

Téledétection de la surface des sols arides

Concept et applications

INTRODUCTION

Au cours de ces dernières années, la surface des sols a attiré l'intérêt d'un nombre croissant de spécialistes des milieux arides : géomorphologues, écologues, pédologues, hydrologues mais aussi physiciens. Cette émergence s'est accélérée en passant des études descriptives, de type inventaire, à des recherches sur le fonctionnement de ces milieux.

Ces travaux ont été basés sur des études de terrain qui restent indispensables, mais les satellites observent aussi la surface des sols, et ceci de façon exhaustive et répétitive. À partir d'une synthèse récente (ESCADAFAL, 1989a), cet article tente de montrer l'intérêt de la télédétection de la surface des sols pour la connaissance et la gestion des milieux arides.

Surface des sols et infiltration

Dès 1973, BOURGES *et al.* soulignaient l'importance de la nature des matériaux de surface dans la genèse du ruissellement sur les bassins versants expérimentaux du sud de la Tunisie, travaux repris et confirmés par FLORET et PONTANIER (1982). Au sud du Sahara, c'est avec le développement des techniques de simulation de pluie que les recherches consacrées à l'effet de la surface du sol sur l'infiltration ont démarré. À partir de 1975, pédologues et hydrologues ont réalisé un grand nombre de mesures dans différents milieux de l'Afrique de l'Ouest. ALBERGEL *et al.* donnent un exemple d'expérimentation de ce type réalisé au Burkina Faso (*cf.* cet ouvrage : 123-130). L'utilisation du minisimulateur de pluie en Tunisie a permis également de détailler et d'étendre les résultats obtenus sur bassin versants expérimentaux (ESCADAFAL *et al.*, 1986).

L'ensemble des travaux réalisés dans les pays du Sahel a été très récemment présenté par CASENAVE et VALENTIN (1988), sous la forme d'un catalogue des propriétés hydrodynamiques des différents types de «croûtes» recensés dans cette partie de l'Afrique.

Si les applications hydrologiques sont les plus évidentes comme en témoigne ce dernier ouvrage, d'autres disciplines se sont intéressées à la surface des sols.

Surface des sols et diagnostic des milieux

L'impact défavorable de la dégradation de la surface des sols cultivés sous l'action de la pluie est bien connu des agronomes, la battance est souvent un obstacle à la germination et une cause d'érosion. Les recherches phytoécologiques réalisées dans le

Sud tunisien ont souligné l'existence de phénomènes de même type dans les parcours naturels. Ainsi, l'évolution des friches postculturales est très différente selon que la surface est battante ou au contraire sableuse (TELAHIGUE *et al.*, 1987). Une expérimentation fine réalisée en station a permis de préciser les mécanismes physicohydriques en jeu (ESCADAFAL, 1989a). Les potentialités pastorales et, en particulier, les possibilités de régénération peuvent être ainsi assez bien estimées par l'observation de la surface des sols.

D'une façon plus générale, l'aspect de la surface du sol est un élément de diagnostic, pas nécessairement explicite, de l'état des milieux arides et des processus en cours ; la nature du sol y transparait le plus souvent, les érosions hydrique et éolienne y laissent différents types d'empreintes et l'activité biologique s'y manifeste.

Approche globale

Pour se dégager du point de vue réducteur de l'une ou l'autre discipline intéressée par la surface des sols, nous proposons de l'aborder sous son aspect d'interface.

Dans les milieux suffisamment chauds et arrosés, l'interface entre le sol et l'atmosphère est composé d'un écran végétal naturel ou cultivé (et de la faune associée) qui régle le flux et joue un rôle tampon.

Lorsque la végétation est rare pour des raisons bioclimatiques, comme dans le cas des régions arides, qui nous intéresse ici, le sol est directement exposé à l'action de l'atmosphère. L'interface entre ces 2 compartiments des écosystèmes est alors réduit à la surface du sol. Sa composition et son organisation sont le résultat de l'interaction entre le sol et les flux d'énergie, d'eau, de solutés et de matières solides qui y circulent.

L'effet tampon est pratiquement nul et ces flux souvent concentrés dans le temps et dans l'espace, marquent profondément la surface. L'étude de ces flux nécessite la caractérisation de cet interface. Son observation est un excellent moyen d'obtenir des informations sur la nature et le fonctionnement de ces milieux.

OBSERVATION DE LA SURFACE

Tout comme ceux qui s'y rattachent, le terme «surface du sol» est assez trivial pour nourrir le sentiment que l'objet désigné est bien précisé. Depuis les premières recherches sur ce sujet (ESCADAFAL, 1981a et b), l'expérience acquise montre que ce n'est pas le cas ; cela nous amène à proposer un certain nombre de définitions.

Définitions

Au sens mathématique du terme, une surface est un objet bidimensionnel. Les surfaces qui nous préoccupent ici possèdent bel et bien une troisième dimension, leur épaisseur. Ce sont donc des volumes.

LA SURFACE DU SOL : UN VOLUME DE TRANSITION ENTRE L'ATMOSPHÈRE ET LA COUVERTURE PÉDOLOGIQUE

Ce volume, qui est constitué de composés minéraux et organiques et d'êtres vivants, comprend la partie superficielle de la couverture pédologique directement en contact avec l'atmosphère et dont l'organisation et/ou la composition diffèrent de celles du matériau sous-jacent.

Dans cette définition large, la surface du sol comprend également les végétaux supérieurs, peu abondants dans les régions arides ; la surface du sol est donc généralement une strate peu épaisse, voire réduite à une pellicule, qui peut être discontinue et où dominent les éléments du sol.

L'ÉTAT DE SURFACE : LA COMPOSITION ET L'ORGANISATION DE LA SURFACE DU SOL À UN INSTANT DONNÉ

L'ÉTAT DE SURFACE ÉLÉMENTAIRE (ESE) : PLAGE D'UN ÉTAT DE SURFACE QUI PEUT ÊTRE INDIVIDUALISÉE ET CARACTÉRISÉE AU NIVEAU MACROSCOPIQUE.

Exemples d'ESE : épandage de gravillons quartzeux, sol nu à fentes de dessiccation, butte sableuse à végétation annuelle, microdépression à croûte squameuse, etc. Dans le cas le plus simple, un état de surface peut n'être composé que d'un seul ESE.

Méthodologie

Pour concrétiser cette approche globale nous avons développé une méthode de description qui permet d'appréhender la surface du sol dans sa totalité et d'en caractériser l'état (ESCADAFAL, 1981a). La cartographie de l'aptitude des milieux au ruissellement, proposée par VALENTIN (1986), s'y apparente, en se limitant aux variables d'intérêt hydrologique.

Un échantillon de surface est décrit en inventariant les différents ESE qui le composent (fig. 1). Si nécessaire, le plan de l'échantillon est levé pour caractériser la morphologie (microrelief), l'abondance et la distribution de chaque type d'ESE. Chacun d'eux est ensuite décrit séparément en examinant toutes les variables de sol et de végétation pertinentes, et en ayant recours aux glossaires de vocabulaire normalisé (ACCT, 1978 ; AUBERT et GIRARD, 1978 ; GODRON *et al.*, 1978).

L'objectif de cette technique est d'arriver à suffisamment d'objectivité et d'exhaustivité afin de permettre l'utilisation des données de surface pour des thématiques différentes. Cela nécessite une grande rigueur, une séparation sévère entre les informations brutes et les données d'une part, et les informations traitées par l'observateur ou les interprétations d'autre part. Ainsi, l'information brute «dimension, densité et orientation des ravines» sera opposée à l'information traitée «intensité de l'érosion». Cette approche globale est facilitée par la prise de photographies en visée nadirale à quelques mètres au-dessus de l'échantillon étudié (fig. 1).

Selon les objectifs de l'étude, certains points particuliers pourront être plus détaillés. Dans une étude des propriétés hydrodynamiques, par exemple, la description des microhorizons, observables dans de nombreux types d'ESE, se révèle indispensable. L'observation macroscopique de ces différenciations verticales devra être souvent complétée d'une étude micromorphologique (VALENTIN, 1985 ; ESCADAFAL et FEDOROFF, 1987).

Comme dans toute étude de terrain, la taille et le nombre des échantillons doivent être adaptés à la complexité du milieu. Si l'estimation de la taille des «motifs» qui forment la surface du sol (assemblages répétitifs d'ESE) est possible visuellement, elle peut cependant être précisée par des critères statistiques. La méthode des lignes-intercepts permet de suivre la fluctuation du nombre et de la proportion relative des ESE d'un échantillon de surface en fonction du nombre de mesures. Une fois ces paramètres stabilisés, on peut estimer détenir un échantillon représentatif (ESCADAFAL, 1989a).



Dans une étude au niveau d'un paysage, bien entendu, l'échantillonnage sera stratifié suivant les grands types d'états de surface (facilement différenciables sur les photographies aériennes et en circulant sur le terrain), mais aussi en relation avec l'organisation de la couverture pédologique.

Cette méthode, d'abord développée à partir de recherches menées en Tunisie (ESCADAFAL, 1981b), a été étendue depuis à la caractérisation de la surface de sols d'autres milieux, au sein du groupe de travail «télédétection de la surface des sols» dont POUGET et MULDER (1988) ont rapporté les travaux.

CARACTÉRISATION PAR TÉLÉDÉTECTION

Grâce au développement de la télédétection civile, les satellites d'observation de la Terre fournissent régulièrement aux utilisateurs des mesures du rayonnement réfléchi ou émis par la surface des sols. Nous n'envisagerons ici que le cas des données à haute résolution spatiale, obtenues par les satellites Landsat et Spot, les seules qui permettent d'envisager une cartographie détaillée des états de surface.

Équipés de capteurs à balayage, ces satellites fournissent leurs mesures sous forme digitale, organisées en matrices géoréférencées (les images). Elles peuvent être facilement traitées par les moyens informatiques actuels et intégrées à d'autres données localisées : modèles de bassins versants, systèmes d'informations géographiques, etc.

Depuis 1972, date du lancement du premier satellite Landsat, ces images sont disponibles en nombre important, surtout sur les régions arides grâce à la faible fréquence de l'enneuagement. Facteur également favorable, le coût de ces données est de l'ordre de 1 franc par kilomètre carré et par image.

Principe

LES SATELLITES UTILISÉS

Les caractéristiques des satellites cités et des images qu'ils produisent sont largement détaillées dans la littérature (CASSANET, 1985 ; JOLY, 1985). Placés en orbite héliosynchrone, ils observent la même portion de la surface de la Terre, à la même heure solaire et selon le même angle de visée, tous les dix-huit jours, pour Landsat, et tous les vingt-six jours, pour Spot. Pour les latitudes non nulles, l'élévation solaire au moment de l'enregistrement de l'image varie donc avec les saisons.

LA NATURE DES DONNÉES

Les capteurs embarqués sur ces satellites réalisent un échantillonnage spatial, déterminé par leur champ de vision instantané. La taille de l'élément de surface, sur lequel la mesure est réalisée, détermine la résolution de l'image. Les capteurs fonctionnent

←

FIGURE.1 - Exemple d'état de surface photographié en visée nadirale (le panneau portant les références mesure 50 cm, le champ couvert est donc d'environ 5 x 7 m).

À la surface de ce sol sableux profond du Sud tunisien, on reconnaît différents états de surface élémentaires (ESE) :

- ESE à sables fins : voile éolien au pied des touffes de végétation ;
- ESE à sables grossiers : ESE dominant ;
- ESE végétation : les touffes d'*Arthrophytum schmitianum*.

Réflectance relative (%)

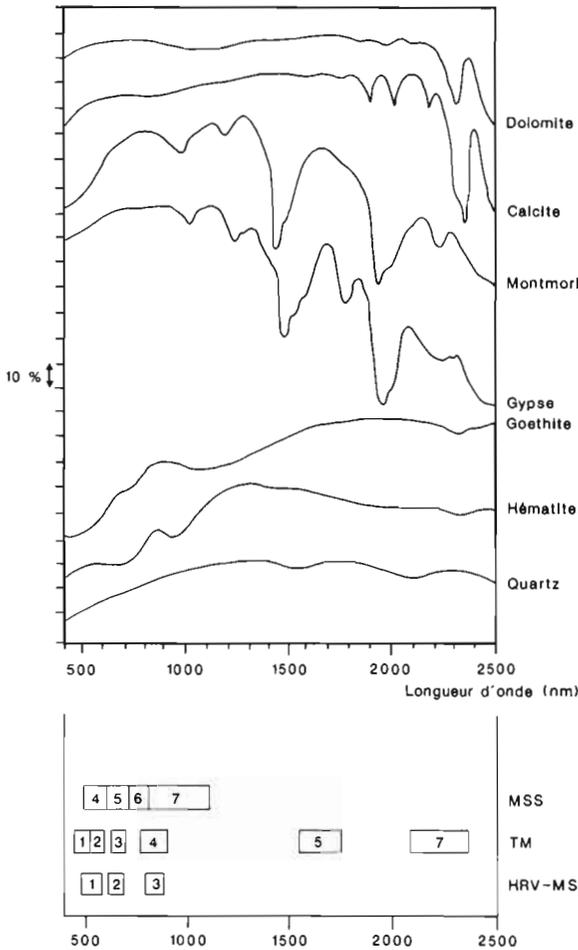


FIGURE 2 - Propriétés spectrales de quelques minéraux fréquents dans les sols des régions arides et bandes spectrales des capteurs de satellites Landsat et spot. Les minéraux carbonatés et hydratés ont des propriétés spectrales remarquables dans l'infrarouge. Les canaux 5 et 7 du Thematic Mapper (TM) sont donc particulièrement adaptés pour les discriminer. Inversement, l'hématite et la goéthite se distinguent dans le domaine visible (la première colore les matériaux pédologiques en rouge, la seconde en jaune). Le HRV de Spot et le MSS ont des canaux dans ce domaine. Le Thematic Mapper en a trois et permet de télédétecter ces nuances de couleur avec précision (ESCADAFAL, 1989b).

simultanément dans différentes bandes spectrales, ou canaux, dont la largeur et le nombre conditionnent le champ d'utilisation de ces données (fig. 2). Dans le cas des capteurs de Landsat et de Spot, le domaine spectral couvert s'étend du visible à l'infrarouge de courte longueur d'onde ; ils ne mesurent donc que le rayonnement solaire réfléchi.

À chaque tache au sol, correspond une mesure de luminance par canal, représentée par un pixel dans l'image. Pour en permettre le traitement informatique, cette donnée est codée en comptes numériques sur 256 niveaux (8 bits). L'ensemble de ces valeurs est fourni à l'utilisateur sous la forme de fichiers sur bande magnétique. Si nécessaire cependant, il est possible de recalculer les valeurs absolues de luminance (en $W.m^{-2}.sr^{-1}$) à partir des comptes numériques, en utilisant les données de calibration et de gain de chaque canal du capteur.

En première approximation 2 facteurs principaux conditionnent les valeurs de luminance mesurées par le satellite :

- l'intensité et la composition du rayonnement réfléchi, et/ou diffusé, vers le capteur dépend de l'interaction du rayonnement solaire incident avec l'élément de la surface

terrestre visé. Tous les composants de la surface des sols interagissent avec le rayonnement, de façon variée selon leur nature et leur organisation. L'approche globale et le concept d'état de surface que nous avons développé, prennent ici toute leur puissance ; c'est le même objet que nous observons à la fois sur le terrain et par satellite ;

- au cours de son trajet vers la surface puis vers le capteur, le rayonnement solaire interagit avec l'atmosphère dont la composition varie beaucoup au cours du temps. Si cette modification du signal est une source d'information pour les physiciens de l'atmosphère, en revanche elle est un bruit fluctuant qui gêne pour nos applications terrestres. Il faudra donc corriger ou minimiser ces effets atmosphériques pour obtenir l'information radiométrique sur les surfaces.

Utilisation des données

Les mesures fournies par les satellites ne peuvent être interprétées valablement qu'après avoir bien cerné leur nature. Dans notre approche, l'utilisation des données satellitaires est basée sur l'analyse et la modélisation de l'interaction rayonnement-surface.

LA MODÉLISATION

Elle a pour objet d'établir les relations entre la réalité du terrain et les mesures satellitaires. Ce terme très général regroupe des concepts différents (STRAHLER *et al.*, 1986 ; FERENCZ et ESCADAFAL, 1989) :

- dans les modèles déterministes, les lois de la physique sont appliquées pour tenter de mettre en équations toutes les interactions produites entre le rayonnement et la matière qui compose la surface. Ces modèles très complets sont aussi très complexes, car basés sur des systèmes d'équations difficiles à résoudre qui nécessitent le recours à des techniques d'analyse numérique laborieuses. S'ils ont une vocation universelle, leurs possibilités d'applications pratiques demeurent très limitées ;

- les modèles empiriques les plus simples sont basés sur des relations statistiques, comme la corrélation linéaire entre une variable de terrain et les valeurs de luminance dans un canal ou une combinaison de canaux. La relation entre la densité de végétation verte et le rapport des données du canal infrarouge sur celles du canal visible en est un exemple très classique. Une relation simple de ce type est très intéressante pour le thématique, car elle peut être utilisée dans l'autre sens, pour estimer la variable de terrain à partir des données satellitaires. On parle alors d'inversion du modèle. Cependant, mises en évidence sur une ou sur quelques images, ces relations peuvent n'être que conjoncturelles, et difficiles à généraliser.

Une catégorie intermédiaire est en plein développement, qui tente de concilier les avantages - rigueur et orientation thématique - des deux précédentes. Il s'agit des modèles heuristiques ou opérationnels, basés sur un certain nombre de lois physiques qui rendent compte des phénomènes essentiels, mais également sur un certain nombre d'approximations raisonnables dans les limites des objectifs assignés. Ces simplifications permettent l'inversion de ces modèles qui sont validés par l'expérimentation.

LES PROPRIÉTÉS SPECTRALES DE LA SURFACE DES SOLS

Les propriétés spectrales des sols ont été récemment revues par plusieurs auteurs (MULDERS, 1987 ; GUYOT, 1989 ; ESCADAFAL, 1989c). À travers un bref aperçu, nous allons voir quelles connaissances sont utilisables pour la modélisation de l'interaction rayonnement-surface des sols.

Des mesures de laboratoire ont été réalisées sur de nombreux échantillons de minéraux et de roches par HUNT *et al.* (1971a et b). Seules, quelques équipes ont étudié des matériaux pédologiques (CONDIT, 1970 ; STONER *et al.*, 1980 ; COURAULT et GIRARD, 1988a). Les courbes de réflectance spectrale sont mesurées au spectrophotomètre sur de petits échantillons de sol tamisé. Elles expriment le pourcentage de rayonnement réfléchi (dans toutes les directions) en fonction de la longueur d'onde (le plus souvent dans la gamme 400 à 2 300 nm).

Tous les types de sols n'ont malheureusement pas encore été étudiés ; cependant, l'analyse statistique de ces courbes a montré que des teneurs croissantes en eau et en matière organique diminuent la réflectance, alors que c'est l'inverse pour le calcaire (BAUER *et al.*, 1980 ; GIRARD, 1983 ; COURAULT *et al.*, 1988). La présence d'oxyhydroxydes de fer se manifeste dans le domaine visible (fig. 2). Dans l'infrarouge de courte longueur d'onde, on observe des bandes d'absorption, plus ou moins larges suivant la densité et le type des groupements -OH, qui permettent de reconnaître les minéraux hydratés (gypse, par exemple) et les carbonates (KAHLE, 1984) (fig. 2).

Par ailleurs, en appliquant un ensemble de concepts colorimétriques à une série de 84 échantillons de sols très diversifiés, nous venons de modéliser la relation entre la couleur des sols et la réflectance spectrale dans le domaine visible (ESCADAFAL *et al.*, 1988a et b). Ce résultat permet d'envisager la télédétection de la couleur des sols (ESCADAFAL, 1989b) mais aussi de clarifier sensiblement l'interprétation de l'influence de la composition des sols sur la couleur.

Dans plusieurs cas particuliers, des modèles empiriques entre la réflectance et la teneur en certains composants ont été proposés. Dans un cas plus général, COURAULT et GIRARD (1988b) viennent de montrer que l'on peut estimer les classes de teneur en matière organique, en fer et en carbonates d'un échantillon de sol en utilisant des critères statistiques de distance par rapport à des références. Si un modèle déterministe de la réflectance de matériaux particuliers hétérogènes a été développé pour les météorites (EGAN et HILGEMAN, 1978), en revanche il reste encore à construire le modèle opérationnel applicable aux sols, qui prendrait en compte la texture et surtout l'organisation de matériaux pédologiques.

Les mesures de terrain permettent d'aborder les propriétés spectrales des autres composants de la surface (végétaux, en particulier). Les appareils les plus utilisés sont les radiomètres portables qui travaillent dans les bandes spectrales d'un capteur de satellite ; ils sont couramment utilisés pour l'étude des sols tempérés (KING, 1985 ; COURAULT et GIRARD, 1988a) ou tropicaux (MOUGENOT et ZANTE, 1986). Les spectroradiomètres, plus onéreux, réalisent un enregistrement continu le long du spectre. La grandeur mesurée est la réflectance bidirectionnelle, caractéristique d'un angle d'éclairement par le soleil et d'un angle de visée du capteur. Il faut remarquer que ces 2 directions peuvent également varier en fonction de l'orientation de la surface elle-même (effet de la topographie). Afin de pouvoir mettre en rapport ces mesures avec celles en provenance des satellites, il est important de se placer dans des conditions géométriques et météorologiques comparables à celles qui prévalent au moment de l'enregistrement de l'image.

Pour passer des valeurs de réflectance des différents composants à la réflectance d'une surface réelle, il faut connaître la contribution relative de chacun d'eux au recouvrement total (GRAETZ et GENTLE, 1982). Notre méthode de cartographie et de caractérisation des états de surface élémentaires répond parfaitement à cet objectif. Seule une description exhaustive et non interprétée de ce type est utilisable pour la modélisation.

Dans le cas des surfaces réelles, un autre facteur intervient de façon très importante : l'ombre créée par le microrelief, par la végétation, ou par les éléments grossiers, qui forment la rugosité.

Ainsi, le principal effet de la végétation des zones arides est de diminuer la réflectance des surfaces. L'augmentation de la réflectance dans le proche infrarouge n'est observé que pour des peuplements de végétaux verts dont le taux de couverture dépasse 30 % environ (valeur variable suivant les conditions de visée).

Cet effet de la rugosité varie énormément en fonction de l'orientation de la surface, de l'azimut, de l'élévation solaire et de l'angle de visée. C'est l'origine de la différence fondamentale entre réflectances mesurées au laboratoire et sur le terrain. Comme il s'agit d'un phénomène purement géométrique, il est assez bien cerné par différents modèles de surfaces théoriques composées de parallélogrammes droits (NORMAN *et al.*, 1985), de sphères qui simulent les agrégats (Cierniewski, 1987), d'ondulations qui simulent les sillons (COOPER et SMITH, 1985) ou de cylindres verticaux espacés qui simulent une végétation éparse (OTTERMANN *et al.*, 1987).

CONCLUSION : LES BASES DU TRAITEMENT DES DONNÉES-IMAGES

Traiter une image revient à utiliser une relation avec les données de terrain et donc à établir un modèle empirique qui lui est propre. Compte tenu de ce que nous venons de voir, la recherche de ce modèle peut s'appuyer sur des acquis sérieux et des modèles déterministes partiels pour la formulation des hypothèses sur l'interaction rayonnement-surface.

Pour tester ces hypothèses, il faut pouvoir prendre en compte l'ensemble des éléments du terrain qui jouent un rôle connu dans cette interaction. La méthode développée, qui décrit les états de surface élémentaires puis leur assemblage, permet de quantifier la composition moyenne de la surface visée par le radiomètre du satellite. Ces données de terrain collectées sur des zones test sont mises en relation avec les données images pour établir le modèle. Ce dernier est validé sur d'autres zones où sont contrôlés les résultats de son inversion.

Dans ce traitement applicable à une image, le bruit dû à l'atmosphère, qui est considéré comme constant et peu élevé, n'est pas pris en compte. Ceci n'est vrai que dans des conditions météorologiques favorables dont il faut bien s'assurer de l'existence avant de réaliser de telles approximations. En particulier, la présence d'aérosols désertiques dans l'atmosphère des régions arides est très fréquente. Cela se traduit par une perte de contraste de l'image, dont la mesure est précisément une méthode d'évaluation de la teneur en aérosols (TANRE *et al.*, 1987). Le choix des images les plus contrastées permet d'estimer que celles-ci sont peu altérées par la diffusion du rayonnement.

Pour aborder l'évolution temporelle de la réflectance des surfaces, par exemple pour suivre les variations de rugosité dues au développement de la végétation stepmique, on ne peut plus considérer les effets atmosphériques comme constants, car ils fluctuent d'une date à l'autre. Pour réaliser des corrections absolues, il faut disposer de données sur l'état de l'atmosphère, au moment de l'enregistrement de l'image par le satellite. C'est rarement le cas et on doit alors se contenter d'estimations de ces paramètres (DESCHAMPS *et al.*, 1983). Dans la majorité de nos applications aux régions arides, la méthode la plus efficace est l'intercalibration relative des images par calage sur des surfaces invariantes d'une date à l'autre.

UN CAS CONCRET (Sud tunisien)

Le programme de cartographie mené par la Direction des sols de Tunisie, en vue de constituer un atlas des ressources en sols au 1/200 000, a été l'occasion de nos pre-

nières recherches sur la caractérisation de la surface des sols par télédétection. Dans la partie méridionale du pays, dont les sols étaient jusqu'alors peu connus, les images MSS Landsat sont apparues bien adaptées à ces objectifs (POUGET *et al.*, 1984).

La zone étudiée couvre 540 000 ha dans la région de Tataouine. Les précipitations y sont faibles (moyenne annuelle : 130 mm) et irrégulières ; la végétation, formée surtout de petits buissons ligneux bas, est très éparse.

Les paysages présentent un modelé, typique des régions arides, façonné dans des alternances de roches dures (calcaires et dolomies) et de roches plus tendres (calcaires marneux, marnes gypseuses, grès). Les reliefs tabulaires dominent les collines des piémonts, auxquelles succède un emboîtement de glacis polyphasés, de cônes de déjection et de formations alluviales. Les parties les plus basses sont occupées par des dépressions endoréiques souvent salées, les sebkhas.

Très marqués par la nature des matériaux et les pédogenèses anciennes, les sols sont en relation étroite avec les unités géomorphologiques (sols à croûte et dalle calcaire des collines et des glacis, sol gypseux sur marnes et dans les dépressions, sols profonds sur les terrasses, sols salés dans les sebkhas, etc.).

À l'exception de petites zones de collecte des eaux de ruissellement (jessours, dayas), l'homme exploite faiblement ces paysages ; leur aspect ne se modifie nettement qu'après de fortes pluies qui provoquent le développement rapide et éphémère de la végétation annuelle.

Sur le terrain, parallèlement à l'étude des fosses pédologiques, les principaux types de surface de sols ont été échantillonnés sur des zones test parfaitement repérées, et caractérisés suivant la méthode détaillée plus haut.

Les principaux types d'états de surfaces rencontrés sont les suivants : surfaces à blocs de roches calcaires, à fragments de croûte calcaire, limoneuses battantes, limoneuses à gravillons, sableuses à sables grossiers, sableuses à sables fins fixés, sableuses à dunes vives, calcaires à voile éolien sableux, à cailloux et blocs de roche gypseuse, gypseuses à croûte affleurante, gypseuses à voile éolien sableux, sableuses à végétation dense.

2 images MSS Landsat ont été choisies pour leur qualité (absence de nuages ou d'aérosols, fort contraste) ; la première a été prise à l'automne, le 29 septembre 1978, et la seconde, au printemps, le 4 avril 1981. Les 2 images ont été recalées entre elles, géométriquement et radiométriquement.

L'analyse statistique des données extraites des images dans chacun des canaux pour chaque zone test a montré que la corrélation entre les canaux 5 et 7 est très forte, supérieure à celle observée entre les canaux 4 et 5. Ce résultat, exactement à l'opposé de ce que l'on observe habituellement, peut être considéré comme une caractéristique des données MSS sur les régions arides. La végétation verte y est insuffisamment dense pour réfléchir le rayonnement proche infrarouge, à l'exception des jessours (*cf.* cet ouvrage, MTIMET : 387-400 ; BONVALLOT : 507-517) et des dayas sur l'image de printemps. Cette analyse des données images a montré que la somme des valeurs de luminance dans ces 2 canaux du domaine visible exprime la brillance (liée à la clarté de la couleur et à la rugosité), alors que leur quotient est corrélé avec la pureté (ou saturation) de la couleur de la surface. Il est à noter que ce modèle empirique de l'effet de la couleur a été depuis confirmé sur le plan théorique (ESCADAFAL, 1989b ; ESCADAFAL *et al.*, 1989). À partir de ces résultats, l'image de printemps a été classée en 16 états de surface en fonction de leur brillance et de leur couleur (ESCADAFAL et POUGET, 1986).

Depuis, nous avons étudié une image acquise par le *Thematic Mapper* (TM) de Landsat sur la même région. La meilleure définition géométrique et radiométrique, qui facilite considérablement le repérage, permet une bien meilleure caractérisation de la couleur grâce aux 3 canaux du domaine visible et surtout une discrimination des sur-

faces d'après leur dominante minéralogique dans les canaux de l'infrarouge moyen (ESCADAFAL et POUGET, 1987, 1989). Ceci est illustré (fig. 3) par une composition colorée d'un extrait de l'image *Thematic Mapper* qui couvre les environs de Tataouine.

APPLICATIONS

Dans l'exemple précédent, la télédétection des états de surface a été conçue comme une aide à la reconnaissance des sols et de leur sensibilité à l'érosion.

De fait, les 16 types de surfaces discriminés sur l'image MSS Landsat ont été confrontés aux observations des sols sur le terrain et à la connaissance acquise sur leur distribution dans le paysage en fonction des principales unités géomorphologiques. Ainsi établie, la carte des unités morpho-pédologiques au 1/200 000 a été complétée ensuite sur le thème de la sensibilité aux érosions hydrique et éolienne, en utilisant les critères de pente et texture de l'horizon de surface (ESCADAFAL, 1987a).

Les images TM Landsat permettent maintenant une caractérisation beaucoup plus précise de la nature de la surface des sols, tandis que Spot apporte la vision stéréoscopique et une excellente résolution spatiale comparable à celle des photographies aériennes. En zone aride, aujourd'hui, la télédétection peut donc fournir une véritable cartographie détaillée des matériaux de surface, dont beaucoup sont des horizons pédologiques à l'affleurement.

Le pédologue étudie l'organisation tridimensionnelle des sols sur des zones nécessairement très limitées. Mais, en se basant sur les connaissances qu'il y acquiert, il peut utiliser l'information bidimensionnelle sur les matériaux de surface et sur leurs relations avec la morphologie fine du paysage, pour inférer la structure de la couverture pédologique sur des étendues beaucoup plus vastes. La télédétection est conçue ici comme un outil d'interpolation spatiale d'observations ponctuelles (ESCADAFAL, 1987b).

En se référant à notre introduction, les applications *hydrologiques* sont évidentes. En Afrique sahélienne, tous les travaux les plus récents montrent que la carte des états de surface est une donnée essentielle pour la modélisation des écoulements.

Dans le cas de la mare d'Oursi, un simple classement empirique d'une image MSS Landsat, calée sur des données de terrain, a donné une approximation satisfaisante de cette carte (CHEVALLIER *et al.*, 1986). Nul doute, donc, qu'une approche plus rigoureuse, telle que nous la développons, pourra donner des résultats plus généraux et extrapolables.

Ainsi, la télédétection des états de surface peut-elle fournir de façon rapidement opérationnelle des données actualisées sur l'infiltrabilité des sols arides, sous une forme maillée adaptée aux modèles hydrologiques à discrétisation spatiale.

Dans le domaine de la *phytoécologie*, de nombreuses relations entre l'aspect de la surface et la nature et l'état du peuplement végétal associé ont été observées sur le terrain. En les formalisant, il est tout à fait concevable de tirer d'une image satellitaire des informations sur la végétation, même si, en fait, son effet n'y est pas directement décelable.

En *géomorphologie*, la nature des formations superficielles transparaît bien à la surface et surtout les traces de processus actuels (érosion linéaire, ensablement, etc.).

De fait, les applications thématiques les plus importantes sont probablement le diagnostic et le suivi des phénomènes, de dégradation du milieu qui affectent la végétation et/ou le sol et que l'on regroupe souvent sous le terme générique de *désertification*. La caractérisation de la surface du sol par télédétection est certainement la technique qui permet de mettre en évidence et de suivre au moindre coût ces phénomènes, dont l'extension constitue une grave menace pour l'avenir des régions arides.

En généralisant un peu, on peut considérer que la carte des états de surface est une approche globale des milieux qui permet de distinguer des biotopes ; elle est donc applicable à différents types d'études écologiques.



CONCLUSION - PERSPECTIVES

En résumé, nous avons développé une méthode de caractérisation objective et détaillée de l'interface sol-atmosphère, adaptée aux régions arides. La modélisation de l'interaction du rayonnement solaire avec cet interface permet d'établir des relations entre les mesures de luminance enregistrées par les satellites et les observations de terrain. En appliquant ces modèles aux images de télédétection, on peut alors en extraire des informations sur la rugosité, la couleur et la composition minéralogique des surfaces. Comme lorsqu'elles sont collectées directement sur le terrain, ces informations permettent un diagnostic sur la nature et l'état des sols et de la végétation du milieu observé.

Détaillée par ailleurs (ESCADAFAL, 1989a), cette approche originale, qui permet de concilier à la fois les points de vue de différentes thématiques et celui des satellites, est amenée à connaître de nombreux développements. Les perspectives qui se dessinent sont liées d'une part à l'élargissement du champ d'application évoqué plus haut, d'autre part à l'amélioration du traitement des données.

À ce propos, remarquons que l'application aux données Landsat, ou Spot, des modèles évoqués ici, caractérise les pixels individuellement. Dans de nombreux cas, il peut être intéressant de préciser les relations entre pixels par des méthodes aussi variées que l'analyse de la texture de l'image, la géostatistique ou la mesure de formes par la morphologie mathématique.

Combinés à la topographie par un modèle numérique de terrain, les pixels peuvent être orientés dans les 3 directions de l'espace. Ceci permet le calcul de corrections d'effets angulaires, mais également des classes de pentes ou de formes de relief qui définissent un autre aspect du contexte de ces pixels.

Par ailleurs, les premières recherches sur les images radar en zone aride indiquent qu'elles fournissent une mesure de la rugosité de la surface indépendante de l'albédo (REBILLARD et BALLAIS, 1983). Leur croisement avec des données Landsat permet donc une meilleure caractérisation de la végétation steppique (GREEN, 1986). Ce type de combinaison de mesures très différentes permet également de suivre l'humidité des sols et va certainement se développer avec les satellites à radar imageur, en particulier ERS-1 de l'Agence spatiale européenne (ASE), lancé en 1991.

Les satellites de type météorologique ou océanographique fournissent des données à faible résolution mais avec une fréquence très élevée. Un exemple d'utilisation de ce type de données pour la cartographie régionale des types de surface au Sahara a été récemment présenté (ESCADAFAL, 1989d). Mais ces satellites permettent surtout de

←

FIG. 3 - Composition colorée d'une image Thematic Mapper couvrant la région de Tataouine (l'échelle est indiquée graphiquement sur l'image).

Elle est formée par synthèse additive des couleurs primaires, où le bleu est attribué au canal 1, le vert au canal 3 et le rouge au canal 7 (voir les bandes spectrales de ces canaux sur la figure 2).

Cette combinaison permet de distinguer des états de surface de composition minéralogique différentes :

- en gris verdâtre : les affleurements de roches calcaires et dolomitiques ;
- en bordeaux : les placages de less péridésertiques (limons carbonatés et rubéfiés) ;
- en jaune : les sables fins éoliens (quartz ferruginisés) ;
- en cyan : les affleurements de gypse (collines de roches gypseuses disséquées à l'est et terrasses gypseuses à l'ouest) ;
- en bleu violacé : les constructions en ciment blanchi à la chaux (ville de Tataouine, T, et village de Ghourmassène, G),
- en rose pâle : les alluvions (sables quartzeux et galets roulés).

Dans toutes ces teintes on observe une diminution de la clarté lorsque la rugosité croît (pour une même exposition). Par exemple, dans le quart nord-est de l'image, les surfaces sableuses à steppe assez dense apparaissent ainsi en jaune foncé (ocre).

suivre en temps réel les flux d'eau et de chaleur. Des modèles de circulation de ces flux ont été élaborés par les physiciens de l'atmosphère. Leur couplage avec une caractérisation des surfaces par les satellites à haute résolution devrait permettre de proposer des modèles de fonctionnement de ces milieux et de prévoir leur évolution (cycle de l'eau, alimentation de l'atmosphère en poussières sahariennes, dynamique de populations végétales et relation avec les pullulations d'acridiens, etc.).

Enfin, les projets d'imagerie spatiale à base de spectroradiomètres, dont on vient de voir les premières simulations sur des paysages arides (THOMAS et HUSTIN, 1987), vont très certainement stimuler le développement des recherches sur les propriétés spectrales des sols et de leur surface, et permettre à l'avenir une caractérisation encore plus précise des milieux arides.

R. ESCADAFAL : *pédologue*,

LIA, unité de télédétection, ORSTOM, 72 route d'Aulnay, 93143 Bondy cedex

BIBLIOGRAPHIE*

- ACCT, 1978. - Normalisation et échange de données pédologiques par ordinateur. Agence culturelle de coopération scientifique et technique, Paris, 192 p.
- AUBERT (G.) et GIRARD (M. C.), 1978. - Vocabulaire de l'environnement pédologique tropical. Agence culturelle de coopération scientifique et technique, Paris, 81 p.
- BAUER (M. E.), VANDETBILT (V. C.), ROBINSON (B. F.) et DAUGHTRY (C. S. T.), 1980. - Spectral properties of agricultural crops and soils measured from space, aerial, field and laboratory sensors (review). *Proc. 14th ISPRS Congress*, Hamburg (F.R.G.), 23(B-7) : 56-73.
- BOURGES (J.), FLORET (C.) et PONTANIER (R.), 1973. - Etude d'une toposéquence typique du Sud tunisien. Djebel Dissa, résultats de la saison 1973-74. Direction des sols, Tunis, E. S. n° 89, 43 p.
- CASENAVE (A.) et VALENTIN (C.), 1988. - Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. *Rapport CEE-ORSTOM*, 202 p. + annexes.
- CASSANET (J.), 1985. - Satellites et capteurs. Série Télédétection satellitaire, Paradigme, Caen, 172 p.
- CHEVALLIER (P.), LOINTIER (M.) et LORTIC (B.), 1986. - Water levels of a sahelian lake (Mare d'Oursi, Burkina-Faso). *Hydrologic application of space technology, IAHS publ. n° 160* : 99-107.
- CIERNIEWSKI (J.), 1987. - A model of soil surface roughness influence on the spectral response of bare soils in the visible and near infrared range. *Rem. Sens. Env.*, 23 : 97-115.
- CONDIT (H. R.), 1970. - The spectral reflectance of American soils. *Photogramm. Eng.*, 36 : 955-966.
- COOPER (K. D.) et SMITH (J. A.), 1985. - A Montecarlo reflectance model for soil surfaces with three dimensional structure. *IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens.*, GE-23, 5 : 668-673.
- COURAULT (D.) et GIRARD (M. C.), 1988a. - Analyse des hétérogénéités intraparcellaires des sols par télédétection. *Science du sol*, 26(1) : 1-12.
- COURAULT (D.) et GIRARD (M. C.), 1988b. - Relationships between the soils composition and their spectral signature. 5th ISSS Symposium of the Working Group Remote Sensing, Budapest, 11-15-04-1988.

* Bibliographie à jour à la date de rédaction du manuscrit (1989)

- COURAULT (D.), GIRARD (M. C.) et ESCADAFAL (R.), 1988. - Modélisation de la couleur des sols par télédétection. Actes du 4e Coll. int. «Signatures spectrales d'objets en télédétection», Aussois, janvier 1988 : 357-362.
- DESCHAMPS (P. Y.), DUHAUT (P.), ROUQUET (M. C.) et TANRE (D.), 1983. - Mise en évidence, analyse et correction des effets atmosphériques sur les données multispectrales de Landsat ou Spot. II^e Coll. Int. Signatures spectrales d'objets en Télédétection. Inra-CNES, Bordeaux : 709-722.
- EGAN (W. G.) et HILGEMAN (T.), 1978. - Spectral reflectance of particulate materials : a Monte Carlo model including asperity scattering. *Applied optics*, 17(2) : 245-252.
- ESCADAFAL (R.), 1981a. - Une méthode nouvelle de description de la surface des sols dans les régions arides. Actes du colloque «Informatique et traitement des données de sols», Paris, 1981. *Sols*, n° 5 : 21-27.
- ESCADAFAL (R.), 1981b. - L'étude de la surface du sol dans les régions arides (Sud tunisien). Recherches méthodologiques. E. S. n° 187, Direction des Sols, Tunis, 64 p.
- ESCADAFAL (R.), 1987a. - Carte des ressources en sols de la Tunisie au 1/200 000. Feuille de Tataouine. Direction des sols, Tunis, E. S. n° 222. Notice 37 p., 1 carte couleur h. t.
- ESCADAFAL (R.), 1987b. - The use of earth observation satellites for soil mapping in arid and tropical regions. *EARSSEL News*, 33/34 : 16-18.
- ESCADAFAL (R.), 1989a. - Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection. Applications: exemple de la région de Tataouine (Tunisie). Thèse de doctorat, université, Paris-VI, *Études et thèses*, ORSTOM, Paris, 317 p.
- ESCADAFAL (R.), 1989b. - Remote sensing of arid soil surface color with Landsat Thematic Mapper. *Adv. Space Res.*, 9(1) : (1)159-(1)163.
- ESCADAFAL (R.), 1989c. - Propriétés spectrales des sols. Actes des «Journées de télédétection», à paraître in *Colloques et séminaires*, ORSTOM, Paris.
- ESCADAFAL (R.), 1989d. - Télédétection des zones potentiellement sources d'aérosols désertiques en zone péri-saharienne. ATP CNRS/PIREN «Aérosols désertiques», *rapport final multigr.*, ORSTOM, Bondy, 39 p.
- ESCADAFAL (R.) et FEDOROFF (N.), 1987. - Apport de la micromorphologie à une étude multiscalaire de la surface des sols en région aride (Tunisie méridionale). «Micromorphologie des sols/Soil Micromorphology», Fedoroff N., Bresson L.M. et Courty M.A. (Edts), AFES, Plaisir, France : 409-413.
- ESCADAFAL (R.), GIRARD (M. C.) et COURAULT (D.), 1988a. - La couleur des sols : appréciation, mesure et relations avec les propriétés spectrales. *Agronomie*, 8(2) : 147-154.
- ESCADAFAL (R.), GIRARD (M. C.) et COURAULT (D.), 1988b. - Modeling the relationships between Munsell soil color and soil spectral properties. *International Agrophysics*, 4(3) : 249-261.
- ESCADAFAL (R.), GIRARD (M. C.) et 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.
- ESCADAFAL (R.), MTIMET (A.) et ASSELINE (J.), 1986. - Étude expérimentale de la dynamique superficielle d'un sol aride (Bir Lahmar, Sud Tunisien). Résultats des campagnes de mesures sous pluies simulées. Direction des Sols, Tunis, ORSTOM, Bondy, 63 p. *multigr.*
- ESCADAFAL (R.) et POUGET (M.), 1986. - Luminance spectrale et caractères de la surface des sols en région aride méditerranéenne (Sud tunisien). *J. T. C. Journal* : 19-23.
- ESCADAFAL (R.) et POUGET (M.), 1987. - Cartographie des formations superficielles en zone aride (Tunisie méridionale) avec Landsat TM. *Photo-interprétation*, 4(2) : 9-12 .
- ESCADAFAL (R.) et POUGET (M.), 1989. - Comparaison des données Landsat MSS et TM pour la cartographie des formations superficielles en zone aride. *Monitoring the Earth Environment, European Space Agency publication*, SP-1102 : 301-307.
- FERENCZ (A.) et ESCADAFAL (R.), 1989. - A review of the actual modeling problems in remote sensing of soils. *Annales Univ. Sc. Budapest*, sous presse.

- FLORET (C.) et PONTANIER (R.), 1982. - L'aridité en Tunisie présaharienne. *Trav. et doc. ORSTOM*, n° 150, 544 p.
- GIRARD (M. C.), 1983. - Télédétection de la surface du sol. In : «Application de la télédétection à l'agriculture», *Colloques Inra*, n° 32 : 177-193.
- GODRON (M.), DAGET (Ph.), EMBERGER (L.), *et al.*, 1978. - Code pour le relevé méthodique de la végétation et du milieu. CNRS, Paris, 292 p.
- GRAETZ (R. D.) et GENTLE (M. R.), 1982. - The relationships between reflectance characteristics in the Landsat wavebands and the composition and structure of an Australian semi-arid shrub rangeland. *Photogramm. Engin. Rem. Sens.*, 48 (11) : 1721-1730.
- GREEN (G.M.), 1986. - Use of SIR-A and Landsat MSS data in mapping shrub and intershrub vegetation at Koonamore, South Australia. *Photogram. Eng. Rem. sens.*, 52(5) : 659-670.
- GUYOT (G.), 1989. - Signatures spectrales des surfaces naturelles. *Collection Paradygme. Télédétection satellitaire n° 5*, 178 p.
- HUNT (G.R.) et SALISBURY (G.W.), 1970. - Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks : I. Silicates minerals. *Modern Geology*, 1 : 283-300.
- HUNT (G. R.) et SALISBURY (G. W.), 1971a. - Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks : II. Carbonates. *Modern Geology*, 2 : 23-30.
- HUNT (G. R.), SALISBURY (G. W.) et LENHOFF (C. J.), 1971b. - Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks : III. Oxides and hydroxides. *Modern Geology*, 2 : 195-205.
- HUNT (G. R.), SALISBURY (G. W.) et LENHOFF (C. J.), 1973. - Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks : VI. Additional silicates. *Modern Geology*, 4 : 85-106.
- JOLY (G.), 1985. - Les données-images. Série *Télédétection satellitaire, Paradigme*, Caen, 129 p.
- KAHLE (A. B.), 1984. - Measuring spectra of arid lands. *Desert and arid lands* : 195-217.
- KING (Ch.), 1985. - Étude des sols et des formations superficielles par télédétection. *Documents du BRGM n° 96*, Orléans, 174 p. + annexes.
- MOUGENOT (B.) et ZANTE (P.), 1986. - Study of factors acting on reflectance of salt affected and acid soils surfaces in Casamance (Senegal) : first results. *Int. Symp. Rem. Sens. Res. Dev. Env. Manag.*, 22-29-9-1986, Enschede, The Netherlands, 8 p.
- MULDERS (M. A.), 1987. - Remote sensing in soil science. *Developments in soil science*, 15, Elsevier, Amsterdam, 379 p.
- NORMAN (J. M.), WELLES (J. M.) et WALTER (E. A.), 1985. - Contrast among bidirectional reflectance of leaves, canopies, and soils. *IEEE trans. Geosc. Rem. Sens.*, GE-23 : 659-667.
- OTTERMANN (J.), DEERING (D.), Eck (T.) et RINGROSE (S.), 1987. - Techniques of ground truth measurements of desert-scrub structures. *Adv. Space Res.*, 7(11) : 153-158.
- POUGET (M.), LORTIC (B.), SOUISSI (A.), ESCADAFAL (R.) et MTIMET (A.), 1984. - Apport des données MSS Landsat pour la cartographie des ressources en sols des régions arides (Tunisie). Actes du 18^e Symposium sur l'Observation de la Terre, CNES-ERIM, Paris, 1-15-10-1984, 14 p.
- POUGET (M.) et MULDER (M. A.), 1988. - Report of the ISSS working group «Remote sensing of the soil surface». Description of the landsurface for correlation with remote sensing data. 5th ISSS Symposium of the Working Group Remote Sensing, Budapest, 11-15/04/88.
- REBILLARD (Ph.) et BALLAIS (J. L.), 1983. - Interprétation d'enregistrements digitaux de données SIR-a, Seasat et Landsat sur les chotts algériens. *C.R. Acad. Sc. sér. II*, 296 : 103-106.
- STONER (E. R.), BAUMGARNER (M. F.), BIEHL (L. L.) et ROBINSON (B. F.), 1980. - Atlas of soil reflectance properties. LARS, Purdue University, 75 p.
- STRAHLER (A. H.), WOODCOCK (C. E.) and JAMES (A. S.), 1986. - On the nature of models in remote sensing. *Rem. Sens. Env.*, 20 : 121-139.
- TANRE (D.), DESCHAMPS (P. Y.), DUHAUX (C.) et HERMAN (M.), 1987. - Adjacency effects produced by atmospheric scattering in Thematic Mapper data. *J. Geophys. Res.*, 92(D10) : 12 000-12 006.

- TELAHIGUE (T.), FLORET (C.) et LE FLOC'H (E.), 1987. - Succession post-culturale en zone aride de Tunisie. *Oecol. Plant.*, 8(22) : 45-58.
- THOMAS (R. W.) et USTIN (S. L.), 1987. - Discriminating semiarid vegetation using airborne imaging spectrometer data : a preliminary assessment. *Rem. Sens. Env.*, 23 : 273-290.
- VALENTIN (C.), 1985. - Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région sub-désertique (Agadez-Niger). Dynamique et conséquences sur l'économie en eau. Thèse 3^e cycle, univ., Paris-VII, *Études et thèses*, ORSTOM, Paris, 259 p.
- VALENTIN (C.), 1986. - Différencier les milieux suivant leur aptitude au ruissellement : une cartographie adaptée aux besoins hydrologiques. Journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier. *Colloques et Séminaires*, ORSTOM, Paris : 50-74.