface to the base of the soil. Horizons are modelled in the GIS, rarely geocoded in the cases where large-scale tomographic maps are available.

Use of this four-level hierarchy to divide up rural space on the basis of Natural Terrain Units meets four requirements : (1) the conditions required by information technology, (2) the requirements of scale changes, (3) the needs of rural development users, since NTUs and LUs corresponds in size to land development units, (4) the objective of Soil Science, which is to ensure recognition of the crucial role of the soil in environmental management.

KEYWORDS : GIS — Soil maps — Soil data.

Le développement des Systèmes d'information géographique (SIG) a débuté vers 1980, en relation directe avec les performances de l'informatique. Il s'accélère actuellement et une très forte croissance est à prévoir au cours de cette décennie.

Un SIG est une base de données numérisées dans laquelle sont stockées des informations variées mais ayant un dénominateur commun : elles sont toutes repérées par leur position géographique à la surface de la Terre. On dit, de ce fait, qu'elles sont géocodées ou géoréférencées ; d'où l'expression aussi employée de Système d'information géocodée.

Un SIG peut stocker des informations sur des objets de nature très diverse, par exemple : topographique, climatique, pédologique, agronomique, socio-économique. Connaissant les relations spatiales existant entre ces objets, il est possible de croiser et de traiter ces données. Aussi l'utilisation d'un SIG correspond à une activité pluridisciplinaire.

Des données sur les sols ont été stockées depuis le début des années soixante-dix dans des bases informatisées par les services des sols de plusieurs pays.

La structure de ces bases était fondée sur les profils de sols, correspondant aux pédons définis dans les classifications. Dans le même temps, des cartes de sols ont été numérisées. Comme les légendes de ces cartes sont fondées le plus souvent sur les unités des classifications de sols, nous retrouvons la même situation que dans le cas précédent. D'autre part, ces bases n'ont pas été normalisées, si bien que les échanges de données sont difficiles ou impossibles entre les différents services.

Ces bases ont été exploitées avec plus ou moins de succès et leur utilisation s'est limitée le plus souvent à un exercice monodisciplinaire.

Or, les pédologues sont interpellés de plus en plus par la communauté scientifique internationale pour répondre à des questions concernant l'environnement de la planète, l'évolution et la dégradation de cet environnement. C'est le cas, par exemple, pour le programme international géosphère et biosphère (IGBP).

Face à ces interpellations, les pédologues, par comparaison avec des chercheurs d'autres disciplines, sont très discrets, voire timorés selon certains, alors que le sol devrait être un pôle majeur de ces programmes, en ce qui concerne au moins les travaux sur les terres émergées.

Les projets de surveillance et de contrôle de l'environnement planétaire, favorisés par les performances croissantes des engins spatiaux, vont nécessairement s'orienter vers une utilisation accrue des SIG et des systèmes de repérage terrestre (G.P.S. ou *Global Positioning System*).

Il nous paraît donc primordial que la pédologie se préoccupe de savoir comment elle peut collaborer à ces activités et comment elle peut introduire les données sur les sols, sur leur répartition et sur leur environnement dans les SIG ;

cela pour répondre aux questions posées et pour jouer le rôle important qui devrait être le sien dans la gestion des terres et de l'environnement au niveau local, national et international.

Nous allons examiner d'abord quelle est la situation actuelle concernant l'utilisation des SIG, quelles sont les contraintes principales de cette utilisation et comment nous pouvons introduire des données sur les sols en réduisant ou en évitant ces contraintes.

SITUATION ACTUELLE DES SIG

Nous pouvons faire à ce sujet deux constatations. Premièrement, il existe de nombreux SIG utilisés pour les études et les travaux en zone urbaine mais peu de SIG mis en œuvre en zone rurale. Deuxièmement, les SIG mis en œuvre en zone urbaine sont opérationnels alors que les autres ne le sont pas encore ou rarement, car ils sont soumis à des contraintes d'utilisation non maîtrisées.

Nous verrons d'abord ce qui fait le succès des premiers, puis quelles sont les difficultés de mise en œuvre des SIG en zone rurale et enfin nous proposerons une solution pour contourner ces difficultés en l'illustrant par un exemple pris dans le domaine de la pédologie.

SIG en zone urbaine ou urbanisée

L'expression « zone urbaine » désigne les villes stricto sensu, où la plus grande partie de l'espace est aménagée par l'homme sous forme de constructions diverses. L'expression « zone urbanisée » a un sens plus large car elle désigne des structures existant en zone rurale, mais résultant essentiellement d'une activité humaine. Ce sont, par exemple, le parcellaire agricole (*land use*), le découpage cadastral, les zones de reboisement industriel aménagées, l'implantation des polders, le réseau de voies de communications, etc.

Nous verrons que pour l'informatique la structure de l'espace urbain strict et certaines structures de l'espace rural, résultant des activités humaines, sont équivalentes.

Pour illustrer sommairement la façon dont un SIG de zone urbaine peut être structuré, prenons l'exemple de la ville de Paris.

Cette structure est constituée d'une dizaine de niveaux successifs et hiérarchisés, comme cela est schématisé sur la figure 1 :

— Niveau 1 : c'est l'agglomération parisienne couvrant plus de 1 000 km². Elle est identifiable dans sa totalité sur une image satellitaire, où on peut la distinguer de l'espace rural environnant, bien que la limite entre les deux soit très irrégulière.

— Niveau 2 : un premier découpage sépare Paris intramuros, limité approximativement par le boulevard périphérique, de la banlieue.

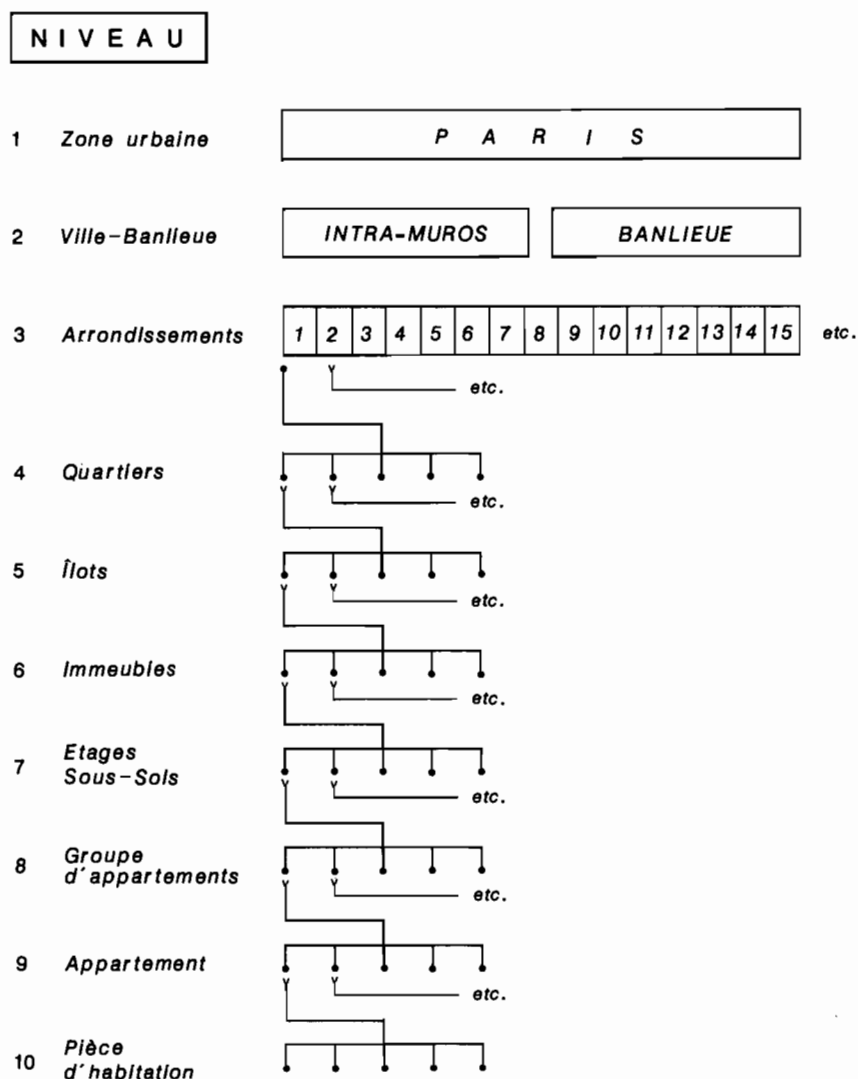


FIG. 1. — Exemple de structure d'un SIG en zone urbaine.
Example of the structure of a GIS on an urban area.

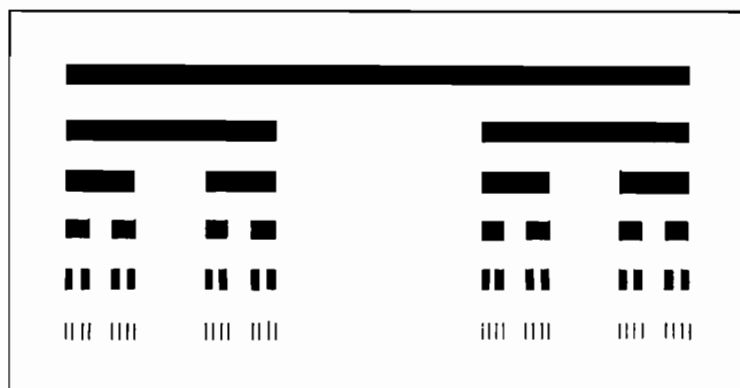


FIG. 2. — Schéma d'une structure fractale.
Fractal structure.

— Niveau 3 : Paris intra-muros est divisé en 20 arrondissements, limités par des avenues, des boulevards ou par la Seine.

— Niveau 4 : chaque arrondissement est divisé en quartiers, séparés par des avenues ou des rues principales.

— Niveau 5 : chaque quartier est divisé en îlots ou blocs d'immeubles.

— Niveau 6 : chaque îlot est divisé en immeubles, séparés parfois par des ruelles ou des impasses.

— Niveau 7 : chaque immeuble est divisé en étages et en sous-sols, séparés par des planchers.

— Niveau 8 : chaque étage est divisé en groupes d'appartements, séparés par des couloirs : côté cour et côté rue, exposition nord ou exposition sud par exemple.

— Niveau 9 : chaque groupe est divisé en appartements individuels, séparés par des murs.

— Niveau 10 : chaque appartement est divisé en pièces d'habitation, séparées par des cloisons.

Cette zone urbaine présente des caractéristiques qui facilitent la mise en œuvre de SIG. Nous en identifions six principales :

1 — Cette zone urbaine est bien structurée et formée de plusieurs niveaux hiérarchisés et emboîtés (1). Les structures présentent un motif répétitif, ce qui facilite la modélisation.

2 — La forme des objets est géométrique (2). Ce sont des surfaces, donc des objets à deux dimensions x et y , ou des volumes à trois dimensions, x , y et z : z étant positif, s'il s'agit d'étages d'immeubles, z étant négatif, s'il s'agit de sous-sols. La limite des objets est nette (un plancher séparant deux étages par exemple). Les structures sont ordonnées par rapport à une multitude de points qui peuvent être géocodés.

Toutes ces caractéristiques conviennent parfaitement aux exigences des procédures de l'informatique.

3 — Ces objets sont identifiables sur des images aérospatiales (image satellitaire ou radar, photographie aérienne) du niveau 1 au niveau 7 inclus, excepté pour les sous-sols.

4 — Les informations extraites du SIG à un niveau déterminé peuvent être référencées par rapport aux autres niveaux, supérieurs et inférieurs. Par exemple : un étage repéré comporte un nombre déterminé d'appartements et il fait partie d'un immeuble constituant un îlot d'un quartier, etc.

5 — La structure de base du SIG ne change pas quelle que soit la spécificité des utilisateurs : urbaniste, architecte, expert-géomètre, ingénieur des travaux publics, in-

génieur des télécommunications, écologue, inspecteur des services fiscaux, enquêteur du recensement, etc.

6 — Les objets, dont les caractéristiques sont introduites dans les SIG, sont des unités artificielles. Elles sont construites par l'homme, de même que le matériel informatique et les logiciels utilisés pour stocker ces données. Par conséquent, cela constitue un ensemble cohérent pour le mental de l'homme.

Ce type de SIG est bien adapté à une utilisation dans les pays fortement industrialisés et urbanisés, ayant aussi un espace rural très anthropisé, comme l'Europe de l'Ouest, le Japon et une partie de l'Amérique du Nord. En revanche, leur utilisation devient difficile dans les zones où l'espace urbain s'est étendu sans contrôle pour constituer des zones mal structurées. C'est le cas des favelas d'Amérique du Sud ou des zones d'occupation périurbaine dans les villes africaines par des migrants venus des campagnes.

Bien que les SIG en zone urbaine soient généralement opérationnels, tous les problèmes de leur mise en œuvre ne sont pas encore résolus. Cependant, les principaux ne sont pas de nature technique ou informatique. Ce sont des problèmes relationnels entre les différents utilisateurs. En effet, chaque administration, chaque service technique ou collectivité locale construit et utilise un SIG en fonction de ses préoccupations. Il en résulte que l'échange de données entre les SIG est parfois difficile ou impossible. Ce problème majeur devrait être résolu prochainement par la normalisation des formats d'échange à l'échelon national (France), puis européen. Le choix s'oriente vers la norme DIGEST (*Digital Geographic Information Exchange Standard*) et sa couche géographique, dénommée EDIGEO. Concernant la couche de transmission entre les bases de données, le choix se porterait sur la norme ISO 8211 (*Revue Géomètre*, octobre 1990).

Un indice très significatif montre que les SIG utilisés en zone urbaine sont en plein développement et qu'ils donnent des résultats satisfaisants : 80 à 90 % au moins des communications scientifiques présentées dans les congrès et séminaires se rapportent à l'utilisation des SIG en zone urbaine ou concernant les structures anthropisées des zones rurales : parcellaire agricole (*land use*), utilisation des terres (*land cover*) ou découpage cadastral.

SIG en zone rurale

La mise en œuvre de SIG en zone rurale se révèle beaucoup plus difficile, car les exemples en ce domaine sont

(1) Cette structure peut être comparée à celle des fractals, schématisée sur la figure 2.

(2) Cela est particulièrement net dans les villes nouvelles ; par exemple, le secteur de Manhattan à New York est quadrillé de façon très géométrique par des avenues et par des rues.

relativement rares. Nous pouvons citer celui du Projet ILWIS, réalisé par l'ITC (3).



De haut en bas :

PHOTO. 1. — Zone urbaine : la ville de Paris (Photo IGN)

Urban area : the city of Paris

PHOTO. 2. — Zone rurale à aspect contrasté

Rural area with varying pattern

PHOTO. 3. — Zone rurale à aspect uniforme

Rural area with unvarying pattern

Les données qui caractérisent l'espace rural peuvent aussi être introduites dans les SIG comme celles de l'espace urbain ; mais ces deux espaces possèdent des caractéristiques très différentes. La principale différence de l'espace rural est que le terrain forme un continuum. Or, pour

stocker les données, il faut d'abord les structurer. Par conséquent, on est amené obligatoirement à faire des découpages dans ce continuum. La photo 1 montre que ce découpage est facilité en milieu urbain par l'existence de structures artificielles géométriques construites par l'homme. En zone rurale (photos 2 et 3) se pose la question de savoir sur quels principes se fonder pour procéder à ce découpage, préalable à l'introduction des données dans les SIG.

Examinons d'abord comment les spécialistes des différentes disciplines scientifiques effectuent actuellement ce découpage.

Chaque thématicien qui étudie une zone rurale procède à ce découpage en fonction de ses objectifs immédiats et des exigences de sa discipline scientifique. Les SIG qui en résultent sont des regroupements de plusieurs fichiers, chacun d'entre eux correspondant à un thème : topographie, hydrologie, géologie, climat, mode d'utilisation des terres, limites administratives, etc.

Les SIG sont ainsi constitués de couches superposées, comme cela est illustré par la figure 3. Dans chacune de ces couches, il existe un découpage particulier de l'espace rural, représenté sur les cartes par le contour de polygones, regroupés en unités cartographiques dans la légende.

Les logiciels permettent techniquement de faire le croisement des données extraites des différentes couches ; mais les documents produits sont extrêmement complexes, car ils résultent de la superposition des contours de polygones appartenant à des unités cartographiques de nature très diverse (cf. un exemple donné dans l'annexe II).

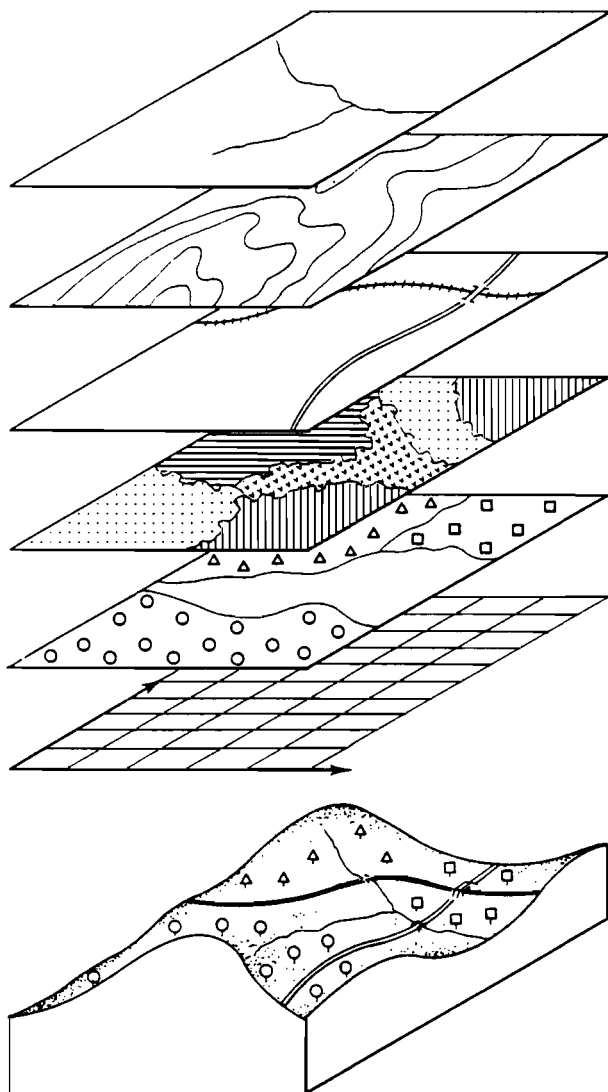
Les cartes, produits habituels de ce type de traitement, sont difficiles à interpréter et inexploitablement directement pour le développement rural. à cela s'ajoutent des problèmes de terminologie, car celle-ci varie d'un thème à l'autre.

D'autre part, l'utilisation de ces fichiers pose des problèmes de changement d'échelle, entraînant une perte d'information au cours de cette opération. Finalement, en comparant d'une part les gros investissements nécessaires pour construire ces SIG, collecter et saisir les données, et d'autre part les résultats concrets utilisables pour le développement rural, le rendement de ce type de SIG est relativement faible et leur coût excessivement élevé.

Si on compare maintenant la mise en œuvre d'un SIG urbain (4) avec celle d'un SIG rural, on constate que le matériel et les logiciels utilisés ont des capacités suffisantes et que les informaticiens sont aussi compétents. La difficulté de mise en œuvre d'un SIG rural n'est donc pas d'ordre technique et informatique ; elle est de nature conceptuelle et thématique. Elle provient principalement du

(3) International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, Enschede, Pays-Bas.

(4) Dans la suite de l'exposé, nous utiliserons, pour simplifier, les expressions : SIG urbain et SIG rural.



Using GIS, the planner overlays different maps of the same location. Shown (from top) are maps of rivers, elevation, roads, soil and vegetation. These are then registered to a common coordinate system, producing a description of the Earth surface (bottom)

FIG. 3. — Exemple de structure d'un SIG en zone rurale, constitué à partir de fichiers thématiques superposés (FAO-AGLS Division, Rome — *Land and Water*, August 1989).
Example of the structure of a GIS on a rural area, built up by overlaying thematic data files.
(FAO-AGLS Division, Rome — *Land and Water*, August 1989).

fait que chaque thématicien découpe l'espace rural de la façon qui lui convient. Ce découpage n'aboutit pas à constituer un système cohérent comme celui des SIG urbains (cf. page 318). à cette difficulté vient s'ajouter évidemment le manque de normalisation des formats d'échange.

Le type de SIG le plus utilisé actuellement pour l'étude des espaces ruraux (cf. fig. 3) peut ainsi être considéré comme un simple regroupement de bases de données monodisciplinaires.

La principale contrainte de la mise en œuvre d'un SIG rural résulte donc d'un découpage thématique, hétérogène et non approprié de l'espace rural.

COMMENT ÉLIMINER OU RÉDUIRE CETTE CONTRAINTE MAJEURE POUR L'UTILISATION D'UN SIG DANS LES ESPACES RURAUX ?

En examinant les fichiers thématiques précédents, on remarque qu'ils sont constitués de deux groupes de données. Celles du premier groupe concernent des caractéristiques du terrain que l'homme peut modifier : le réseau de communications, les aménagements ruraux (parcellaire agricole, infrastructures) et la répartition de la végétation.

Celles du second groupe concernent des caractéristiques du terrain que l'homme ne peut pas modifier, du moins facilement, ou ne veut pas modifier pour des raisons de rentabilité économique évidentes : la topographie et les formes du modelé, la nature des roches, l'aspect du réseau hydrographique, la nature et la répartition des sols. Ces caractéristiques sont donc relativement stables.

D'autre part, nous savons que, dans les régions tropicales au moins, il existe des corrélations très étroites entre :

- 1 — la topographie et le modelé ;
- 2 — les roches ;
- 3 — l'aspect du réseau hydrographique ;
- 4 — les sols et leur répartition ;

5 — la végétation naturelle ou spontanée (5), si elle existe encore.

Par conséquent, il serait possible de découper le *continuum* de l'espace rural en Unités naturelles de terrain (6), qui seraient définies par l'association des 4 ou 5 caractéristiques dites stables et énumérées ci-dessus.

Ces caractéristiques sont d'autant plus faciles à identifier pour un observateur que le terrain est peu transformé par les activités humaines. C'est encore le cas dans de vastes zones des régions tropicales. La dimension de ces unités est très variable : de quelques kilomètres carrés à plusieurs milliers de kilomètres carrés.

(5) Et la nature du climat, mais celui-ci n'est pas, comme les autres caractéristiques, identifiable de visu.

(6) Que nous pourrions aussi dénommer par l'expression « unité géographique naturelle » ou une autre expression équivalente, satisfaisante pour une majorité de thématiciens. Retenons pour cette exposé l'expression « unité naturelle de terrain » (en anglais : natural terrain unit).

En admettant ce type de découpage de l'espace rural, la structure d'un SIG rural serait fondée non plus sur une collection de fichiers monodisciplinaires, mais sur une seule base de données pluridisciplinaires, caractérisant les

diverses Unités naturelles de terrain. Cela permettrait de lever la contrainte conceptuelle et thématique résultant d'un découpage non approprié de l'espace rural.

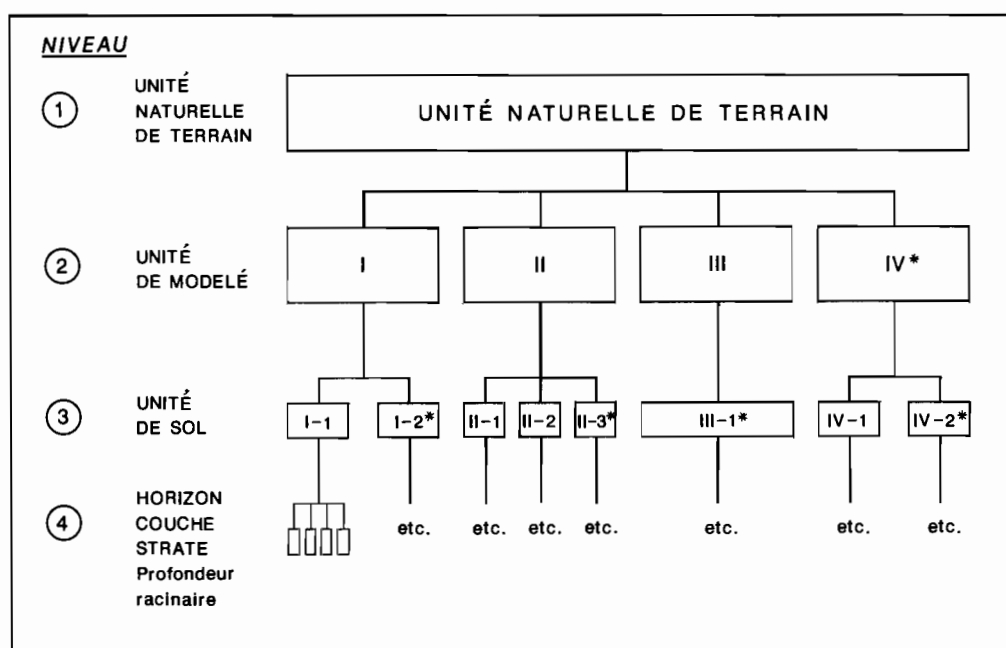


FIG. 4. — Structure des quatre premiers niveaux d'une base de données sur les sols, leur répartition et leur environnement, destinée à la mise en œuvre d'un SIG rural.

Structure of the first four levels of a data base on soils, their distribution and their environment, designed for use in a rural GIS.

Une Unité naturelle de terrain, modélisée par cette toposéquence,

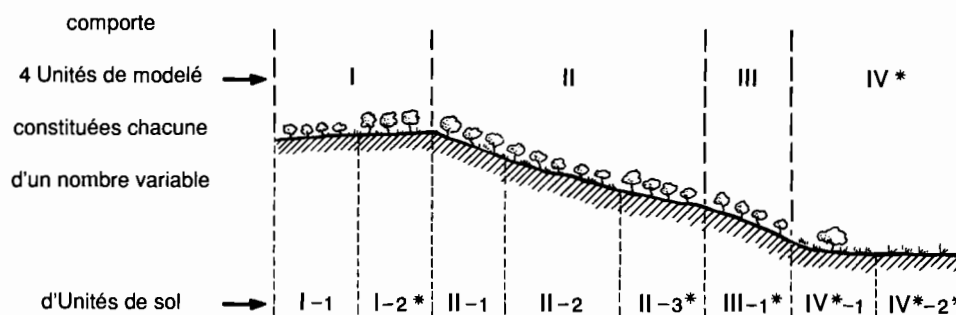


FIG. 5. — Exemple de numérotation des Unités de modelé et des Unités de sols qui constituent une Unité naturelle de terrain (UNT).

Example of numbering of the Landform units and Soil units that make up a Natural terrain unit (NTU).

SOLUTION CHOISIE POUR INTRODUIRE DANS UN SIG LES DONNÉES SUR LES SOLS, LEUR RÉPARATION ET LEUR ENVIRONNEMENT

Ce choix résulte de l'analyse des résultats obtenus par de nombreux pédologues de l'Orstom ou du Cirad au cours de recherches menées depuis une vingtaine d'années dans les régions tropicales d'Afrique, d'Amérique du Sud et d'Asie.

La base de données sur laquelle nous travaillons actuellement, pour être utilisée dans un SIG, est structurée en plusieurs niveaux successifs, hiérarchisés et emboîtés. Le schéma de la figure 4 indique comment sont structurés les 4 premiers niveaux. Nous allons décrire ceux-ci de manière détaillée car ils sont utilisés plus fréquemment, pour les travaux pluridisciplinaires, que les niveaux suivants (niveaux 5, 6, etc.) plus spécifiques à la pédologie (cf. fig. 14).

Remarques concernant la figure 4

1 — Les différentes Unités de modelé, constituant une Unité naturelle de terrain (ou UNT) (7), sont numérotées en chiffres romains en partant des points topographiques les plus hauts du paysage vers les plus bas. Un astérisque placé après un de ces chiffres (par exemple : IV*) signifie que cette UNT est constituée de quatre Unités de modelé et de quatre seulement. Cet astérisque est donc placé après le numéro d'Unité de modelé localisée dans la partie topographique la plus basse de l'UNT concernée (cf. fig. 5).

2 — Les Unités de sol, constituant une Unité de modelé, sont repérées par deux chiffres. Le premier est un chiffre romain qui indique l'Unité de modelé dont cette Unité de sol fait partie ; le second est un chiffre arabe ; il désigne le numéro d'ordre de l'Unité de sol dans l'Unité de modelé concernée. L'ordre est déterminé en partant du point le plus haut de l'Unité de modelé vers le plus bas. Un astérisque placé après ce chiffre (par exemple : II-3*) signifie que cette Unité de modelé (ici l'unité II) comporte trois Unités de sols et trois seulement. Cet astérisque est donc placé après le numéro d'Unité de sol localisée dans la partie topographique la plus basse de l'Unité de modelé concernée (cf. fig. 5).

DESCRIPTION DES 4 PREMIERS NIVEAUX

Niveau 1 — Unité naturelle de Terrain

Voici la définition que nous avons proposée récemment (BRABANT, 1991) :

Cette définition est comparable à celle d'un système-sol donnée dans l'ouvrage cité en référence. En tant que pédologue, nous avons employé par commodité dans cet

ouvrage le terme de « système-sol », mais un terme plus général comme « Unité naturelle de terrain » utilisé ici ou « Unité géographique naturelle » ou encore « Système de paysage » pourrait aussi convenir.

Volume déterminé de terrain, ayant une dimension variable, souvent kilométrique.

— Son aire peut être identifiée sur des images aérospatiales et représentée sur une carte.

— Ses caractéristiques englobent, d'une part, les formes du modelé et celles du réseau hydrographique, la nature et le mode de combinaison ordonnée des horizons du sol, la nature du matériau originel et de la végétation naturelle ou spontanée, d'autre part, le fonctionnement cyclique journalier et saisonnier de l'air, de l'eau, et des activités humaines, animales et végétales ; elles incluent aussi le fonctionnement cumulatif, qui peut transformer cette unité naturelle en une autre au cours du temps.

— Généralement, elle se présente dans le paysage comme un motif répétitif de la forme du terrain et du réseau hydrographique, de la végétation, de la combinaison ordonnée des horizons du sol et des autres caractéristiques. (D'après « Le sol des forêts claires du Cameroun » P. BRABANT, 1991).

Une Unité naturelle de terrain est identifiée et délimitée à partir des caractéristiques citées dans la définition, qui sont au nombre de 4 ou 5 (8), selon que la végétation naturelle existe ou non. Ce type d'unité est véritablement un système, dans le sens systémique du terme, car des études ont déjà montré qu'il remplit les conditions requises suivantes :

« Un système est un objet complexe dont les parties ou composantes sont liées de telle façon que l'objet se comporte à certains égards comme une unité et non pas comme la simple réunion de ses éléments » (M. Bunge, 1983, cité par J. Quensière, 1990).

Ou encore du même auteur :

« Une chose est un système si et seulement si son comportement change de façon appréciable lorsqu'on lui enlève une de ses composantes ou qu'on la remplace par une autre tout à fait différente. »

Cette seconde définition en particulier est parfaitement applicable aux sols. En effet, la propriété la plus spécifique d'un sol est l'existence d'horizons. Ceux-ci sont associés selon des lois de sociabilité (BRABANT, 1991). L'absence de l'un d'entre eux dans une association suffit pour que le fonctionnement du sol tout entier soit modifié ; en effet,

(7) Nous utiliserons parfois dans la suite du texte les initiales UNT au lieu de « Unité naturelle de terrain ».

(8) Forme du modelé, forme du réseau hydrographique, sol, matériau originel, végétation.

ce fonctionnement est déterminé par un grand nombre d'interrelations existant entre les divers horizons.

PROPRIÉTÉS D'UNE UNITÉ NATURELLE DE TERRAIN

Cette unité, telle qu'elle a été définie, possède trois propriétés intéressantes, car elles vont nous permettre de compartimenter l'espace rural continu :

— Elle est très souvent identifiable dans sa totalité sur les images satellitaires (cf. photo 4).

— Elle apparaît très souvent dans le paysage comme un motif répétitif. Cela permet de la représenter par un modèle de dimension réduite, sous la forme d'une toposéquence ou d'un bassin versant élémentaire.

— Elle est constituée, en ce qui concerne le sol, d'une combinaison de couches ou horizons, ordonnés dans le paysage par rapport à des repères topographiques.

Cette unité étant structurée et géocodée, il faut donc repérer l'arrangement des horizons par rapport aux indices topographiques dans des sites représentatifs, c'est-à-dire identifier la disposition des horizons les uns par rapport aux autres à l'échelle du paysage. La nature du sol, en dehors des sites représentatifs, peut ensuite être reconnue dans les autres unités naturelles équivalentes, en se basant simplement sur des repères topographiques (9). Quelques vérifications de terrain sont simplement nécessaires.

La photo 4 représente un exemple d'une Unité naturelle de terrain, située sur le plateau de l'Adamaoua au Cameroun. Celle-ci est identifiée sur l'image Landsat dans sa totalité.

Elle couvre sur cette image à l'échelle de 1/500 000 une surface de 300 km² environ, ce qui représente une superficie de 1 200 km² sur le terrain.

Cette unité est formée sur une roche basique ; la topographie est fortement vallonnée et le modèle comporte deux unités : un sommet de versant fortement convexe et un bas-fond de forme concave, faiblement évasé. On distingue sur l'image le motif répétitif constitué par la succession des versants et des bas-fonds. Ainsi, cette unité peut être modélisée par une toposéquence schématisée sur la figure 6. Ces caractéristiques, ainsi que l'aspect du réseau hydrographique, celui de la végétation et la nature du sol diffèrent de l'autre UNT qui l'entoure, formée sur une roche granitique.

Les deux facteurs principaux à l'origine de la différence entre ces deux UNT sont la nature et l'âge du matériau original du sol : une roche basique d'origine volcanique d'âge quaternaire dans un cas, et dans l'autre une roche granitique beaucoup plus ancienne.



PHOTO. 4. — Landsat 1 — Cameroun (Novembre 1977)
Landsat 1 — Cameroon (November 1977)

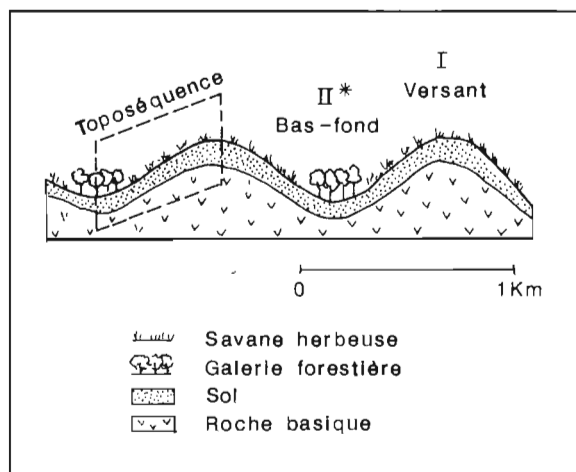


FIG. 6. — Unité naturelle de terrain identifiée sur une image satellite et modélisée par une toposéquence. On distingue deux Unités de modelé.

A natural terrain unit, identified on a satellite image and modelled by a toposéquence. Two landform Units can be distinguished.

(9) Un des inconvénients majeurs de l'étude des sols est le fait qu'ils ne sont pas directement accessibles à un observateur comme le sont d'autres objets naturels, les plantes et les animaux par exemple. Il faut donc creuser le terrain pour les observer et les échantillonner.

La photo 5 est une image SPOT 1 à 1/500 000 montrant une partie seulement d'une zone occupée par un autre type d'Unité naturelle de terrain dans le haut bassin de la Bénoué au Cameroun. Cette UNT couvre au total plusieurs milliers de kilomètres carrés répartis en une vingtaine de zones. Elle est formée sur le socle granitique ; la topographie est vallonnée et le modelé comporte trois unités : un versant convexe à pente modérée, une rupture de pente, un bas-fond concave et évasé, non chenalisé vers l'amont des bassins versants, chenalisé vers l'aval. Le réseau hydrographique est de forme dendritique ; la végétation spontanée est une forêt claire, dense sur les versants, moins dense et moins haute vers la rupture de pente et une savane herbeuse dans les bas-fonds.

On distingue sur l'image SPOT un motif répétitif dû à la répartition des formations végétales en relation avec les unités de modelé et la nature du sol sous-jacent. Les unités de modelé peuvent être observées sur les photographies aériennes en stéréoscopie.

La structure de cette UNT peut encore être modélisée par une toposéquence (cf. fig. 7).

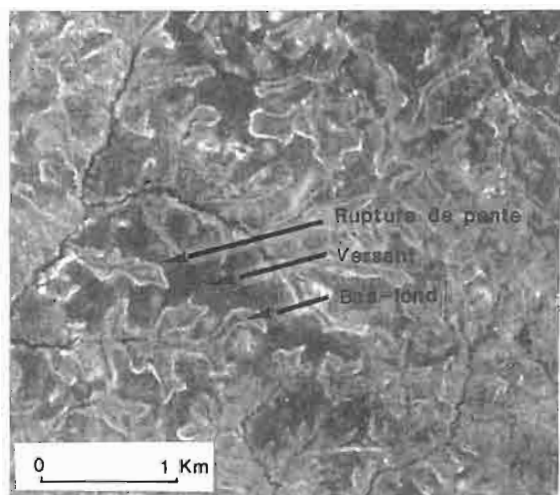


PHOTO. 5
SPOT 1 — XS — Cameroun (Novembre 1989)
SPOT 1 — XS — Cameroon (November 1989)

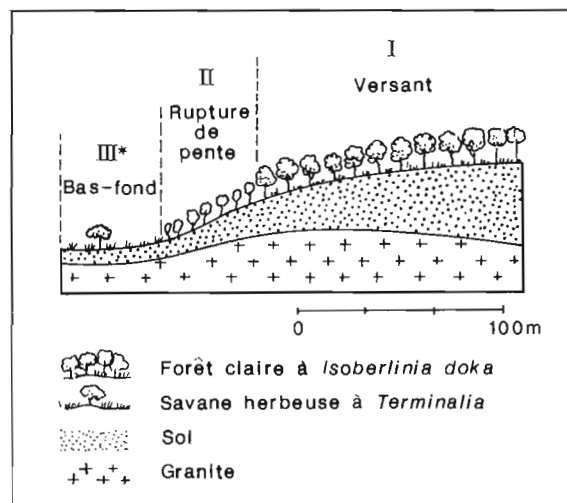


FIG. 7. — Partie d'une Unité naturelle de terrain, identifiée sur une image satellite et modélisée aussi par une toposéquence. On distingue ici trois Unités de modelé.

Part of a natural terrain unit identified on a satellite image and modelled by a toposéquence. Here three landform Units can be distinguished.

COMMENT INTRODUIRE LES CARACTÉRISTIQUES D'UNE UNITÉ NATURELLE DE TERRAIN DANS UN SIG ?

Les deux exemples d'Unités naturelles de terrain que nous avons identifiés sur les images satellitaires (cf. photos 4 et 5) peuvent être représentés chacun sur une carte (10) par un polygone ayant une dimension proportionnelle à la superficie couverte sur le terrain en fonction de l'échelle de cette carte.

La surface du polygone, représentant sur une carte à 1/1 000 000 une des zones couvertes par l'UNT de la photo 5, est de 4 cm² (cf. fig. 9-1). On attribue à ce polygone une couleur ou une trame, et un numéro pour le repérer sur la carte.

Le contour de ce polygone — c'est-à-dire le contenant de l'UNT — peut être numérisé, en mode vecteur par exemple, et introduit dans le SIG. Les caractéristiques (11) (ou attributs) de cette UNT — c'est-à-dire le contenu — peuvent aussi être numérisées et introduites dans le SIG. Le contenant et le contenu, une fois numérisés, peuvent ensuite être extraits du SIG par un utilisateur : le premier se présentera sous la forme d'un tracé graphique (le contour du polygone) et le second sous la forme de données tabulaires, comme cela est indiqué dans le tableau I.

(10) La production de cartes n'est évidemment pas la seule manière d'exploiter un SIG. Une analyse de données, produisant des diagrammes, tableaux, calculs statistiques, est une autre possibilité. Cependant, les cartes sont le produit le plus courant et le plus demandé par les utilisateurs.

(11) Dans la terminologie informatique, celles-ci sont dénommées attributs. L'annexe I indique la liste des principaux attributs, numérisés au niveau I et qui concernent principalement l'environnement des UNT.

Parmi ces attributs figurent la description des Unités de modelé et celle du sol correspondant. Après avoir été codifiées, elles sont introduites dans le SIG d'où elles peuvent être extraites sous forme de données tabulaires.

En revanche, la répartition et l'étendue occupée dans ce polygone par chaque Unité de modelé sont des données graphiques. Ces unités sont visibles sur les images satellitaires (cf. photo 5) quand on examine la végétation, répartie en fonction des Unités de modelé ou par stéréoscopie sur certaines images du satellite SPOT et sur les photographies aériennes.

TABLEAU I

Exemple de données tabulaires : légende explicative d'une unité cartographique sur une carte à très petite échelle (1/1 000 000 ou plus petite)

Example of data in table form : explanatory text for a mapping unit on a very small-scale map (1 : 1,000,000 or smaller)

UNITÉ CARTOGRAPHIQUE	MODELÉ	VÉGÉTATION	MATÉRIAU ORIGINEL	NATURE DU SOL
SOL DES FORÊTS CLAIRES	Glacis d'érosion, vallonnés à ondulés, disséqués dans la partie médiane et aval des bassins versants	Association de forêt claire sur les versants et de savane herbueuse dans les bas-fonds	Roches cristallines acides Granites et gneiss dominants	Sol apparenté à la catégorie n°7 du référentiel établi pour le Nord-Cameroun P.BRABANT, M.GAUAUD (1985)

Le calcul indique qu'il en serait de même pour une carte à l'échelle de 1/500 000 ($x = 0,1$ mm), à 1/250 000 ($x = 0,2$ mm) ou à 1/200 000 ($x = 0,25$ mm).

1 Unité naturelle de terrain

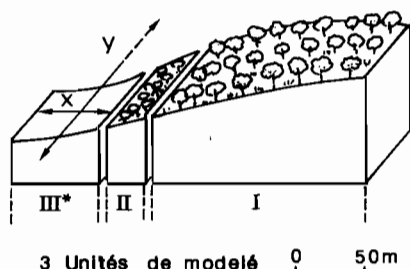


FIG. 8. — Exemple montrant les deux dimensions, X et Y, d'une Unité de modelé.

Example showing the X and Y dimensions of a Lanform unit.

En introduisant les attributs de cette Unité naturelle de terrain dans un SIG au niveau I, il se produit donc une perte d'information déjà acquise par le pédologue et importante pour l'utilisateur : la distinction de trois Unités de modelé différentes et des Unités de sol associées. Cela signifie aussi que l'échelle des cartes représentant cette

Cependant, la répartition et l'étendue de chaque Unité de modelé, bien qu'elles soient connues par le pédologue, ne peuvent pas être introduites graphiquement dans le SIG au niveau I à partir d'une carte à 1/1 000 000, ni par conséquent extraites sous la forme de carte à la même échelle pour la raison suivante : l'une des deux dimensions x et y des Unités de modelé (la dimension x sur la figure 8) est trop petite pour que ces unités puissent être représentées chacune séparément sur une carte à 1/1 000 000 et que la carte reste lisible pour un utilisateur ($x = 0,05$ mm à 1/1 000 000).

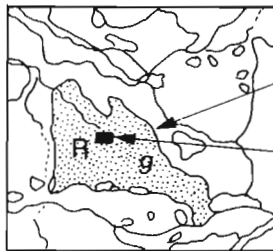
UNT n'a qu'une importance mineure dans une gamme allant de 1/1 000 000 à 1/200 000, puisque le contour seulement du polygone de 4 cm^2 , représentant la superficie de 400 km^2 sur le terrain, peut être introduit graphiquement dans le SIG au niveau I, mais pas les limites de chaque Unité de modelé à l'intérieur de ce polygone.

Pour ne pas perdre l'information acquise, nous procédons de la manière suivante (cf. fig. 9).

On sélectionne un petit secteur représentatif (12) ($0,022 \text{ cm}^2$, par exemple) dans le polygone couvrant 4 cm^2 sur la carte et équivalent à 400 km^2 . Puis on fait de ce secteur un agrandissement suffisant ($0,022 \text{ cm}^2$ sur une carte à 1/1 000 000, équivalant à $2,2 \text{ km}^2$ sur le terrain, est agrandi 40 fois) pour que la localisation et l'étendue occupée par chaque Unité de modelé puissent être représentées graphiquement sur un échantillon de carte à une échelle plus grande (1/50 000, cf. fig. 9-3). La répartition des Unités de modelé dans l'UNT est modélisée par un bloc-diagramme (cf. fig. 9-2), ainsi que la répartition topographique de ces unités (cf. fig. 9-4). Puis la carte et les blocs-diagrammes sont numérisés graphiquement dans le SIG au niveau I. Une photographie aérienne oblique peut aussi être scannerisée et introduite dans le SIG (la photo 6 par exemple). Ces données peuvent ensuite être extraites sous la même forme par un utilisateur.

(12) Notons que la dimension de ce secteur est souvent du même ordre de grandeur que celui d'un bassin versant élémentaire.

1

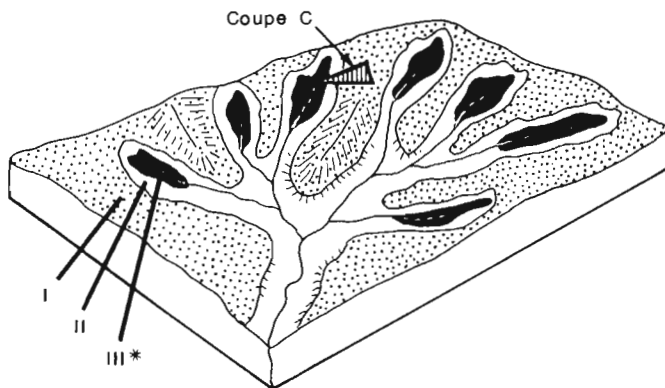


Carte à 1/1 000 000 où un polygone numéroté 9 représente une superficie de 400 km², couverte par une Unité Naturelle de Terrain

Voici un secteur représentatif de ce polygone (R) couvrant 0,022 cm² (ce qui représente 2,2 km² sur le terrain).

Ce secteur est agrandi 40 fois

2 - Vue sous forme de bloc-diagramme de ce secteur



Trois unités de modelé sont distinguées:

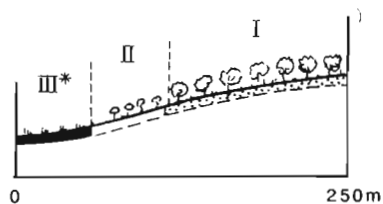
- I - Versant convexe
- II - Rupture de pente
- III* - Bas-fond concave

3 - Vue en plan de ce secteur



Carte des Unités de modelé à 1/50000

4 - Vue en coupe (COUPE C)



Les 3 Unités de modelé regroupées et modélisées dans une toposéquence



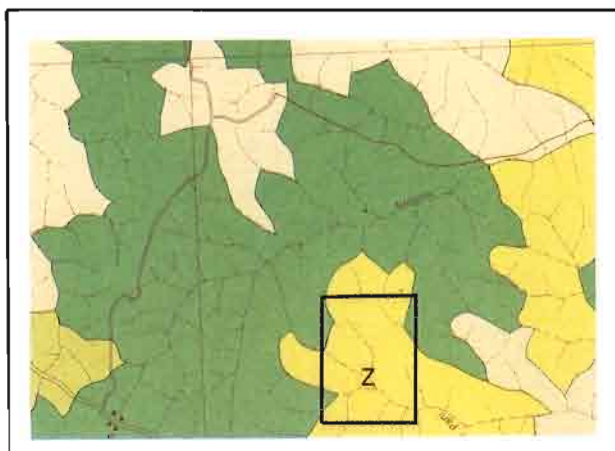
Photo 6 - Exemple de photographie scannée et introduite dans le SIG au Niveau 1.

Au premier plan, sous la ligne blanche, une partie d'une UNT comportant trois Unités de modelé

FIG. 9. — Introduction des données au niveau 1. Zoom sur un secteur représentatif pour visualiser les unités de modelé et montrer leur répartition dans une Unité naturelle de terrain.

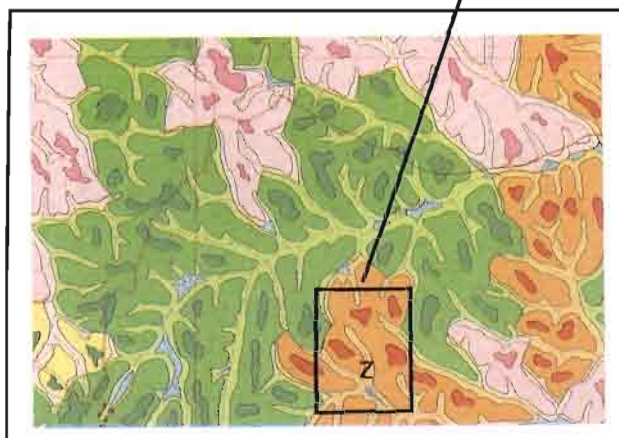
Introduction of Level 1 data. Close-up of a representative sector showing landform units and how they are distributed in a Natural terrain unit.

1 - Carte des UNT



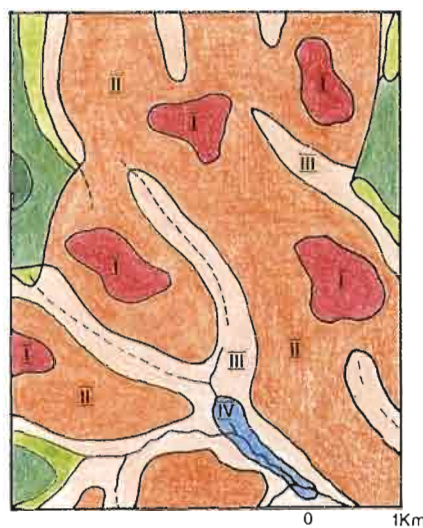
Polygones tracés sur une carte à 1/200.000 représentant des superfloies couvertes par des catégories différentes d'UNT. Chacune de celles-ci est identifiée par une couleur différente (Extrait de la carte Katiola 1/200 000 réduite ici deux fois)

2 - Carte des unités de modelé



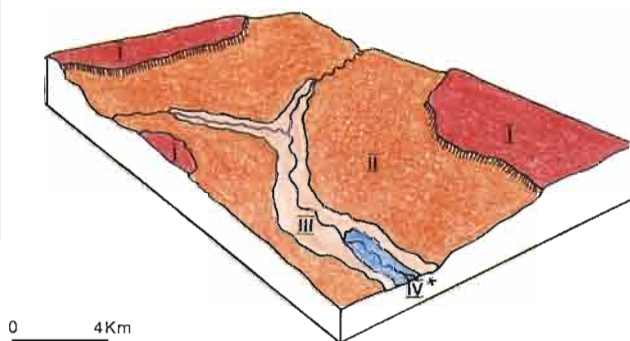
Dans chaque UNT de la carte 1, les unités de modelé sont délimitées sur des photos aériennes à 1/50 000; puis ces limites sont reportées sur une carte à 1/50 000. Celle-ci est ensuite réduite à 1/200.000 pour faciliter la comparaison avec la carte 1. Dans la zone Z d'une UNT (encadrée sur la carte 1), on distingue ainsi quatre unités de modelé sur la carte 2. (Extrait de la carte Katiola 1/200 000 réduite ici deux fois)

3 - Zone Z agrandie



Polygones représentant sur une carte à 1/50.000 (réduite ici deux fois) les quatre unités de modelé de la zone Z

4 - Modélisation sous la forme d'un bloc diagramme



Bloc-diagramme modélisant la répartition des quatre unités de modelé dans le paysage

FIG. 10. — Exemple montrant le découpage d'une Unité naturelle de terrain en Unités de modelé et leur représentation cartographique. (D'après la feuille Katiola à 1/200 000 Côte-d'Ivoire. Carte des paysages et des unités morpho-pédologiques R. Poss, 1982).

Example showing the division of a Natural terrain unit into Landform units and how they are represented on a map. (From the 1 : 200,000 Katiola sheet, Côte d'Ivoire. Map of landscapes and morpho-pedological units — R. Poss, 1982).

En procédant de cette manière, nous avons introduit l'information manquante dans le niveau 1 du SIG sous forme d'un échantillon du niveau 2.

Cette procédure est utilisable pour introduire dans un SIG au niveau 1 les données sur les sols, leur répartition et leur environnement quand on dispose de cartes à une échelle allant de 1/200 000 à 1/1 000 000 et plus. D'autre part, cette procédure facilite le changement d'échelle et fait la transition avec le niveau 2 du SIG.

Niveau 2 — Unités de modelé

Une Unité de modelé est une partie d'une Unité naturelle de terrain « ayant des caractéristiques homogènes et qui peut se distinguer des unités adjacentes sur le terrain et/ou sur des images aérospatiales » (BRABANT, 1991).

On estime que plus de 75 % des Unités naturelles de terrain dans les régions tropicales ne comportent que deux à quatre Unités de modelé ; ce nombre atteint parfois cinq mais rarement plus.

Les limites entre les Unités de modelé peuvent être représentées graphiquement sur des cartes dont l'échelle peut varier de 1/10 000 à 1/100 000 selon la nature du terrain. Par conséquent le contour des polygones de ces cartes, c'est-à-dire le contenant, peut être numérisé graphiquement dans un SIG. Le contenu (c'est-à-dire les attributs), dont une liste est donnée comme exemple dans l'annexe I, se rapporte principalement aux caractéristiques de l'environnement, comme pour le niveau 1. Le contenant et le contenu peuvent ensuite être extraits du SIG par un utilisateur ; le premier sous la forme d'un tracé graphique (le contour des polygones) et le second sous la forme de données tabulaires.

Passer du niveau 1 du SIG, correspondant à des données d'une carte à 1/1 000 000, au niveau 2, qui se réfère à une carte à 1/50 000, et inversement, est relativement aisé pour un utilisateur.

Grâce à l'opération effectuée sur un secteur représentatif, il sait en consultant le SIG au niveau 1 qu'un polygone de 4 cm², tracé par l'imprimante sur la carte puis identifié par une couleur homogène et un numéro, ne correspond pas à une zone de terrain homogène. Le secteur agrandi et le bloc-diagramme, tracés aussi par l'imprimante ou l'examen de la photo, lui indiquent que cette zone est en réalité hétérogène et constituée de 3 Unités de modelé différentes, associées dans un ordre et dans des proportions déterminées (cf. fig. 9-4 et photo 6).

Si au contraire l'utilisateur consulte le SIG au niveau 2, il sait que les 3 Unités de modelé, constituant des unités cartographiques différentes à l'échelle de 1/50 000 (cf. fig. 9-3), sont des parties d'une même Unité naturelle de

terrain qui peuvent être regroupées dans le même ensemble au niveau 1.

La figure 10 illustre de manière plus didactique encore la façon de découper une Unité naturelle de terrain en plusieurs Unités de modelé. Cet exemple est extrait d'une carte réalisée par l'Orstom en Côte-d'Ivoire (Poss, 1982).

D'autre part nous savons, à partir des études détaillées de sites représentatifs, que chaque Unité de modelé est constituée le plus souvent de deux ou de plusieurs Unités de sol ou compartiments verticaux de sol (13) de nature différente (cf. fig. 12-2), plus rarement d'une seule unité. Les attributs de la description des Unités de sol, après avoir été codifiés, sont introduits dans le SIG d'où ils peuvent être extraits sous forme de données tabulaires. En revanche, la répartition et l'étendue occupée dans chaque polygone, représentant une Unité de modelé, par les diverses Unités de sol qui la constituent sont des données graphiques. On se trouve ainsi dans la même situation que pour le niveau 1, où une Unité naturelle de terrain comportait plusieurs Unités de modelé. Ici chaque Unité de modelé comporte plusieurs Unités de sol. Celles-ci ne peuvent pas être introduites graphiquement dans le SIG au niveau 2, ni par conséquent extraites sous forme de carte, pour la même raison déjà évoquée au niveau 1 à propos des Unités de modelé. Une des dimensions des Unités de sol est généralement trop petite pour que chacune de ces dernières puisse être représentée séparément sur une carte à une échelle variant de 1/20 000 à 1/50 000.

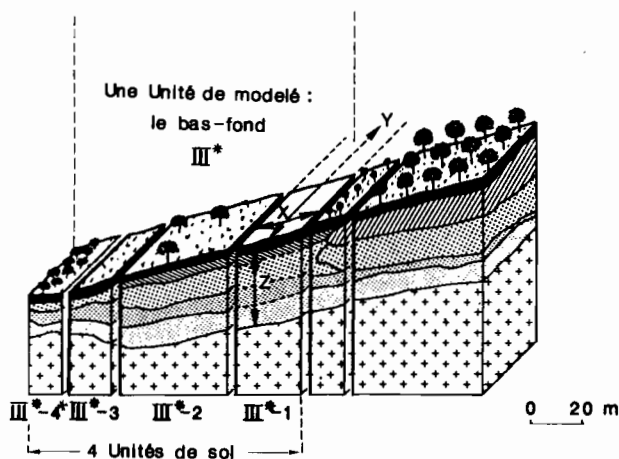


FIG. 11. — Exemple montrant les trois dimensions, X, Y, et Z, d'une Unité de sol.

Example showing the three dimensions (X, Y and Z) of a Soil unit.

La figure 11 montre l'exemple d'une Unité de modelé (le bas-fond) constituée de trois Unités de sol. On constate

(13) Se reporter à la définition de ce terme au niveau 3, page 318.

que l'une au moins des trois dimensions (x, y, z) d'une Unité de sol (la dimension x sur la figure) est trop petite pour que ce compartiment puisse être représenté sur une

carte à 1/50 000 par exemple et que la carte reste lisible pour un utilisateur, la dimension de x étant de 0,4 mm à 1/50 000.

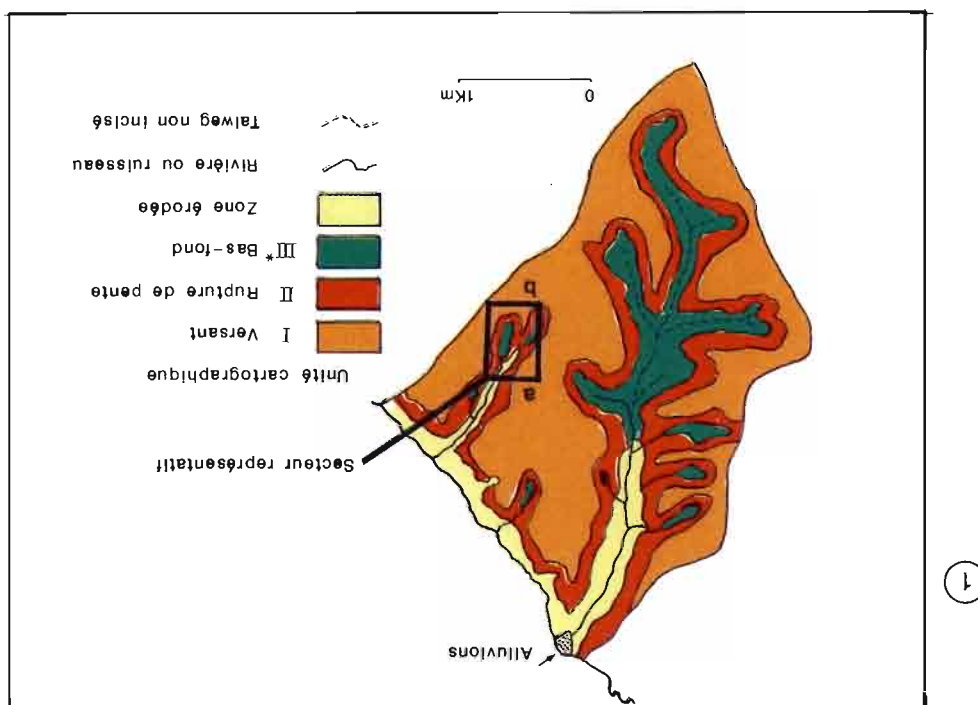


FIG. 12-1. — Échantillon de carte à 1/50 000. Les trois unités cartographiques représentent les trois Unité de modelé.
Extract from a 1: 50,000 scale map. The three mapping units represent the three Landform units.

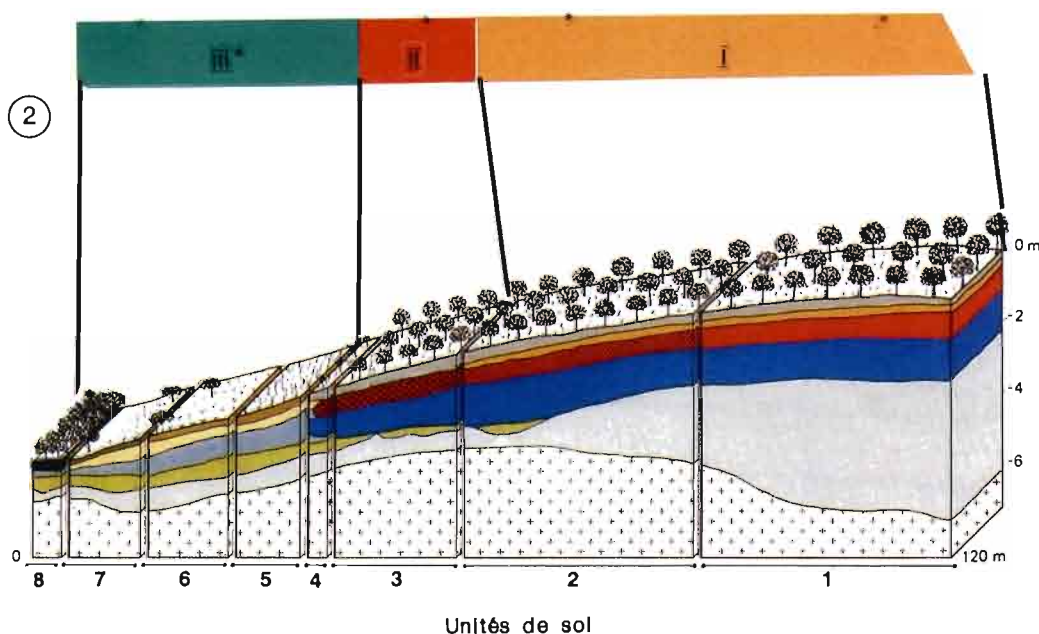


FIG. 12-2. — Bloc-diagramme montrant la répartition des Unités de sol dans les trois Unités de modelé, sous la forme d'une toposéquence.

Diagram showing the distribution of Soil units in the three Landform units, in the form of a toposéquence.

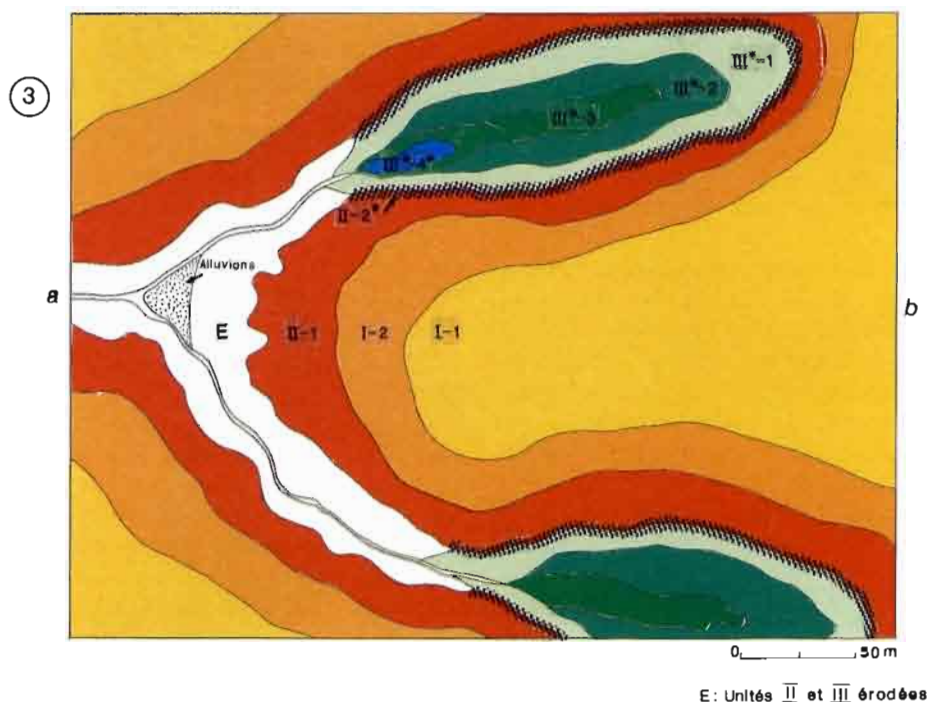


FIG. 12-3. — Secteur représentatif de la figure 12-1, dessiné sur une carte à 1/2 500, dont la légende est constituée par le bloc-diagramme ci-dessous.

Les 8 unités cartographiques représentent les 8 Unités de sol.

Representative section of figure 12-1, drawn on a scale of 1 : 2,500. The key is provided by the diagram below.

The 8 mapping units represent the 8 Soils units.

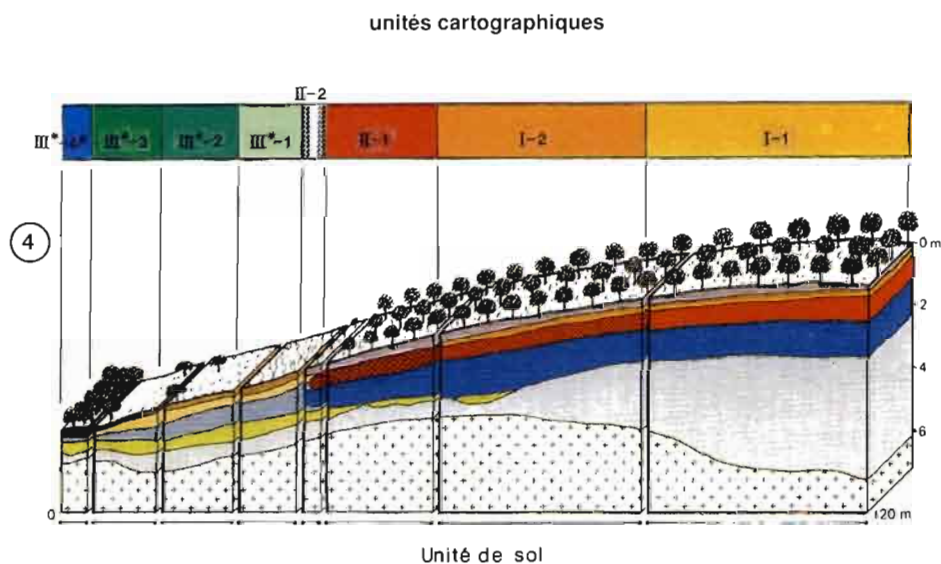


FIG. 12-4. — Introduction des données au niveau 2. Zoom sur un secteur représentatif pour visualiser les unités de sols et montrer leur répartition dans chaque Unité de modelé.

Introduction of Level 2 data. Close-up of a representative sector, showing the Soil units and their distribution within each Landform unit.

En introduisant les caractéristiques de cette Unité de modelé dans un SIG au niveau 2, il y a donc encore une perte d'information déjà acquise par le pédologue et importante pour l'utilisateur : la distinction de 3 Unités de sol différentes dans une Unité de modelé.

Pour ne pas perdre cette information, nous allons procéder de la même manière que précédemment pour le niveau 1.

On sélectionne un petit secteur représentatif sur une carte à 1/50 000 (cf. fig. 12-1), dont on fait ensuite un agrandissement suffisant (0,25 cm² sur une carte à 1/50 000 équivalant à 0,25 km² sur le terrain, est agrandi 20 fois) pour que la localisation et l'étendue occupée par chaque Unité de sol dans les Unités de modelé puissent être représentées graphiquement sur un échantillon de carte à échelle plus grande (1/2 500, cf. fig. 12-3). La disposition des Unités de sol dans une Unité de modelé est modélisée par un bloc-diagramme. Comme les Unités de modelé sont associées en toposéquence, on regroupe toutes ces Unités de sol sur le même bloc-diagramme (cf. fig. 12-2). Puis le bloc-diagramme et la carte sont numérisés graphiquement dans le SIG au niveau 2. Ils peuvent ensuite être extraits sous la même forme par un utilisateur.

Ainsi nous avons de nouveau introduit l'information manquante dans le niveau 2 du SIG sous la forme d'un échantillon du niveau 3.

Cette procédure est utilisable pour introduire dans un SIG des données sur les sols et leur répartition, quand on dispose de cartes à une échelle allant de 1/20 000 à 1/100 000 environ. De plus, elle facilite le changement d'échelle et fait la transition avec le niveau 3 du SIG.

Niveau 3 — Unités de sol

Une Unité de sol est un compartiment vertical d'une Unité de modelé qui constitue elle-même une partie d'une Unité naturelle de terrain ; elle est définie de la manière suivante :

« Partie d'une Unité de modelé constituée par une superposition verticale déterminée d'horizons, entre la surface du terrain et à la base le matériau originel, et caractérisée par un mode de fonctionnement cyclique saisonnier, en particulier par son cycle hydrique et son cycle thermique.

Les variations latérales des propriétés morphologiques, physico-chimiques, minéralogiques, hydriques et thermiques sont trop faibles pour exercer une influence édaphique significative sur la croissance des plantes d'un point à un autre de la superficie de terrain ainsi délimitée ». (BRABANT, 1991).

En se référant à cette définition, on peut considérer que :

— une Unité de sol est homogène pour une utilisation agronomique déterminée ;

— chaque Unité de sol peut être identifiée et décrite par une coupe verticale de dimension métrique (cf. fig. 13-1-2), allant de la surface topographique jusqu'au matériau originel.

Ce niveau 3 est caractérisé par des attributs qui sont principalement de nature pédologique et il introduit systématiquement une troisième dimension z qui vient s'ajouter aux deux autres x et y utilisées dans les niveaux 1 et 2.

Chaque Unité de modelé comporte souvent 2 à 3 Unités de sol, parfois une seule mais rarement plus de 3.

Les limites entre ces Unités de sol peuvent être représentées graphiquement sur des cartes dont l'échelle est généralement inférieure à 1/10 000 (cf. fig. 12-3). Comme pour les niveaux précédents, le contenant, sous la forme des contours de polygones, peut être numérisé graphiquement et le contenu des polygones sous la forme d'attributs codifiés. Une liste d'attributs est donnée dans l'annexe I.

Passer du niveau 2 du SIG qui correspond à des données d'une carte à 1/50 000 par exemple, au niveau 3 qui se réfère à une carte à 1/5 000 ou 1/2 500, et inversement, est relativement aisé pour un utilisateur.

Grâce à l'opération effectuée sur un secteur représentatif il sait, en consultant le SIG au niveau 2, qu'un polygone représentant une Unité de modelé ne correspond pas à une zone de terrain homogène. Le secteur représentatif agrandi et le bloc-diagramme lui indiquent que cette zone est constituée par exemple de trois Unités de sol différentes, associées dans un ordre et des proportions déterminées (cf. fig. 12-2).

Si cet utilisateur consulte le SIG au niveau 3, il constate que ces trois Unités de sol, constituant des unités cartographiques différentes à l'échelle du 1/2 500, sont des parties d'une même Unité de modelé et peuvent être regroupées dans le même ensemble au niveau 2.

D'autre part, cet utilisateur connaît, en consultant le bloc-diagramme numérisé au niveau 3, le nombre et la succession verticale des horizons de chaque Unité de sol (cf. fig. 13-1). Cela lui permet ainsi de faire la transition avec le niveau 4.

Niveau 4 — Horizon et couche — strate et profondeur racinaire

À ce niveau, nous introduisons dans le SIG les différentes composantes de chaque Unité de sol, celle-ci étant modélisée par une coupe verticale partant du sommet des arbres jusqu'à la roche-mère ou le matériau originel du sol (cf. fig. 13-1-2).

La composante de base choisie pour caractériser le sol lui-même est l'horizon. La coupe indique donc la succession verticale des horizons (cf. fig. 13-2), chacun d'eux étant caractérisé par plusieurs dizaines d'attributs (cf. annexe I).

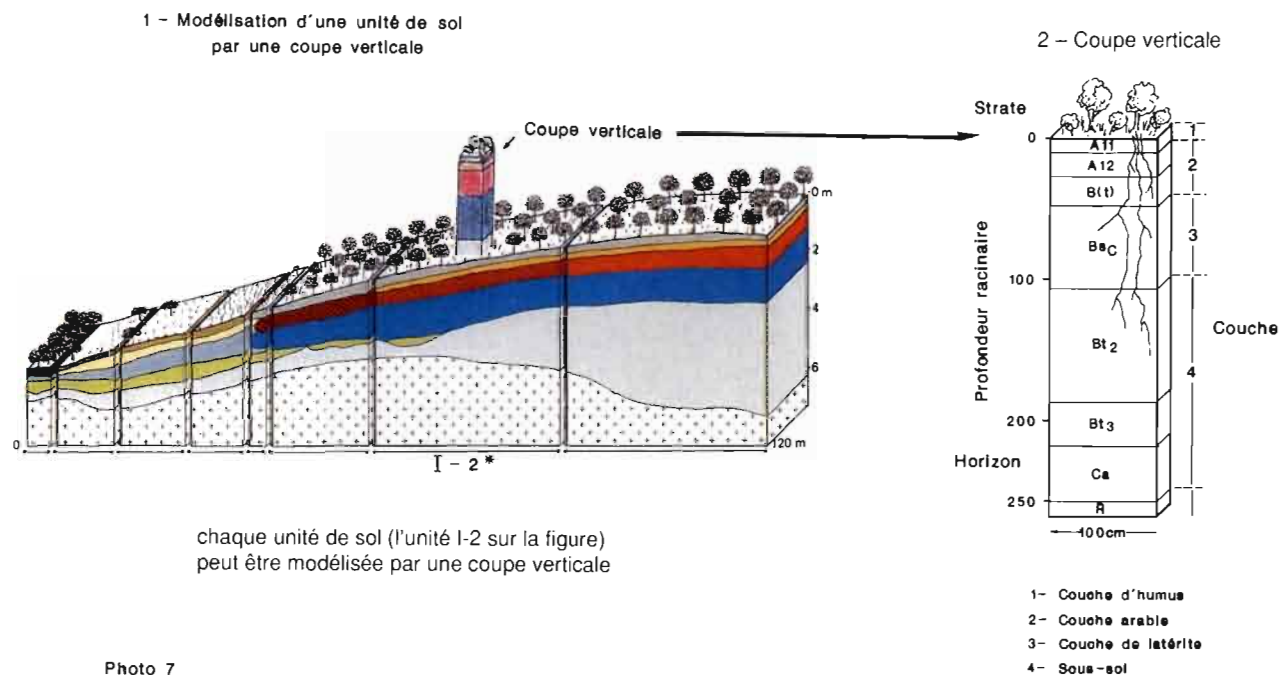
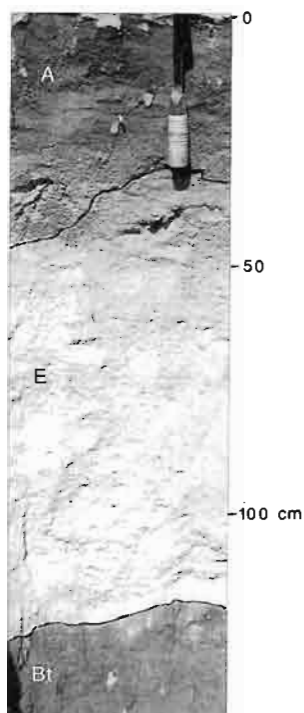


Photo 7



Exemple d'une coupe de sol montrant la superposition de trois horizons principaux

FIG. 13. — Introduction des données au Niveau 3.

Zoom sur une coupe d'Unité de sol pour montrer le nombre et la disposition des horizons, des couches, des strates végétales et du profil racinaire.

Introduction of level 3 data.

Close-up of a cross section of a Soil unit, showing the number and arrangement of horizons, layers, vegetation storeys and root profile layers.

Le terme de couche (14) (cf. fig. 13-2) peut se substituer à celui d'horizon quand on veut employer un langage plus familier aux utilisateurs : par exemple la couche d'humus ou la couche arable pour les agriculteurs, la couche de latérite pour les spécialistes des travaux routiers. Cependant l'emploi du terme de couche doit se référer à la succession verticale des horizons qui constitue la donnée de base au niveau 4 du SIG.

En ce qui concerne la végétation, le terme de strate conviendrait pour la partie aérienne des plantes (par exemple, strate arborée, strate herbacée) avec des subdivisions possibles et celui de profondeur racinaire pour la partie souterraine.

Ce niveau 4 est donc caractérisé par des attributs principalement de nature pédologique ou floristique.

Les relations entre les niveaux 3 et 4 sont différentes de celles qui relient les niveaux 1, 2 et 3. Les données qui caractérisent ces trois premiers niveaux sont géoréférencées alors que celles du niveau 4 ne le sont que ponctuellement au point d'observation de la coupe verticale de sol. Il n'y a donc pas de données graphiques sous forme de cartes en deux dimension x et y à introduire dans le SIG au niveau 4.

Il est rare que l'extension latérale en x et y des horizons et que leurs variations d'épaisseur, c'est-à-dire les valeurs de z, soient déterminées. Cela peut être réalisé dans des sites dont la superficie ne dépasse pas quelques hectares ou quelques dizaines d'hectares.

Dans ce cas, les données sont présentées sous forme de cartes d'analyse structurale (BOULET et al., 1982) ou de tomographies (GIRARD, 1983).

On remarque que la troisième dimension z est positive quand elle concerne certaines couches (la couche de litière par exemple) ou la partie aérienne des plantes ; elle est négative quand elle concerne les horizons du sol situés, par définition, sous la surface topographique et le système racinaire des plantes. Cela correspond dans un SIG urbain aux étages (z positif) et aux sous-sols (z négatif).

AUTRES NIVEAUX INFÉRIEURS

Par analogie avec un SIG urbain (cf. fig. 1), il est possible de déterminer dans la structure d'un SIG rural d'autres niveaux inférieurs, qu'il serait trop long de décrire dans cet article.

En comparant les figures 1 et 14, on constate qu'elles présentent une forte analogie. On peut remarquer aussi que la gamme des techniques d'identification des objets va de la microscopie, pour les niveaux inférieurs, à la télédétection, pour les niveaux supérieurs, et que la gamme des

utilisateurs s'élargit des niveaux inférieurs vers les supérieurs.

PROPRIÉTÉS D'UN SIG RURAL FONDÉ SUR LA CARACTÉRISATION DES UNITÉS NATURELLES DE TERRAIN

Nous allons comparer maintenant les deux types de SIG, rural et urbain, pour rechercher leurs similitudes et leurs différences (cf. page 318).

— Les similitudes : un SIG rural, dont la structure est fondée sur les caractéristiques des Unités naturelles de terrain, présente les similitudes suivantes :

1 — Il est bien structuré et formé de plusieurs niveaux hiérarchisés et emboîtés. Sa structure présente un motif répétitif, ce qui facilite la modélisation.

2 — Les objets à caractériser sont des surfaces à deux dimensions (une Unité de modelé par exemple) ou des volumes à trois dimensions avec un z, positif ou négatif (une Unité de sol par exemple).

3 — Les objets, au moins ceux des niveaux 1 à 4, peuvent être géocodés.

4 — Les objets sont tous identifiables dans leur totalité sur les images aérospatiales dans les niveaux 1 et 2, mais en partie seulement dans les niveaux 3 et 4.

5 — Les objets référencés à un niveau donné peuvent être situés par rapport aux autres niveaux, supérieurs et inférieurs. Par exemple : un horizon (niveau 4) est rattaché à une Unité de sol (niveau 3) de telle Unité de modelé (niveau 2) ; il possède aussi un mode d'agrégation (niveau 5) avec des types déterminés de fond matriciel (niveau 6).

6 — La structure de base du SIG rural ne change pas, quels que soient le mode d'utilisation et la spécialité des utilisateurs : géographe, géologue, pédologue, agronome, hydrologue, etc. Chaque spécialiste peut adapter des modules à cette structure de base en fonction de ses besoins particuliers.

Les différences entre SIG urbain et SIG rural portent sur la forme, le contour et la nature des objets :

1 — La forme des objets n'est pas géométrique, au moins pour ceux des niveaux 1 à 8, et leur contour n'est pas net mais plus ou moins flou.

2 — Les objets ne sont pas artificiels mais naturels. Cela implique qu'ils possèdent des particularités telles qu'une variation, paraissant parfois aléatoire, de certaines propriétés dans le même ensemble. Par exemple, la teneur en argile d'un horizon est caractérisée par une valeur moyenne de 12 %, alors que cette valeur peut varier en réalité de 9 à 15 % d'un point à un autre de cet horizon.

(14) Couche : subdivision effectuée dans une coupe de sol et correspondant à une partie d'un horizon, à un horizon ou regroupant deux ou plusieurs horizons.

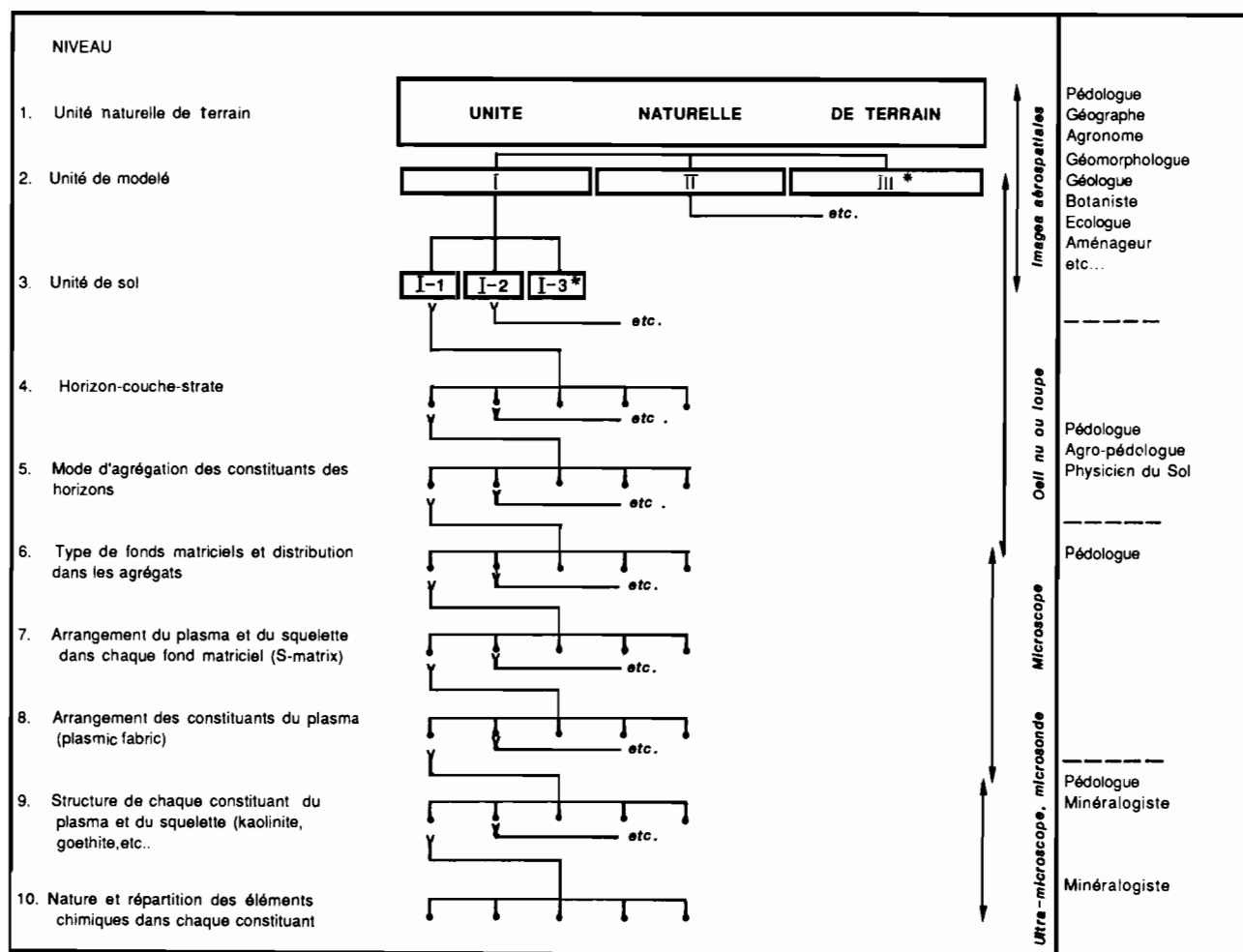


FIG. 14. — Structure d'une base de données comportant, en plus des quatre premiers niveaux, les niveaux 5 à 10, spécifiques à la pédologie ou à la minéralogie.

Structure of a data base comprising levels 5 to 10 (specifically pedological or mineralogical) as well as the first four levels.

Les problèmes techniques et relationnels rencontrés dans les SIG urbains existent aussi dans les SIG ruraux comme la normalisation des formats d'échange, de la couche de transmission. La solution de ces problèmes est également prévisible à court terme.

CONCLUSIONS

Le découpage de l'espace rural en Unités naturelles de terrain et la structure du SIG correspondant, constituée de niveaux hiérarchisés et emboîtés, sont compatibles avec :

- les conditions requises par l'informatique ;
- les exigences des changements d'échelle, et la recherche d'une perte minimale d'informations au cours de ces changements ;

— une approche pluridisciplinaire, puisque les études sont orientées vers le même objet et qu'elles relèvent de plusieurs disciplines ;

— les besoins des utilisateurs du développement rural, puisque les unités définies aux niveaux 1, 2 et 3 ont des dimensions équivalentes aux unités d'aménagement rural : le bassin versant (niveau 1), l'exploitation agricole (niveau 2), la parcelle (niveau 3), le site d'expérimentation (niveau 4) ;

— l'un des objectifs principaux de la science du sol : mieux s'insérer dans la communauté scientifique et faire connaître le rôle majeur du sol dans la gestion de l'environnement.

Par ailleurs, la principale recommandation à faire est que les thématiques des diverses disciplines s'accordent sur un découpage de l'espace rural qui soit fondé sur un

dénominateur commun : au moins le concept d'Unité naturelle de terrain décrit au niveau 1 du SIG. Ils pourraient ensuite moduler le découpage des niveaux inférieurs en fonction des nécessités de leur discipline et de leurs recherches, mais en respectant cette base commune minimale. Notons en passant que le concept d'Unité naturelle de terrain est comparable au concept de « terroir », bien connu des agronomes et des géographes.

Nous savons qu'il ne suffit pas de regrouper des thématiciens ou de réaliser des fichiers thématiques numérisés et de les croiser pour réaliser des travaux pluridisciplinaires. Il est essentiel que les divers thématiciens travaillent sur le même objet.

Nous sommes conscients aussi qu'un tel accord n'est pas facile à obtenir. Les difficultés relationnelles, déjà observées dans l'utilisation des SIG urbains, vont se présenter à nouveau. Chaque thématicien aura tendance à identifier des unités naturelles en fonction de ses connaissances, de ses préoccupations et de ses objectifs.

Nous ajouterons que les pédologues ont aussi des efforts importants à faire. Ils devraient éviter de donner au concept de « pédon » trop réductionniste bien que largement utilisé depuis cinquante ans, l'importance qu'il n'a pas. En effet, l'utilisation de ce concept a déjà montré ses limites, a freiné le développement de la science du sol dans certains domaines et a gêné la coordination avec des disciplines complémentaires.

Le découpage systémique de l'espace rural nous paraît être le meilleur moyen de rendre un SIG rural opérationnel, de favoriser l'insertion des pédologues dans les grands projets de contrôle et de gestion des terres et de l'environnement de la planète au cours du XXI^e siècle. D'autre part, ce type de SIG est adapté aux espaces ruraux des pays tropicaux. Or, l'évaluation, l'utilisation durable et la conservation des terres et la protection de l'environnement rural sont des problèmes vitaux pour de nombreux pays de la zone tropicale, qui sont encore à large dominance rurale. Cela concerne la plus grande partie de l'Afrique, de larges étendues en Asie tropicale et en Amérique du Sud, c'est-à-dire les trois quarts environ des terres émergées arables.

Enfin, il est encourageant de constater que la nécessité d'une approche systémique est ressentie aussi par d'autres

disciplines, comme la géologie par exemple. Voici des extraits de l'exposé de Y. SCANVIC du BRGM à la Journée nationale de la recherche géographique (12 juin 1989, à Paris) concernant les recherches en télédétection au service de l'information géologique et géographique :

« La réponse spectrale des objets géologiques est un critère nécessaire mais non suffisant des classifications [de ces objets]. Il faut donc faire appel à d'autres descripteurs compatibles avec l'interprétation analytique... »

« Les premiers résultats montrent qu'on peut définir sur les images [satellitaires] des "unités de paysage" ; ce sont des surfaces d'étendue quelconque, présentant des relations constantes entre certaines de leurs composantes. Les différentes composantes traduisent des liens étroits entre la végétation, la morphologie, la fracturation et le substratum. L'approche consiste donc à synthétiser cet ensemble de données, à choisir des parcelles d'entraînement homogènes et représentatives... »

QUELQUES PERSPECTIVES DE RECHERCHES

Trois principales perspectives de recherches peuvent être proposées :

— la première concerne les spécialistes de la télédétection qui pourraient apporter leur contribution pour faciliter l'identification des Unités naturelles de terrain, qui sont le fondement des SIG ruraux et constituent la « boîte noire » dont peuvent dériver une grande partie des données physiques (15) ;

— la deuxième s'adresse aux informaticiens pour qu'ils adaptent leur outil aux nécessités imposées par les caractéristiques des objets naturels. Des recherches pourraient être menées ou poursuivies sur les possibilités de la logique floue (*fuzzy logic*) qui semble bien adaptée à l'étude des objets naturels ;

— la troisième se rapporte à un domaine actuellement peu exploré : celui des ensembles fractals. Des recherches en ce domaine, en liaison avec les spécialistes de la télédétection, pourraient apporter des résultats nouveaux et intéressants sur la répartition et la structure des Unités naturelles de terrain.

Manuscrit accepté par le Comité de rédaction le 30 juin 1992.

BIBLIOGRAPHIE

ACMIS 89-90, 1990. — Groupe de travail. *Analyse comparée de modèles d'information spatialisée*. Orstom, Paris, 70 p. *multigr.*

BOULAIN (J.), 1978. — Les unités cartographiques en pédologie. Analyse de la notion de génon. *Science du Sol*, n° 1 : 15-29.

BOULET (R.), CHAUVEL (A.), HUMBEL (F. X.), LUCAS (Y.), 1982 a. — Analyse structurale et cartographique en pédologie. I — Prise en compte de l'organisation bidimensionnelle de la couverture pédologique : les études de toposéquences et leurs principaux apports à la connaissance des sols. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, XIX, 4 : 309-321.

- BOULET (R.), HUMBEL (F. X.), LUCAS (Y.), 1982 b. — Analyse structurale et cartographique en pédologie. II — Une méthode d'analyse prenant en compte l'organisation tridimensionnelle des couvertures pédologiques. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, XIX, 4 : 323-339.
- BOULET (R.), HUMBEL (F. X.), LUCAS (Y.), 1982 a. — Analyse structurale et cartographique en pédologie. — Passage de la phase analytique à une cartographie générale synthétique. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, XIX, 4 : 341-351.
- BOURGEOIN (G.) BERTRAND (R.), 1983. — Organisation de la couverture pédologique et précision de sa cartographie. Analyse d'un exemple. *Science du Sol*, n° 1 : 49-61.
- BRABANT (P.), 1989. — « La connaissance de l'organisation des sols dans le paysage : un préalable à la cartographie et à l'évaluation des terres ». In : *Actes du premier séminaire franco-africain de pédologie tropicale*, Lomé, Togo, 6-12 février 1989. Orstom, Paris, 484 p : 65-85.
- BRABANT (P.), 1991. — *Le sol des forêts claires du Cameroun. Exemple d'étude d'un site représentatif en vue de la cartographie des sols et de l'évaluation des terres*. Orstom-Mesires, Paris. Tome 1, 530 p. Tome 2, 278 p.
- BRABANT (P.), GAVAUD (M.), 1985. — *Les sols et les ressources en terres du Nord-Cameroun*. Notice explicative n° 103, Orstom, Paris, 285 p.
- BURROUGH (P. A.), 1986. — *Principles of geographical information systems for land resources assessment*. Clarendon Press, Oxford, 194 p.
- Conseil national de l'information géographique, 1989. — *Actes de la Journée Nationale de la Recherche géographique*, 12 juin 1989, Paris. CNIG, Paris, 152 p.
- Conseil national de l'information géographique, 1990. — Thème : intégration de la télédétection dans les SIG et les études géographiques. Panorama sur l'activité française en matière de télédétection associée aux SIG. André Mangin — SCOT Conseil, 43 p.
- CONACHER (A. J.), DALRYMPLE (J. B.) 1977. — The nine unit landsurface model : an approach to pedogeomorphic research. *Geoderma*, 18 : 1-154.
- DIJKERMAN (J. C.), 1974. — Pedology as a science, the role of data, models and theories in the study of natural soil system. *Geoderma*, 11 : 73-93.
- DUDAL (R.), 1986. — « The role of pedology in meeting the increasing demands on soils ». In : *C.R. du XIII^e Congrès de l'assoc. Internat. de la Sci. du Sol*. Hambourg, août 1986, vol. 1 : 80-96.
- ESCADAFAL (R.), 1990. — *Pédologie et systèmes d'information géographique*. Notes réunies par R. ESCADAFAL. Orstom, Paris, 12 p. multigr.
- F.A.O., 1989. — *Land and water*, n° 33, August. AGLS Division. Rome, 16 p.
- GÉOMÈTRE, 1990, n° 1 janvier. — Dossier : systèmes d'informations géographiques (SIG) : 40-82.
- GÉOMÈTRE, 1990, n° 10 octobre. — Dossier : les formats d'échange : 36-63.
- GÉOMÈTRE, 1991, n° 3 mars. — Dossier : Global Positioning system (GPS).
- GERRARD (A. J.), 1981. — *Soils and landforms. An integration of geomorphology and pedology*. G. Allen and Urwin, London, 219 p.
- GIRARD (M. C.), 1983. — *Recherche d'une modélisation en vue d'une représentation spatiale de la couverture pédologique. Application à une région des plateaux jurassiques de Bourgogne*. Thèse, Institut national agronomique, Paris - Grignon.
- HUGGET (R. J.), 1975. — Soil landscape systems: a model of soil genesis. *Geoderma*, vol. 13 : 1-22.
- Informatique et biosphère, 1971. — *Glossaire de pédologie. Description de l'environnement en vue du traitement informatique*. Paris, 173 p.
- ISRIC, 1990. — *Proceeding of the international workshop on procedures manual revisions for the Global Soils and Terrain Digital Database*. Wageningen, 24-26 April 1990. N.H. Batjes (editor), 25 p.
- MEIJERINK (M. J.), VALENZUELA (C.), STEWART (A.), ILWIS project, 1988. The integrated land and watershed management information system. *ITC Publication*, n° 7, Enschede, The Netherlands, 115 p.
- NORTHCOTE (K. M.), 1984. — Soil-landscapes, taxonomic units and soil profiles : a personal perspective of some unresolved problems of soil survey. *Soil survey and Land evaluation*, vol. 4, n° 1 : 1-7.
- PLANCHON (O.), 1991. — *Étude spatialisée des écoulements sur les versants et de leurs conséquences sur l'hydrologie et l'érosion. Exemple en savane humide (Booro-Borotou, Côte-d'Ivoire)*. Orstom, 340 p. multigr.
- POSS (R.), 1982. — *Étude morpho-pédologique de la région de Katiola (Côte-d'Ivoire). Cartes des paysages pédologiques et des unités morpho-pédologiques. Feuille Katiola, 1/200 000*. Notice explicative n° 94, Orstom, Paris 142 p.
- QUENSIERE (J.), 1990. — « Systémique et pluridisciplinarité : l'exemple du Programme d'étude de la pêche dans le delta intérieur du Niger ». Séminaire, *Seminfor IV*, Orstom, Paris : 475-492.
- SCANVIC (Y.), 1989. — « Recherches en télédétection au service de l'information géographique ». In : *Actes de la Journée Nationale de la Recherche géographique*, 12 juin 1989, Paris : 113-118.
- SOLTROP 89 1989. — *Actes du premier séminaire franco-africain de pédologie tropicale*, Lomé, Togo, 6-12 février 1989. Orstom, Paris, 484 p.
- SOMBRÆK (W. G), VAN DE WEG (R. F.), 1980. — *Some considerations on quality and readability of soil maps and their legends*. I.S.R.I.C., Wageningen, The Netherlands. Reprinted from annual report, 17 p.
- SOMBRÆK (W. G), BRAUN (H. M. H.), VAN DE POUW (B. J. A.), 1982. — *Exploratory soil maps and agro-climatic zone map of Kenya, scale 1/1 000 000*. Ministry of Agriculture, Nairobi, Republic of Kenya.
- Soter project 1986. — *World Soils and terrain Digital Data Base at a scale of 1/1 000 000*. Project proposal. I.S.R.I.C., Wageningen, The Netherlands, 138 p.

ANNEXE I

EXEMPLES D'ATTRIBUTS UTILISÉS POUR CARACTÉRISER LES QUATRE NIVEAUX DE DONNÉES DU SIG

Niveau 1**Exemples d'attributs utilisés pour caractériser une Unité naturelle de terrain****1. REPÉRAGE GÉOGRAPHIQUE**

- 1.1. Pays
- 1.2. Région ou province
- 1.3. Préfecture
- 1.4. Échelle de la carte -Année -Auteur -Éditeur
- 1.5. Références de la carte topographique utilisée (échelle -année -auteur)
- 1.6. Unité cartographique ou référence du type d'Unité naturelle de terrain
- 1.7. Numéro du polygone dans cette unité cartographique
- 1.8. Coordonnées géographiques de la partie centrale du polygone
- 1.9. Références de l'image-satellite utilisée
- 1.10. Références de l'image-radar utilisée
- 1.11. Références des photos aériennes utilisées

2. ENVIRONNEMENT CLIMATIQUE

Attributs 2.1 à 2.19

3. ENVIRONNEMENT GÉOMORPHOLOGIQUE

Attributs 3.1 à 3.6

4. ENVIRONNEMENT GÉOLOGIQUE

Attributs 4.1 à 4.6

5. ENVIRONNEMENT HYDROGRAPHIQUE ET HYDROLOGIQUE

- 5.1. Références de la carte ou des études hydrologiques
- 5.2. Références de la carte hydrogéologique ou des études hydrogéologiques
- 5.3. Nom du bassin versant local et régional
- 5.4. Forme du réseau hydrographique
- 5.5. Densité du réseau hydrographique
- 5.6. Distance moyenne entre les axes de drainage d'ordre 1, d'ordre 2
- 5.7. Degré d'incision du réseau hydrographique sur ces axes d'ordre 1 et 2
- 5.8. Type de régime hydrologique
- 5.9. Coefficient d'écoulement moyen annuel
- 5.10. Coefficient de ruissellement moyen annuel
- 5.11. Débit spécifique moyen annuel
- 5.12. Période et durée de tarissement de l'écoulement sur les axes d'ordre 1, 2 et 3
- 5.13. Pourcentage de terrain inondable saisonnièrement et localisation
- 5.14. Présence ou absence de nappe phréatique dans le sol
- 5.15. Nappe permanente ou saisonnière
- 5.16. Régime de la nappe
- 5.17. Présence ou absence de nappe dans le sous-sol
- 5.18. Profondeur et débit approximatif de cette nappe
- 5.19. Conductivité et pH de la nappe

6. ENVIRONNEMENT VÉGÉTAL (VÉGÉTATION NATURELLE ET SPONTANÉE)

Attributs 6.1 à 6.7

7. ENVIRONNEMENT HUMAIN

- 7.1. Aucune utilisation ou utilisation
- 7.2. Densité de population rurale
- 7.3. Mode d'exploitation dominant (si utilisation)
- 7.4. Système d'exploitation dominant
- 7.5. Système de culture
- 7.6. Modification de l'environnement géomorphologique
- 7.7. Modification de l'environnement hydrique et hydrologique
- 7.8. Modification de l'environnement végétal
- 7.9. Amélioration ou dégradation du sol
- 7.10. Type d'amélioration
- 7.11. Type dominant de dégradation
- 7.12. Degré de dégradation
- 7.13. Extension de la dégradation
- 7.14. Vitesse estimée de la dégradation
- 7.15. Causes principales de la dégradation
- 7.16. Effets hors site

8. ENVIRONNEMENT PÉDOLOGIQUE

- 8.1. Références de la carte des sols utilisée (Échelle -Année -Auteur)
- 8.2. Type de système-sol (Référenciel utilisé)
- 8.3. Nombre d'horizons majeurs et liste de ces horizons
- 8.4. Horizon ou couple d'horizons diagnostiques
- 8.5. Références du pédon ou des deux pédons dominants (IRB ou légende FAO)
- 8.6. Régime hydrique général du système-sol
- 8.7. Caractéristiques hydriques à l'échelle du bassin versant élémentaire
- 8.8. Bilan hydrique annuel à l'échelle du bassin versant élémentaire

9. ZOOM SUR UN SECTEUR DE RÉFÉRENCE DU POLYGONE

Transition vers le niveau 2

Niveau 2

Exemples d'attributs utilisés pour caractériser une Unité de modelé

1. REPÉRAGE

- 1.1. Pays
- 1.2. Région ou province
- 1.3. Préfecture
- 1.4. Unité cartographique ou référence du type d'Unité naturelle de terrain
- 1.5. Numéro du polygone dans cette unité cartographique
- 1.6. Nombre d'Unités de modelé (cf. Zoom au niveau 1)
- 1.7. Numéro de l'Unité de modelé
- 1.8. Pourcentage de la superficie occupée par cette Unité de modelé dans le polygone

2. ENVIRONNEMENT GÉOMORPHOLOGIQUE

- 2.1. Type de forme
- 2.2. Dénivellation
- 2.3. Gradient de pente
- 2.4. Longueur de la pente
- 2.5. Mode de raccordement avec le ou les formes voisines
- 2.6. Taux de recouvrement en surface par les cailloux et les blocs
- 2.7. Dimension des blocs
- 2.8. Affleurements rocheux. Pourcentage de terrain couvert
- 2.9. États de surface du sol

3. ENVIRONNEMENT GÉOLOGIQUE

- 3.1. Matériau originel (si 2 ou 3 formations identifiées dans le polygone)
- 3.2. Profondeur de la roche compacte

4. ENVIRONNEMENT HYDROGRAPHIQUE ET HYDROLOGIQUE

- 4.1. Présence ou absence de nappe phréatique
- 4.2. Nappe permanente ou saisonnière
- 4.3. Extension dans l'Unité de modelé
- 4.4. Durée de la présence de la nappe en mois (si saisonnière)
- 4.5. Profondeur du niveau hydrostatique au maximum saisonnier d'humidité
- 4.6. Profondeur du niveau hydrostatique au minimum saisonnier (si nappe permanente)
- 4.7. Conductivité et pH de la nappe
- 4.8. Couleur et turbidité
- 4.9. Pas de submersion ou submersion temporaire
- 4.10. Localisation et pourcentage de terrain submergé dans l'Unité de modelé
- 4.11. Périodicité et durée de la submersion
- 4.12. Hauteur de la nappe d'eau de submersion
- 4.13. Cause de la submersion

5. ENVIRONNEMENT VÉGÉTAL

- 5.1. Formation végétale dominante
- 5.2. Taxon ou famille dominante (ex: graminées, cypéracées)
- 5.3. Degré d'anthropisation

6. ENVIRONNEMENT HUMAIN

- 6.1. Aucune utilisation ou utilisation
- 6.2. Utilisation continue ou discontinue du sol
- 6.3. Rapport entre la durée des périodes de culture et de jachère
- 6.4. Mode d'exploitation
- 6.5. Type d'utilisation
- 6.6. Pratiques culturelles
- 6.7. Avec ou sans amélioration foncière
- 6.8. Amélioration avec ou sans modification du modelé
- 6.9. Nature de la modification

- 6.10. Type principal de dégradation
- 6.11. Degré le plus fréquent de dégradation
- 6.12. Vitesse estimée de la dégradation
- 6.13. Causes principales de la dégradation
- 7. ZOOM SUR UNE UNITÉ DE SOL DE CETTE UNITÉ DE MODELÉ
Transition vers le niveau 3

Niveau 3

Exemples d'attributs utilisés pour caractériser une Unité de sol

1. REPÉRAGE

- 1.1. Pays
- 1.2. Région ou province
- 1.3. Préfecture
- 1.4. Unité cartographique ou référence du type d'Unité naturelle de terrain
- 1.5. Numéro du polygone dans cette unité cartographique
- 1.6. Numéro de l'Unité de modelé (Zoom au niveau 1, cf.9)
- 1.7. Numéro de l'Unité de sol dans cette Unité de modelé (Zoom au niveau 2, cf.7)
- 1.8. Pourcentage de la superficie occupée par cette Unité de sol dans l'Unité de modelé
- 1.9. Période d'observation

2. ENVIRONNEMENT

- 2.1. État de la strate arborée
- 2.2. État de la strate arbustive
- 2.3. État de la strate herbacée
- 2.4. Abondance des résidus végétaux en surface ou absence de résidus
- 2.5. Présence ou absence de rejets de terre d'origine biologique en surface
- 2.6. Périodes de l'année où le sol est nu
- 2.7. Microrelief
- 2.8. État de surface
- 2.9. Variations saisonnières de l'état de surface
- 2.10. Façons culturales et soins culturaux
- 2.11. Amendement
- 2.12. Fumure organique
- 2.13. Fertilisation minérale
- 2.14. Intensité et localisation de la fertilisation
- 2.15. Vitesse d'infiltration de l'eau en surface
- 2.16. Amélioration du sol
- 2.17. État actuel de dégradation de la couche superficielle du sol ou de la couche arable

3. SOL

- 3.1. Nombre de profils de sol utilisés pour la sélection du profil de référence ou utilisation d'un seul profil considéré comme représentatif
- 3.2. Type de profil: U-G-D
- 3.3. Présence ou absence de marques d'hydromorphie
- 3.4. Hydromorphie constatée sur le terrain (présence de nappe par exemple)
- 3.5. Profondeur d'apparition de l'hydromorphie
- 3.6. Niveau hydrostatique maximum atteint par la nappe au cours d'une année à pluviosité «normale»
- 3.7. Profondeur atteinte par le front de dessiccation au cours du cycle hydrique annuel
- 3.8. Longueur (en jours) de la période végétative au cours d'une année
- 3.9. Succession verticale des horizons — Profondeur de la limite supérieure et inférieure de chacun
- 3.10. Succession verticale des couches et profondeur des limites (4 couches au maximum)
- 3.11. Profondeur d'enracinement possible pour les plantes ligneuses / pour les plantes herbacées
- 3.12. Épaisseur du matériau d'altération (en mètres)
- 3.13. Texture du matériau d'altération
- 3.14. Type d'altération (minéraux dominants)
- 3.15. Références taxonomiques du profil représentatif de l'Unité de sol : légende FAO, CPCS, Soil Taxonomy, autre classification, Dénomination vernaculaire et langue utilisée
- 3.16. Régime hydrique et thermique (selon les normes de la Soil Taxonomy)

4. ZOOM SUR UN HORIZON DU PROFIL REPRÉSENTATIF DE CETTE UNITÉ DE SOL

Transition vers le niveau 4

Niveau 4

Exemples d'attributs utilisés pour caractériser un horizon.

1. REPÉRAGE

Attributs 1.1 à 1.11 ;

2. CARACTÈRES MORPHOLOGIQUES

- 2.1. Profondeur moyenne
- 2.2. Variations d'épaisseur dans l'unité de sol
- 2.3. Couleur, homogène ou hétérogène
- 2.4. Teinte (hue), valeur et chroma — à l'état sec/état humide (réf. Munsell) d'une ou de deux couleurs (si celle-ci est hétérogène)
- 2.5. Présence ou absence de taches
- 2.6. Distribution des taches
- 2.7. Couleur des taches dominantes — à l'état sec/à l'état humide
- 2.8. Texture
- 2.9. Teneur en éléments grossiers (supérieurs à 2 mm)
- 2.10. Pourcentage d'éléments à hydroxydes et oxydes.
- 2.11. Pourcentage d'éléments calci-magnésiques
- 2.12. Structure
- 2.13. Tenue des agrégats immergés dans l'eau
- 2.14. Vitesse d'humectation des agrégats par l'eau
- 2.15. Porosité
- 2.16. Consistance à l'état sec/à l'état humide
- 2.17. Degré d'activité biologique et type d'activité dominante (exemple : termites, vers de terre).
- 2.18. Densité des racines et grosseur
- 2.19. Mode de pénétration des racines
- 2.20. Type de transition avec l'horizon supérieur
- 2.21. Type de transition avec l'horizon inférieur

3. PROPRIÉTÉS MINÉRALOGIQUES

Attributs 3.1 à 3.4.

4. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

Attributs 4.1 à 4.10

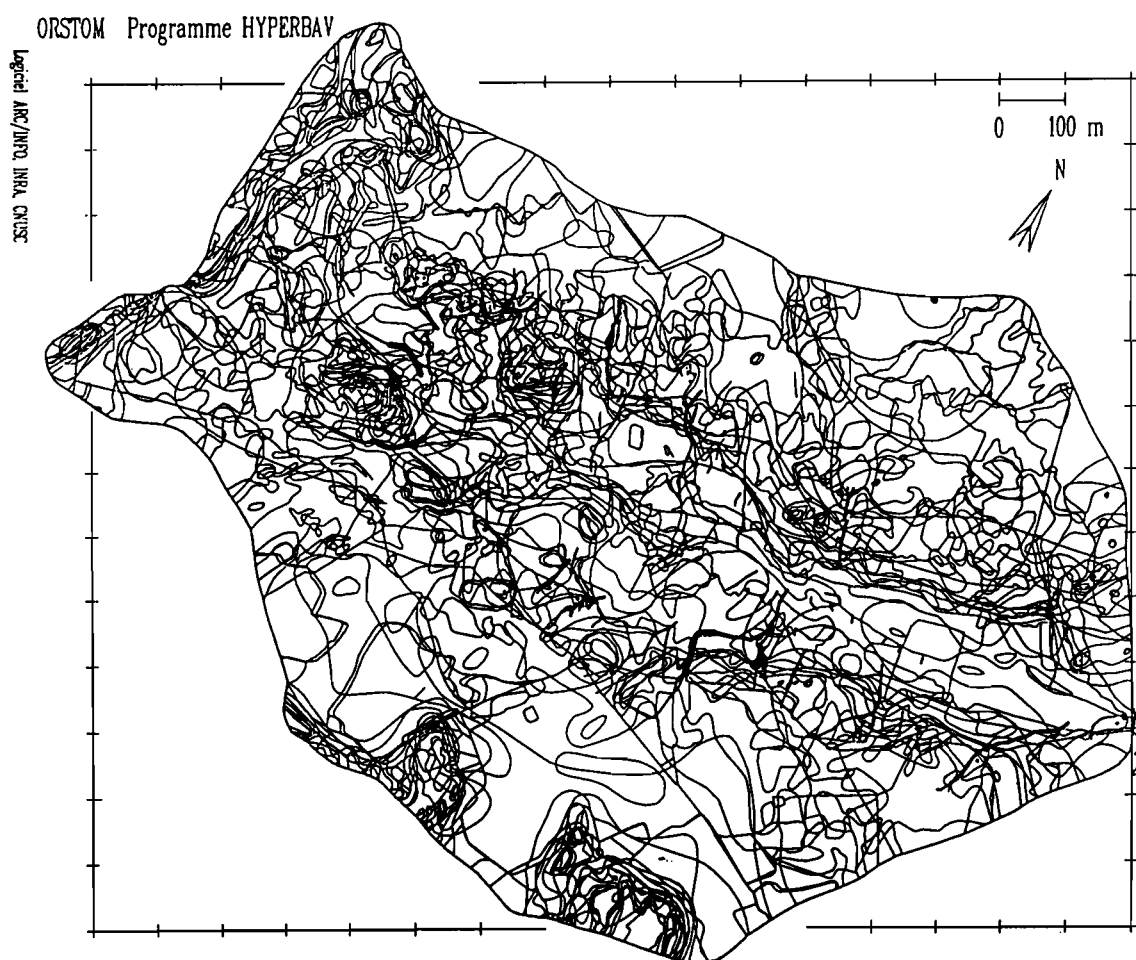
5. PROPRIÉTÉS CHIMIQUES ET PHYSICO-CHIMIQUES

- 5.1. pH H₂O
 - 5.2. pH HCl
 - 5.3. Carbone %
 - 5.4. Azote %
 - 5.5. Phosphore total
 - 5.6. Phosphore assimilable
 - 5.7. Calcium échangeable
 - 5.8. Magnésium échangeable
 - 5.9. Potassium échangeable
 - 5.10. Sodium échangeable
 - 5.11. Aluminium échangeable
 - 5.12. C.E.C. de la terre fine à pH 7,0
 - 5.13. Taux de saturation en bases
 - 5.14. C.E.C. effective au pH du sol
 - 5.15. Capacité d'échange d'anion
 - 5.16. Acidité d'échange
 - 5.17. Réserves en calcium
 - 5.18. Réserves en magnésium
 - 5.19. Réserves en potassium
 - 5.20. Réserves en sodium
 - 5.21. Calcaire total (CO₃Ca)
 - 5.22. Gypse (Ca SO₄, 2H₂O)
 - 5.23. Fer total
 - 5.24. Fer dithionite
 - 5.25. Fer oxalate
 - 5.26. Microéléments — Déficience ou excès
 - 5.27. Taux de sodium échangeable
 - 5.28. Conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée
- ##### 6. PROPRIÉTÉS HYDRIQUES
- 6.1. Humidité équivalente
 - 6.2. Capacité au champ
 - 6.3. Humidité au pF 4,2

- 6.4. Taux d'humidité au minimum saisonnier
- 6.5. Variation saisonnière du taux d'humidité
- 6.6. Définition générale du régime hydrique
- 6.7. Durée de la saturation par l'eau (si période de régime saturé)
- 6.8. Périodicité de la saturation
- 6.9. Durée maximale des périodes de saturation
- 6.10. Durée de la période de dessiccation (humidité inférieure à la teneur en eau au pF 4,2)
- 6.11. Nombre de millimètres de pluie nécessaires pour que la teneur en eau de l'horizon atteigne la capacité au champ après la période de dessiccation saisonnière
- 6.12. Teneur en eau utilisable par les plantes
- 6.13. Conductivité hydraulique de l'horizon
- 7. REPÉRAGE DES COUCHES
 - 7.1. Couche 1 — Dénomination — Limites supérieure et inférieure
 - 7.2. Couche 2 — Dénomination — Limites supérieure et inférieure
 - 7.3. Couche 3 — Dénomination — Limites supérieure et inférieure
 - 7.4. Couche 4 — Dénomination — Limites supérieure et inférieure
- 8. DESCRIPTION DES STRATES DE LA VÉGÉTATION
- 9. DESCRIPTION DE L'IMPLANTATION RACINAIRE

ANNEXE II

EXEMPLE DE CROISEMENT DE FICHIERS MONOTHÉMATIQUES DANS UN SIG, UTILISANT LE LOGICIEL ARC-INFO.



Limites des 6 700 polygones obtenus par le croisement des cinq cartes numérisées.
 Boundaries of the 6 700 polygones drawn by overlaying the five digitalized maps.

Cinq fichiers différents ont été numérisés dans le SIG à partir des données recueillies dans un bassin versant couvrant 1,36 km² : (1) la carte des sols, (2) la carte des gravillons, (3) la carte des cuirasses, (4) la carte des organisations pelliculaires de surface, (5) la carte du couvert végétal.

Le croisement de ces cinq fichiers génère la carte ci-dessus, qui comporte 6 700 polygones, dont la superficie moyenne est équivalente à un carré de 15 mètres de côté.

Cet exemple, bien que caricatural, montre cependant la difficulté pour un utilisateur de ce type de SIG à exploiter les données pour des applications pratiques.

Extrait de « Etude spatialisée des écoulements ssur les versants et de leurs conséquences sur l'hydrologie et l'érosion ». Exemple en savane humide (Booro-Borotou, Côte-d'Ivoire). Olivier Planchon, 1991, p. 118.

Adaptation du système international de mesure (SI) à la chimie des sols

1. Mesures de longueur

Le terme familier de micron (μ) n'est plus acceptable et doit être remplacé par micromètre ($\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$).

Dans les mesures de très petites dimensions, on utilisera :

nanomètre ($\text{nm} = 10^{-9} \text{ m}$)

picomètre ($\text{pm} = 10^{-12} \text{ m}$).

Le terme familier d'angström ($\text{\AA} = 10^{-10} \text{ m}$) n'est plus acceptable non plus car l'exposant n'est pas un multiple de trois.

2. Dans les mesures de volume rappelons que :

Les unités de base sont le m^3 et ses dérivés (cm^3 , dm^3) mais aussi litre ($\text{L} = \text{dm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$) Attention, c'est un L majuscule !

millilitre ($\text{mL} = \text{cm}^3 = 10^{-6} \text{ m}^3$)

microlitre ($\mu\text{L} = \text{mm}^3 = 10^{-9} \text{ m}^3$)

Il en résulte que les unités de concentration de sels (exprimées en mole — voir le paragraphe 3 pour définition) dans les eaux d'irrigation sont par exemple :

(1 mol/m^3) devient $1 \text{ mol m}^{-3} = 1 \text{ mmol L}^{-1}$ (à la place de 1 mmol/L).

On retiendra qu'il devient préférable de noter toute unité figurant au dénominateur, sous forme de produit de la même unité affectée d'un exposant négatif au numérateur, et la barre oblique est remplacée par un blanc.

La masse atomique relative A_r , antérieurement dénommée poids atomique, est la masse moyenne d'un atome d'élément comparée à 1/12 de la masse de l'atome de carbone 12.

La valeur A_r est un rapport *sans unité*, de même M_r , la masse moléculaire.

3. Concentration

Symbole c

C'est la quantité de matière divisée par le volume de la solution qui la contient. Elle se mesure en mol m^{-3} si la masse molaire est connue et en kg m^{-3} ou g L^{-1} si elle ne l'est pas. On accepte aussi

mol L^{-1} ($= \text{mol dm}^{-3}$)

ex. : une solution de concentration $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ est dite solution $0,1 \text{ M}$ ou $0,1 \text{ M}$.

mmol L^{-1} est identique à mol m^{-3} .

Remarque : La molarité — exprimée en mol kg^{-1} — est préférée pour les conditions non isothermiques parce que, contrairement à la concentration, elle est indépendante de la température.

La définition recommandée de l'équivalence est désormais la suivante :

L'équivalent est l'entité qui serait équivalente

— dans une réaction acide-base, à une entité titrable d'ions H^+ ou protons (p^+),

— ou dans une réaction rédox, à une entité d'électrons, e^- ; ainsi :

— 1 équivalent de Cl^- serait établi comme 1 mole de 1 Cl^- ;

— 1 équivalent de H_2SO_4 comme 1 mole de $1/2 \text{ H}_2\text{SO}_4$;

— 1 équivalent de Al^{3+} comme 1 mole de $1/3 \text{ Al}^{3+}$, etc.

Les rapports de 1, 1/2, 1/3, etc. sont les facteurs d'équivalence.

L'équivalence peut être établie à partir de la connaissance du facteur d'équivalence et de celle de la formule chimique des espèces.

Les capacités d'échange des cations (CEC) et des anions (CEA), traditionnellement calculées en équivalents par 100 g, deviennent dans le système international de mesure :

La mole (p^+) kg^{-1} et la mole (e^-) kg^{-1} par référence aux charges cationiques ou anioniques qui neutralisent les sites d'échange.

Supposons un sol contenant 4 meq. de K^+ et 6 meq. de Ca^{2+} échangeables par 100 g de sol, ayant une CEC de 11 meq./100 g ; dans le nouveau système, on doit écrire impérativement :

— 40 mmol (K^+) kg^{-1} et 60 mmol ($1/2 \text{ Ca}^{2+}$) kg^{-1} , et donc la somme des bases échangeables sera :

— 100 mmol (+) kg^{-1} au total et la capacité d'échange cationique de 110 mmol (+) kg^{-1} ou 11 cmol (+) kg^{-1} .

4. Pression

L'atmosphère standard est celle qui équilibre une colonne de 0,76 m de mercure.

$1 \text{ atm.} = 0,76 \text{ m} \times 13,595 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3} \times 9,806 \text{ m s}^{-2}$
 $= 101\,300 \text{ N m}^{-2}$

1 pascal $\text{Pa} = 1 \text{ N m}^{-2}$ et par conséquent :

1 atm. doit être écrit $101\,300 \text{ Pa} = 101,3 \text{ kPa} = 1\,013 \text{ hPa} = 1\,013 \text{ mb}$

1 bar = 10^5 Pa . Mais le bar est à déconseiller complètement pour la même raison que l'angström.

5. Conductivité

On utilisait le mmho cm^{-1} jusqu'à maintenant. La conductivité électrique des solutions est désormais calculée en siemens : S m^{-1} .

1 decisiemens/m = 1 millisiemens/cm ;

donc 1 mmho cm^{-1} devient $1 \text{ dS m}^{-1} = 1 \text{ mS cm}^{-1}$.

Comme le micromho/cm équivalait à $10^{-3} \text{ dS m}^{-1}$ ($10^{-1} \text{ mS m}^{-1}$), son utilisation n'est plus acceptable à cause du multiplicateur 10^{-4} hors des normes internationales.

TABLEAU I
Exemple des unités préférées pour exprimer les grandeurs physiques dans les journaux de l'ASA (American Society of Agronomy)

Grandeur	Application	Unité	Symbole
Surface	Surface spécifique du sol	mètre carré par kilo	m ² kg ⁻¹
	Autres surfaces	centimètre carré mètre carré hectare	cm ² m ² ha
Capacité d'échange	Sol	mole (+) par kilo	mol (+) kg ⁻¹
Concentration	Liquide à poids mol. conn	mole par litre	mol L ⁻¹
	si poids mol. inconnu	gramme par litre	g L ⁻¹
	Engrais	kilo par hectare	kg ha ⁻¹
	Gaz	gramme par mètre cube	g m ⁻³ (mg dm ⁻³)
	Pression osmotique	pascal	Pa
Densité	Densité apparente du sol	mégagramme par mètre cube	Mg m ⁻³
Conductiv. électr.	Tolérance au sel	décisiemens par mètre	dS m ⁻¹
Longueur	Profondeur du sol	mètre	m
		centimètre	cm

TABLEAU II
Facteurs de conversion des unités non conventionnelles en unités SI

Unités non internationales	multipliées par :	pour obtenir :	Unités internationales
Acre	0,405	hectare, ha, (10 ⁴ m ²)	
Atmosphère	0,101	mégapascal, MPa, (10 ⁶ Pa)	
Bar	10 ⁻¹	mégapascal, MPa, (10 ⁶ Pa)	
Calorie	419	joule, J	
Degré d'angle	1,75 x 10 ⁻²	radian, rad	
Dyne	10 ⁻⁵	newton, N	
Erg	10 ⁻⁵	joule, J	
Foot	0,305	mètre, m	
Gallon	4,546 ⁻¹	litre, L, (10 ⁻³ m ³)	
Millimho par centimètre	1	décisiemens par mètre, dS m ⁻¹	
Pound	0,454	gramme, g	
Quart (liquide)	0,946	litre, L	
Température (°F) — 32	0,555	température (°C)	

Note de la rédaction, novembre 1990.

LES SOLS FERRALLITIQUES ET LEUR RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE

Tome 1 - Introduction générale. Les sols ferrallitiques, leur identification et environnement immédiat,
P. Ségalen, 1994, 198 p., Études et Thèses, 150 F

Tome 2 - Les sols ferrallitiques : les facteurs de formation et les sols ferrallitiques en Amérique,
P. Ségalen, 1995, 170 p., Études et Thèses, 150 F

Tome 3 - Les sols ferrallitiques en Afrique et en Extrême-Orient, Australie et Océanie. Conclusions générales,
P. Ségalen, 1995, 204 p., Études et Thèses, 150 F

400 F les trois tomes

Les sols ferrallitiques sont les sols dominants dans la zone des Tropiques Humides, résultat d'une altération poussée qui privent les minéraux des roches-mères des métaux alcalins et alcalino-terreux et d'une partie de la silice. Ceci favorise la synthèse des minéraux argileux kandiques, des oxydes et hydroxydes de fer, des hydroxydes d'aluminium et, à un moindre degré, des oxydes de titane, manganèse et quelques autres.

A l'intérieur de cette zone prévalent les roches-mères granito-gneissiques, les sédiments d'origine continentale, les roches volcaniques basiques. La topographie est plane, mais souvent tourmentée dans le détail. Les conditions climatiques sont caractérisées par des pluies abondantes et chaudes. La végétation forestière favorise la pénétration de l'eau dans les sols et leur conservation. Le temps nécessaire à l'altération des roches et à la différenciation en horizons est toujours très long.

Les sols ferrallitiques sont peu abondants dans la zone caraïbe, mais prennent une grande ampleur en Amérique du Sud où ils sont connus jusque vers 30 ° Lat. sud. En Afrique de

l'Ouest, les sols ferrallitiques prennent de l'importance au sud de 13 ° Lat. nord; ils concernent toute l'Afrique centrale et s'étendent jusque vers 30 ° Lat. sud, alors que l'Afrique orientale est moins touchée par la ferrallitisation. Au large, Madagascar est largement couverte par les sols ferrallitiques. Ce n'est pas le cas de l'Inde où, pourtant, les premières latérites ont été découvertes. L'Extrême-Orient continental ou insulaire, aux nombreuses îles volcaniques, est largement couvert de sols ferrallitiques.

Ces sols sont fragiles lorsqu'ils sont privés de leur couverture forestière. En raison de leur faible degré de fertilité, ils doivent être cultivés avec le plus grand soin.

L'ouvrage comprend un exposé sur les conditions de formation et les caractéristiques des sols dans les différentes parties du monde, un dossier photographique, de nombreux tableaux comportant les données climatiques, les analyses de nombreux sols, la correspondance entre les appellations des sols dans divers systèmes pédologiques, ainsi que de nombreuses figures et cartes de répartition des sols. Chaque tome comporte une abondante bibliographie et un index géographique.

Veuillez adresser vos commandes à votre libraire habituel ou à :

ORSTOM éditions
Diffusion

32, avenue Henri Varagnat / F - 93143 Bondy cedex
Téléphone : (1) 48 02 55 00 / Télécopie : (1) 48 47 30 88



INSTRUCTIONS AUX AUTEURS

Les « Cahiers de Pédologie » publient en français et anglais les résultats de travaux originaux dans toutes les disciplines concernées par l'étude fondamentale et appliquée des sols des régions intertropicales et subtropicales. Sont également admis les articles théoriques d'intérêt général ainsi que des travaux de synthèses régionales. Des notes techniques ou des comptes rendus de congrès ou de colloques pourront être insérés lorsqu'ils présenteront certains aspects originaux intéressant l'évolution de la Pédologie.

Les manuscrits envoyés ne doivent pas avoir été proposés à un autre périodique pour publication antérieure ou simultanée.

Ils seront acceptés dans la mesure où leur qualité scientifique est reconnue par un arbitrage international. Il ne doivent pas être purement descriptifs ou seulement d'intérêt local.

Manuscrits

Les manuscrits dactylographiés, avec double interlignage et une marge de 4 cm (soit 25 lignes de 60 signes par ligne) seront expédiés en triple exemplaire à l'éditeur scientifique, Cahiers de Pédologie, Orstom, (C.S. 2), 211, rue La Fayette, 75480 Paris, cedex 10. Ils ne doivent pas excéder 30 pages pour un article, illustrations comprises et 5 pages pour les notes.

Les manuscrits électroniques seront également acceptés. Ils doivent être saisis « au kilomètre » sous logiciel word (MS/DOS ou Mac) sans préoccupation de mise en page. En revanche, il est impératif de veiller à la structure logique du texte (numérotation décimale : 1., 1.1., 1.1.1., 1.2., etc.). Une sortie papier devra accompagner les manuscrits électroniques.

La première page portera le titre dans la langue de rédaction, le nom et le prénom de(s) l'auteur(s), l'affiliation et l'adresse.

Le ou les résumés figureront sur la deuxième page : un résumé dans la langue utilisée et un résumé en anglais plus substantiel précédé de la traduction du titre de l'article dans le cas d'un manuscrit en français ou espagnol ; un résumé français plus substantiel dans le cas d'un manuscrit en anglais ou espagnol ; un résumé en espagnol ou portugais est souhaitable pour les articles en français ou en anglais concernant l'Amérique du Sud. Chaque résumé sera suivi de mots clés (dix au maximum) dans la langue correspondante.

Le texte de l'article débutera en haut de la page suivante.

Les sous-titres seront en minuscules et non soulignés. L'emploi de chiffres ou de lettres permettant de mieux comprendre la hiérarchie des sous-titres est recommandé, mais cette numérotation ne sera pas obligatoirement conservée à l'impression définitive.

Les noms d'auteurs cités dans le texte doivent être en minuscules et on évitera de façon générale l'emploi des capitales. Seuls seront soulignés les mots à imprimer en italique.

Les grandeurs seront exprimées dans le système métrique et les températures en degrés Celsius. Les quantités représentant une mesure et les dénombrements seront exprimés en chiffres (ex. : 12 kg, 25 m).

L'éditeur scientifique se réserve le droit d'ajuster le style des manuscrits à certaines normes d'uniformité.

Figures et tableaux

Les figures et tableaux seront accompagnés d'une légende explicite rédigée dans la langue de rédaction avec si possible une traduction anglaise ou française. Ces légendes seront rassemblées sur une même feuille et placée en fin de manuscrit.

Dessins et graphiques seront exécutés au trait, à l'encre de Chine, sur papier blanc ou calque. Il est recommandé de noter au crayon bleu

le nom de l'auteur et le numéro de la figure en chiffres arabes sur les originaux.

Des reproductions des figures seront adressées lors de la soumission du manuscrit. Les originaux ne devront être expédiés que lorsque le manuscrit aura été accepté définitivement.

Pour les figures et les tableaux, la taille des signes et l'épaisseur des traits seront choisies en fonction de la réduction souhaitée qui sera indiquée au crayon bleu sur les originaux ; celle-ci tiendra compte soit de la justification à la colonne (largeur 8 cm, hauteur maximale 20), soit à la page (largeur 17 cm, hauteur maximale 20).

Les résultats numériques seront présentés sous forme de tableaux ou de graphiques, mais pas sous les deux formes pour une même série de résultats. Les tableaux, numérotés en chiffres romains au crayon bleu, seront présentés chacun sur une feuille séparée. Ne sont acceptés que ceux qui auront été tapés avec un ruban machine neuf et des caractères propres sur du papier très blanc ou exécutés sur calque. La saisie des tableaux sur micro-ordinateur est souhaitée : utiliser les logiciels « Word » ou « Excel » en créant impérativement les colonnes à l'aide de la touche tabulation, et joindre la disquette avec la sortie papier en précisant le logiciel utilisé et le numéro de sa version. Les tableaux sortis sur une imprimante autre que laser ne seront pas acceptés.

Dans le cas où de nombreux tableaux seraient à publier en annexe, le système des microfiches peut être utilisé. La microfiche correspondante sera jointe à la publication.

Les photographies devront être aussi nettes que possible sur papier glacé, et normalement contrastées. Elles seront présentées en tirage format 9 x 13 cm à 18 x 24 cm en rappelant au dos du tirage le numéro de la photographie et le nom de l'auteur. Il peut éventuellement être présenté des planches préparées sur papier fort.

Références bibliographiques

La liste des références bibliographiques sera présentée à part, par ordre alphabétique d'auteur. Les abréviations des titres des périodiques seront conformes à celles de l'édition la plus récente de la « Word list of Scientific Periodicals ».

PIAS (J.), 1970. — *Les formations sédimentaires tertiaires et quaternaires de la cuvette tchadienne et les sols qui en dérivent*. Mém. Orstom, n° 43.

ROBERT (M.), 1975. — Principes de détermination qualitative des minéraux argileux à l'aide de R.X. *Ann. Agron.*, 26(4) : 363-399.

ROSSIGNOL (J. P.), 1981. — *Étude de quelques sols développés sur basalte dans le nord de l'Uruguay. Essai de caractérisation du lessivage en milieu vertique*. Th. Doct. Ing., Univ. Rennes.

ROSSIGNOL (J. P.), 1983. — Les vertisols du nord de l'Uruguay. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, Vol. XX, n° 4 : 271-291.

Épreuves et tirés à part

L'auteur mentionné en premier recevra une seule épreuve. Il devra la retourner corrigée selon les signes typographiques conventionnels dans les meilleurs délais au Secrétariat des éditions, B.P. 5045, 34032 Montpellier cedex, France. Les corrections d'auteur (modifications du texte ou des illustrations) seront facturées aux auteurs.

L'allocation Orstom est de 40 tirés à part par auteur, 30 pour 2 auteurs et de 20 à partir de 3 auteurs.

Des tirés à part supplémentaires peuvent être commandés à titre onéreux au plus tard en retournant les épreuves.

INSTRUCTIONS TO AUTHORS

Original research papers on basic and applied studies of soils in the intertropical and subtropical zones are published in French and English in the « Cahiers de Pédologie ». General theoretical papers are also accepted along with regional syntheses. Technical notes or reports from congresses or symposia could be published when they feature certain original aspects concerning the evolution of soil science.

Manuscripts should not have been submitted previously or simultaneously to other journals for publication.

Manuscripts are accepted for publications subject to approval of an international panel of editors. They should not be purely descriptive or be only of limited regional interest.

Manuscripts

Manuscripts should be typed double spaced with margins of 4 cm and sent in triplicate to the editor, « Cahiers de Pédologie » Orstom

(C.S. 2), 211, rue La Fayette, 75480 Paris, cedex 10, France. They must not exceed 30 pages (5 for technical notes).

Electronic documents will also be accepted. They must be typed « in bulk » using the Word Software (MS/DOS or Macintosh) without formatting. On the contrary, it is necessary to take care of the logical structure of the text (American paging). An output specimen will accompany the electronic documents.

The first page will contain the title in the original language as well as the complete names of the author(s), their affiliation and address.

The second page will contain the abstract(s): an abstract in the original language and a longer English abstract headed by the translation of the title if the manuscript is written in French or in Spanish, a longer French abstract if the manuscript is written in English or in Spanish; it would be advisable to get a Spanish or Portuguese abstract for the papers written in French or in English concerning South America. Each abstract will be followed by key words (ten to a maximum) in the corresponding language. The text of the paper should begin at the top of the following page.

Subtitles will be typed in lower case letters and will not be underlined. Numbering the subtitles to make their sequence more obvious is possible but it will not be necessarily preserved when published.

The names of the authors mentioned in the text must be typed in lower case letters and, in general, the use of capital letters should be avoided. Only words to be printed in italics should be underlined.

The metric system will be used and temperatures expressed in degrees Celsius. Quantities representing a measurement and enumerations will be expressed by figures (eg. 12 kg, 25 m).

The Editor reserves the right to adjust the style of the papers to make them consistent.

Figures and tables

Figures and tables will be accompanied by an explicit legend written in the original language with as far as possible an English or French translation. These legends will be assembled on the same page and placed at the end of the manuscript.

Drawings and graphs will be made with Indian ink on white or tracing paper. It is recommended to write on the originals the name of the author and the number of the figure using Arabic numerals with a blue pencil.

Reproductions of figures should be sent with the manuscripts. Originals should be sent only when the manuscript has been accepted.

Concerning figures and tables, the size of lettering and the thickness of lines should be selected taking into account the reduction required

which should be indicated with a blue pencil on the originals. The reduced drawing should fit the dimensions of a column (width 8 cm, maximum height 20) or of a page (width 17 cm, maximum height 20).

Experimental results will be expressed in tabular form or diagrammatically, but not both. Tables will be numbered in Roman figures with blue pencil and typed on a separate page. Only those clearly typed with a new ribbon on very white paper or made on tracing paper will be accepted. Tables not issued from a laser beam printer will not be accepted. Tables in computer format are preferred. As soft you can use Word or Excel setting columns with table key. Send us the floppy disk with the paper matrix and indicate which application and its version.

If numerous tables are required in a paper, these can be submitted and published in microfiche form.

Photographs should be as sharp as possible on glossy paper and with normal contrast. They will be presented in prints of 9 x 13 cm to 18 x 24 cm with mentioning on their back the number of the photograph and the name of the author. Plates can be presented on strong paper.

Reference list

References should be listed alphabetically by first author's name and chronologically. Abbreviations of journal titles should follow the latest edition of the « World List of Scientific Periodicals ».

PIAS (J.), 1970. — *Les formations sédimentaires tertiaires et quaternaires de la cuvette tchadienne et les sols qui en dérivent*. Mém. Orstom, n° 43.

ROBERT (M.), 1975. — Principes de détermination qualitative des minéraux argileux à l'aide de R.X. *Ann. Agron.*, 26(4) : 363-399.

ROSSIGNOL (J. P.), 1981. — *Étude de quelques sols développés sur basalte dans le nord de l'Uruguay. Essai de caractérisation du lessivage en milieu vertique*. Th. Doct. Ing., Univ. Rennes.

ROSSIGNOL (J. P.), 1983. — Les vertisols du nord de l'Uruguay. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, Vol. XX, n° 4 : 271-291.

Proofs and reprints

The author mentioned in the first place will receive only one proof. He must return it corrected using the conventional typographic marks as soon as possible to the Secrétariat des éditions, B.P. 5045, 34032 Montpellier cedex, France.

The corrections made by the authors (modifications in the text or in illustrations) will be paid by them.

Orstom will provide each author with 40 reprints per author in case of sole, with 30 per dual authorship and with 20 per author in case of multiple authorship.

INSTRUCCIONES A LOS AUTORES

Additional reprints can be ordered subject to payment when sending back the proofs.

Los « Cahiers de Pédologie » publican en francés e inglés los resultados de trabajos originales dentro de todas las disciplinas concernientes al estudio fundamental y aplicado de los suelos de las zonas intertropicales y subtropicales. Son igualmente admitidos los artículos teóricos de interés general así como las síntesis regionales. Notas técnicas o informes relativos a congresos o coloquios podrán ser publicados cuando presenten ciertos aspectos originales relativos a la evolución de la pedología.

Los manuscritos no deben haber sido propuestos a otra revista para una publicación anterior o simultánea.

Son aceptados en la medida en que su calidad científica sea reconocida por un arbitraje internacional. Ellos no deben ser puramente descriptivos o solamente de interés local.

Manuscritos

Se mecanografiarán los manuscritos con doble interlínea y un margen de 4 cm y se los expedirán en triple ejemplar al editor :

Cahier de Pédologie, Orstom, (C.S. 2), 211, rue La Fayette, 75480 Paris, cedex 10, France. No deben exceder 30 páginas ilustraciones incluidas y las notas no deben exceder 5 páginas.

También se aceptarán los documentos electrónicos. Deberán ser mecanografiados « en montón » con el proceso de datos Word (MS/DOS o Macintosh) sin compaginación. En cambio, es necesario cuidar la

estructura lógica del texto (numeración americana). Una salida en forma impresa deberá acompañar los documentos electrónicos.

La primera página llevará el título en la lengua de redacción, así como el nombre y el apellido de los autores, su afiliación y su dirección.

La segunda página llevará el o los resumen(es) : un resumen en la lengua de redacción y un resumen en inglés más sustancial precedido por la traducción del título del artículo en caso de un manuscrito en francés o en español ; un resumen en francés más sustancial en caso de un manuscrito en inglés o en español. Se recomienda redactar un resumen en español para los artículos en francés o en inglés concernientes a la América del Sur. Cada resumen será seguido por palabras claves (diez como máximo) en la lengua correspondiente. El texto del artículo figurará en la parte superior de la página.

Los subtítulos serán en minúsculas y no subrayados. El uso de cifras o letras permitirá entender mejor la jerarquía de los subtítulos pero esa numeración no se conservará necesariamente cuando se publique el manuscrito.

Los nombres de los autores mencionados en el texto deben ser en minúsculas y se evitará de manera general el empleo de mayúsculas. Sólo serán subrayadas las palabras a imprimir en itálica.

Se utilizará el sistema métrico y las temperaturas se expresarán en grados Celsius. Las cantidades que representan una medida y enumeraciones se expresarán en cifras (por ejemplo : 12 kg, 25 m).

El editor científico se reserva el derecho de ajustar el estilo de los manuscritos a ciertas normas de uniformidad.

Figuras y tablas

Figuras y tablas serán acompañadas por una leyenda explícita redactada en la lengua de redacción con una traducción en inglés o en francés en la medida de lo posible. Esas leyendas serán reunidas sobre la misma hoja y puestas al fin del manuscrito.

Dibujos y gráficos serán ejecutados a trazo con tinta china sobre papel blanco o cebolla. Se recomienda mencionar en los originales y con cifras árabes el apellido del autor y el número de la figura con lápiz azul.

Reproducciones de figuras serán enviadas juntamente con el manuscrito. Los originales deberán ser enviados solamente cuando el manuscrito será aceptado definitivamente.

En lo que concierne a las figuras y a las tablas, el tamaño de los signos y el grosor de los trazos serán elegidos en función de la reducción deseada que será indicada con lápiz azul sobre los originales tomando en cuenta la justificación de la columna (ancho 8 cm, alto máximo 20) o de la página (ancho 17 cm, alto máximo 20).

Se presentarán los resultados numéricos en tablas o gráficos, pero no en las dos formas. Las tablas serán numeradas en cifras romanas con lápiz azul y presentadas sobre una hoja individual. Se aceptarán sólo las tablas que se mecanografiarán con una cinta de máquina nueva y letras de molde limpias sobre papel blanco o papel cebolla. Se aceptarán sólo las tablas impresas con una máquina de laser. La captura de los cuadros en la computadora es aconsejada: utilizar los programas « Word » o « Excel ». Enviar conjuntamente la diskette y la impresión en papel, precisando el programa utilizado y el número de su versión.

En caso de que numerosas tablas fueran publicadas adjuntas, las microfichas pueden ser utilizadas. Se expedirá la microficha correspondiente con la publicación.

Las fotografías deberán ser lo más de foco posible sobre papel glaseado y normalmente contrastadas. Se presentarán en positivado con

el formato 9 x 13 cm a 18 x 24 cm mencionando en el reverso el número de la fotografía y el apellido del autor. Podrán ser presentadas láminas sobre papel grueso.

Referencias bibliográficas

La lista de referencias bibliográficas será presentada aparte, en orden alfabético de autores. las abreviaciones de los títulos de los periódicos serán conformes con las de la más reciente edición de « Word List of Scientific Periodicals ».

PIAS (J.), 1970. — *Les formations sédimentaires tertiaires et quaternaires de la cuvette tchadienne et les sols qui en dérivent*. Mém. Orstom, n° 43.

ROBERT (M.), 1975. — Principes de détermination qualitative des minéraux argileux à l'aide de R.X. *Ann. Agron.*, 26(4) : 363-399.

ROSSIGNOL (J. P.), 1981. — *Étude de quelques sols développés sur basalte dans le nord de l'Uruguay. Essai de caractérisation du lessivage en milieu vertique*. Th. Doct. Ing., Univ. Rennes.

ROSSIGNOL (J. P.), 1983. — Les vertisols du nord de l'Uruguay. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, Vol. XX, n° 4 : 271-291.

Pruebas e impresos a parte

El autor mencionada en primera posición recibirá una sola prueba. Tendrá que devolverla corregida según los signos tipográficos convencionales en el más corto tiempo posible al Secrétariat des éditions, B.P. 5045, 34032 Montpellier cedex 1, France.

Las correcciones de autor (modificaciones del texto o de las ilustraciones) serán facturadas a los autores.

Orstom otorga gratuitamente cuarenta impreso a parte por autor treinta por autor cuando hay dos autores y veinte por autor cuando hay más de dos autores. Impresos a parte suplementarios podrán ser pedidos con coste adicional.

Photocomposition et impression
réalisées par



31240 L'UNION (Toulouse)
Tél. (16) 61.37.64.70
Dépôt légal : Octobre 1995

Sommaire / Contents

ESCADAFAL (R.) — Avant-propos/ <i>Foreword</i>	3
ESCADAFAL (R.) — Introduction/ <i>Introduction</i>	5
BEDIDI (A.), CERVELLE (B.) — Diffusion de la lumière par des particules minérales/ <i>Scattering of light by mineral particles</i>	7
ESCADAFAL (R.), GOUINAUD (C.), MATHIEU (R.), POUGET (M.) — Le spectroradiomètre de terrain : un outil de la télédétection et de la pédologie/ <i>The field spectrometer : a tool for remote sensing and for soil science</i>	15
JACQUEMOUD (S.), BARET (F.), HANOCQ (J.-F.) — Modélisation de la réflectance spectrale et directionnelle des sols. Application au concept de droite des sols/ <i>Modeling spectral and directional reflectance of soils. Application to the soil line concept</i>	31
MOUGENOT (B.) — Effets des sels sur la réflectance et télédétection des sols salés/ <i>Effect of salts on reflectance and remote sensing of salt affected soils</i>	45
HENQUIN (B.), TOTTE (M.) — Le traitement d'un modèle numérique de terrain pour la caractérisation du milieu physique. Cas d'étude dans le sud-ouest du Burkina Faso/ <i>Digital terrain model for characterizing the environment. Case study in the south-west of Burkina Faso</i>	55
MANIÈRE (R.), BASSISTY (E.), CELLES (J.-C.), MELZI (S.) — Utilisation de la télédétection spatiale (données XS de Spot) pour la cartographie de l'occupation du sol en zones arides méditerranéennes : exemple d'Aïn Oussera (Algérie)/ <i>Spot-XS remote sensing data for land use mapping in arid Mediterranean zones: example of Ain Oussera (Algérie)</i>	67
MATHIEU (R.), KING (C.), LE BISSONNAIS (Y.) — Contribution de données multitemporelles Spot à l'identification des risques d'érosion. L'exemple des sols limoneux du nord de la France/ <i>Contribution of multitemporal Spot data for erosion hazard assessment: example of loamy soil of northern France</i>	81
SEYLER (F.), VOLKOFF (B.) — Spatialisation d'une étude pédologique localisée sous forêt tropicale dense à l'aide d'une image Thematic Mapper/ <i>Spatialization of a local soil study under dense tropical forest using a Landsat Thematic Mapper image</i>	95
BRABANT (P.) — Pédologie et système d'information géographique. Comment introduire les cartes de sols et les autres données sur les sols dans les SIG ?/ <i>Soil science and geographical information system. How to introduce soil maps and the other soil data into GIS ?</i>	107
Adaptation du système international de mesure (SI) à la chimie des sols	137