

Téledétection spatiale et Erosion des sols

Etude bibliographique

Michel DUBUCQ

Laboratoire de Pédologie et de Géochimie, Université Paul Sabatier, 38, rue des 36 Ponts, 31062 Toulouse Cedex, France

RÉSUMÉ

Les publications sur le thème de la télédétection spatiale appliquée à l'étude de l'érosion des sols sont relativement récentes, puisque les premières remontent aux années 1973-1974. L'étude bibliographique présentée ici, qui ne prétend pas à une exhaustivité totale, vise à établir un inventaire des différents travaux, des méthodologies et des résultats obtenus.

Trois préoccupations majeures apparaissent :

- la cartographie des zones dégradées : cartographie de l'érosion à petite échelle et carte F.A.O. au 1/5 000 000 ;*
- la quantification de l'érosion : modèles d'érosion des sols et modèles hydrologiques ;*
- le suivi de l'érosion : analyses multitemporelles fondées sur des variations de luminance ou d'albédo. Toutes les publications examinées, sauf deux, ont pour objet l'étude de l'érosion des sols dans un domaine spectral allant du visible au proche infrarouge.*

L'analyse des résultats obtenus et des expérimentations met en valeur les possibilités offertes par la télédétection spatiale de même que ses limites. Les nouveaux capteurs nous permettent d'envisager une nouvelle approche des milieux dégradés et d'obtenir de précieuses informations complémentaires à la planification agricole.

MOTS-CLÉS : Etude bibliographique — Erosion — Télédétection spatiale — Visible — Infrarouge — Landsat — Spot.

ABSTRACT

SPACEBORNE REMOTE SENSING AND SOIL EROSION. BIBLIOGRAPHIC STUDY

Publications on spaceborne remote sensing applied to soil erosion are relatively recent as the first one has been written in 1973-1974. This bibliographic study, which is not exhaustive, aims to compile the different approaches, the methodologies and the results. Three major preoccupations appear : the cartography of the degraded zones (erosion cartography at small scale, F.A.O. map at 1/5 000 000), the erosion quantification (soil erosion model and hydrographic model), follow-up erosion (multidate analysis based on the luminance or albedo variation). All the publications found, except two, concern the study of erosion in the visible and near infrared spectral band. The analysis of the results of the experimentations shows possibilities offered by spaceborne remote sensing and its limits. The use of new captors allows a new approach of the land degradation and new informations fuller to agricultural planning can be obtained this way.

KEY WORDS : Bibliographic review — Erosion — remote sensing — Visible — Infrared — Landsat — Spot.

INTRODUCTION

En pédologie, l'emploi des photographies aériennes remonte aux années d'après-guerre. Actuellement, il est rare d'effectuer des levés pédologiques, de dresser des inventaires de zones dégradées sans consulter les photographies aériennes (3,4,72). De nouvelles possibilités nous sont offertes avec la télédétection spatiale. Son usage commence à se développer tant dans les régions arides, où les processus de dégradation sont bien connus, que dans les zones tempérées où l'érosion est beaucoup plus insidieuse mais commence à prendre des proportions inquiétantes sous l'effet de pratiques culturales ayant plus pour but le rendement immédiat que la pérennité des terres cultivables (21).

Les manifestations de l'érosion hydrique (érosion en nappe, érosion en griffes, ravinements et dépôts) et de l'érosion éolienne (zones de déflation, accumulation sableuse, etc.) sont généralement bien décelées sur les photographies aériennes à partir du 1/50 000.

Les études traitant d'érosion des sols par télédétection spatiale vont s'appuyer soit sur l'interprétation visuelle des images satellites, soit sur des traitements numériques. Dans le visible et le proche infrarouge, les informations obtenues ne concernant que la surface du sol, il est nécessaire que celui-ci soit nu, à moins que d'autres éléments de la scène permettent de l'identifier indirectement (réseau hydrographique, végétation, parcellaire). Il convient de souligner que la notion d'échelle perd un peu de sa signification : en effet, quel que soit le traitement choisi, l'unité d'information de base (le pixel) a toujours la même dimension et le même contenu.

Les différentes utilisations de l'imagerie satellite

concernant l'érosion des sols mettent en évidence trois préoccupations majeures : *la cartographie, la quantification et le suivi des zones érodées*. Avant d'exposer les différentes utilisations des données satellites il convient de présenter les problèmes liés à l'utilisation de l'imagerie spatiale.

LES DONNÉES SATELLITAIRES — MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE D'UTILISATION EN PÉDOLOGIE

Les données

LES SATELLITES D'OBSERVATION DE LA TERRE

Les satellites d'observation de la Terre, Landsat et Spot, sont des satellites héliosynchrones à orbite basse. Ils permettent :

- la couverture globale de la terre ;
- l'observation cyclique d'un lieu donné à la même heure solaire.

LES CAPTEURS

Les capteurs enregistrent des luminances provenant de la surface de la terre. Ces données dépendent non seulement des caractéristiques de la surface réfléchissante, mais aussi des facteurs atmosphériques et de la géométrie du système « Soleil — Cible — Capteur ». On pourrait en principe utiliser l'ensemble du spectre électromagnétique, mais en raison de l'état actuel de la technique, et du rôle joué par l'atmosphère, seules quelques « fenêtres » sont utilisées. Ce sont (fig.1) le visible (0.4 — 0.75 μm), le proche infrarouge (0.75 — 1.1 μm), l'infrarouge thermique (3 à 5 et 8 à 14 μm), les ondes radars (supérieures au millimètre).

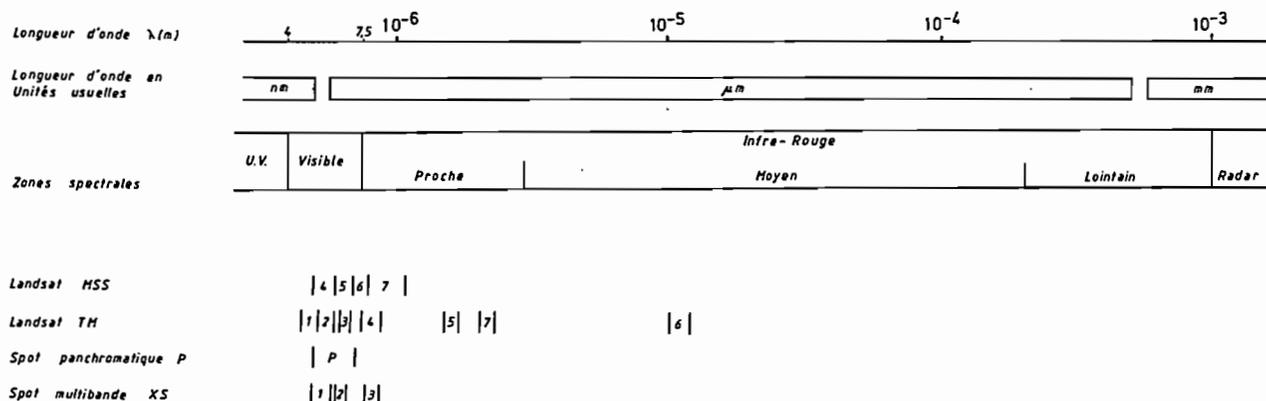


Fig.1. — Les ondes électromagnétiques et les principaux scanners.

Le pouvoir de résolution de ces capteurs, ou leur aptitude à rendre distincts deux points voisins, n'était pas excellent (fig.2) mais de gros progrès ont été réalisés avec l'apparition des scanners TM et HRV.

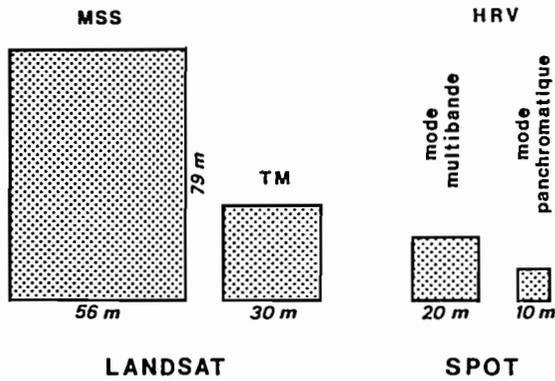


Fig.2. — Dimensions correspondant à une tache élémentaire pour les capteurs de Landsat et de Spot. Chaque tache est représentée par un élément d'image appelé pixel. (in *L'Information géographique* 1985, volume 49, 1 - pp.17-25).

LES DONNÉES

Les produits Landsat MSS se présentent soit sous forme de bandes magnétiques numériques (CCT 1600 bpi 4 canaux corrigés) soit sous forme de tirages papiers au 1/1 000 000 et 1/500 000, soit sous forme de composition colorée ; des bandes magnétiques 7 canaux (6 250 bpi) constituent les données numériques de Landsat TM ; les données Spot sont fournies de manière standard soit sous forme de visualisation sur film photographique à l'échelle de 1/400 000, soit sous celle de bandes magnétiques.

Méthodologie générale d'utilisation en pédologie

L'interprétation de l'imagerie spatiale en pédologie se heurte aux mêmes problèmes que ceux rencontrés avec les photographies aériennes. L'image obtenue est le résultat de l'énergie réfléchie sur les différents objets à la surface du sol et captée par le satellite. Cette surface est recouverte bien souvent par la végétation spontanée ou les cultures. En outre, même si la surface du sol est nue, des sols différents peuvent avoir des luminances identiques. A l'inverse, des sols identiques peuvent avoir des luminances différentes (54). Les quantités d'énergie réfléchies ou émises (thermiques) dépendent, d'une part des conditions d'éclairage, d'autre part de l'état de surface du sol, enfin de son environnement. De ce fait, un sol donné peut avoir dans le temps *plusieurs signatures spectrales*. Il ne faut donc pas perdre de vue que toute donnée de télétection est un instantané qui ne fournit d'informations que sur les objets

existants au moment de la saisie. Donc, à chaque date de prise de données correspondra une nomenclature dépendant des cycles naturels et des façons culturales.

L'extraction de l'information « aspect de l'érosion », à partir des données satellite, pourra être directe ou le plus souvent indirecte, comme pour les photographies aériennes (62). Dans le premier cas l'analyse des images de sols nus ou peu couverts par la végétation permettra de caractériser la surface des sols. Cette analyse sera possible si des rapports étroits existent entre les données de télétection, les caractères de la surface du sol et l'érosion. Nous savons que les effets apparents de l'érosion se manifestent en premier lieu à la surface des sols et que de telles relations existent. Les caractères considérés pourront être permanents (teneur en calcaire par exemple) ou transitoires (rugosité). On raisonne en terme de présence ou d'absence d'un paramètre considéré.

D'autres formes de dégradations sont, pour la plupart, invisibles mais pourront dans certains cas être déduites grâce à des « indicateurs ». C'est l'extraction indirecte. Ces indicateurs seront :

- la végétation, dans le cas où elle est fortement influencée par les facteurs édaphiques ; les problèmes de stress de la végétation ont déjà été utilisés en photographie aérienne (72,82) ;
- les structures spatiales (et spatio-temporelles) telles que :

- * les aménagements humains : type de parcellaire, façons culturales, état des cultures et labours (21,49) ;
- * les *structurations caractéristiques liées au type d'érosion* soulignées par la couleur, les ombres, et les formes de l'érosion hydrique (52,68) ; les stries et alignements associés à l'érosion éolienne (38,46,55) ;
- * les évolutions saisonnières des états d'humidité (41), de salure etc.

L'exploitation des données

Il est possible d'exploiter les données satellitaires de différentes manières. En ce qui concerne les bibliographies analysées, les résultats obtenus reposent, soit sur l'interprétation d'images reconstituées à partir des données brutes ou corrigées, soit sur des traitements informatiques.

— L'analyse visuelle constitue l'étape la plus simple et la moins coûteuse. La démarche suivie est identique à celle employée en photographie aérienne. Elle tend à prendre en compte, en plus des variations des niveaux de gris, des critères de texture (aspect local) et de structure (organisations et relations entre les éléments texturaux). Les données multispectrales peuvent être étudiées canal par canal ou à partir de compositions de canaux. Une composition colorée, par exemple, correspond à une combinaison de trois bandes spectrales. Une couleur

fondamentale est affectée à chacune des composantes. MALON (40) souligne que « l'utilisation d'une composition colorée accroît considérablement la quantité d'information disponible. En effet, les données individuelles de chacune des trois bandes peuvent être représentées par des niveaux de brillance dans une image couleur. De plus, les variations dans les réponses spectrales des trois canaux apparaîtront comme des différences de couleur dans la composition colorée. Enfin, l'information complète des trois images initiales est contenue dans un seul document, évitant ainsi le passage d'une image à l'autre ». Diverses techniques permettant, soit d'affiner la perception visuelle de l'image, soit de mettre l'image sous une forme plus appropriée à l'analyse, pourront être recherchées dans cet ouvrage, et dans celui de STRAHLER *et al.* (81).

— Les traitements numériques concernent la manipulation des valeurs de luminance de chaque pixel dans les différentes longueurs d'ondes, par des méthodes statistiques d'analyse des données (composantes principales, nuées dynamiques, classement par hypercubes, etc.). L'analyse numérique nécessite donc des techniques informatiques qui permettront le classement en plusieurs catégories d'objets possédant une répartition d'énergie plus ou moins semblable dans le spectre.

CARTOGRAPHIE DE L'ÉROSION

Cartographie de l'érosion à petite échelle

Deux démarches peuvent s'inscrire dans l'analyse d'une série temporelle : l'étude des réponses spectrales, l'étude de la texture et de la structure des images.

LA PREMIÈRE DÉMARCHE vise à la reconnaissance, à des fins d'inventaire, des différents états de surface du sol ou du couvert végétal. Elle s'appuie sur des variations de grisés ou de colorations (composition colorée) à l'intérieur d'une même unité de paysage ou bien repose sur l'analyse radiométrique des canaux. Plusieurs articles traitant de l'intérêt des images Landsat dans différents domaines soulignent les possibilités offertes en ce qui concerne la cartographie des zones d'érosion ; de telles études ont été réalisées dans les milieux arides ou semi-arides en Argentine (61), en Equateur (15), au Maroc (46), au Niger (12). Au Népal, les zones érodées ont pu être définies au 1/500 000 à partir des compositions colorées (2). Au sud du Kansas, des variations rapides de teintes engendrées par la sécheresse et l'érosion éolienne ont pu être enregistrées à partir des données MSS et Seasat (30). En Inde, l'évaluation des données MSS de Landsat (interprétation visuelle et traitements numériques) a abouti à la cartographie des zones dégradées (84,85). La reconnaissance des milieux salés a été

abordée. Six classes d'érosion ont été définies à partir d'une classification supervisée dans une autre province indienne (74).

En Egypte, les réflectances mesurées en laboratoire, rectifiées ensuite pour se conformer aux conditions satellitaires, de plusieurs types de sables ont été comparées aux données Landsat avec succès (41). L'agencement des milieux dunaires a pu être relevé sur les photographies Appolo-Soyouz et trois zones ont pu être classées d'après leurs signatures spectrales (17).

Quand la couverture végétale est discontinue, le pixel intègre aussi bien *les caractéristiques permanentes* liées aux constituants de l'horizon superficiel que *les caractéristiques conjoncturelles* (32) liées à la présence, ou à l'absence, de certains types de végétation. Au Mali, une analyse statistique des données Landsat a permis de dresser une carte de la végétation avec pour objectif le suivi de la désertification (11). L'interprétation visuelle d'images Landsat au 1/500 000 d'une partie du Brésil a mis en relief différents milieux naturels dont certains sont confrontés à des problèmes de dégradation ou d'érosion (36). Dans le sud de l'Inde, les teintes claires associées à une faible végétation se sont révélées être des zones actives d'érosion. Ces zones ont été retrouvées par classification non supervisée (27). Dans l'Indiana, les données MSS ont été utilisées pour la reconnaissance et la cartographie des zones sévèrement érodées au travers de la végétation (63). Dans l'état du Nebraska, les images Landsat ont permis la reconnaissance au 1/250 000, canal 5, de zones de déflation (dont certaines ne recouvraient pas plus d'un hectare). A l'aide d'un microdensitomètre il a été possible d'évaluer la biomasse ; les emplacements où la végétation s'est dégradée, au point que les sols risquent d'être soumis à l'érosion éolienne, ont pu être cartographiés (70).

Deux études font intervenir des ratios (rapports entre canaux) ; il s'agit de travaux portant sur des radiométries acquises au sol. Dans la première (33) des échantillons de parcelles érodées de différentes localités de l'Indiana ont fait l'objet d'une étude en vue d'établir les relations qui pourraient exister entre les propriétés physiques et chimiques de ces sols et leur réponse spectrale. Les résultats exprimés en fonction des canaux MSS font apparaître une rupture de pente entre les canaux 6 et 7 qui n'existe pas dans le cas des sols en place ou des zones de dépôt (fig.3). Un ratio (réflectance du sol en place sur zone modérément, sévèrement, très sévèrement érodée et dépôt) met en valeur la forme convexe des courbes des milieux érodés dans la région du spectre comprise entre 0.52 — 0.9 μm . Dans la seconde étude (62) un ratio canal 4/canal 6 — canal 5/canal 6 permet de classer les surfaces érodées, les dépôts et les sols en place.

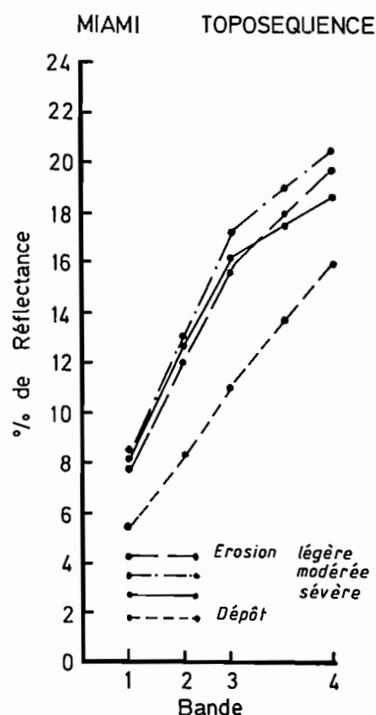


Fig. 3. — Réflectances Landsat simulées pour une toposéquence de sols. (in réf. 33).

L'étude des signatures spectrales des différents types de surface n'est pas toujours soigneusement explicitée et ne permet pas au lecteur de faire des comparaisons avec ses propres résultats. Quelques résultats semblent définitivement acquis : les valeurs de réflectance sont plus fortes pour le sel que pour le sable ; elles sont supérieures dans le cas d'accumulations sableuses actives par rapport aux dunes stabilisées.

Quelques traitements informatiques enfin (33), histogrammes bidimensionnels, classifications multispectrales de type hypercube (64), classifications supervisées ou non (27,44) permettront d'inventorier et de définir les principaux états de surface.

LA SECONDE DÉMARCHE tend à tirer parti de l'aspect global de l'observation spatiale et privilégie les relations entre les faits et leur agencement. Elle permet de formuler des hypothèses à l'échelle des paysages, et repose sur l'observation directe des images brutes ou des compositions colorées. Elle est basée sur les structurations caractéristiques de l'image, spécifiques à l'érosion éolienne et à l'érosion hydrique :

Des traces d'usure éolienne variables dans l'espace et dans le temps : *figures linéaires* blanches (zones de transit du sable) ou gris foncé (crêtes rocheuses) sont observées au Sahara sur les images Météosat malgré leur

petite échelle (38). De la même manière la synthèse des effets de l'érosion éolienne dans le Sahel a été réalisée à partir des données Landsat du 1/1 000 000. Les traces d'usure, à forte réflectance, s'opposaient aux *figures d'abri* liées à la présence d'obstacles (39,49). Les photographies aériennes sont nécessaires à l'étude locale de certaines formes dunaires (barkhanes isolées, dunes de type sif, etc.). Des figures de corrasion relevées en milieu aride (58) ont permis de formuler l'hypothèse que le transport aérien est avant tout un déplacement par saltation des éléments en jeu. Dans le bassin inférieur du Danube enfin « la mise en évidence (sur composition colorée) des aires d'érosion éolienne a permis d'actualiser les cartes pédologiques respectives, en constatant l'évolution du phénomène durant un délai de 10 ans ». Les échelles employées étaient le 1/500 000 et le 1/250 000.

Un *modèle d'érosion hydrique* a pu être décelé grâce au canal thermique de Nimbus (65). En Arizona, dans le canal MSS 5, des ravins dont la largeur est supérieure à 20 m sont cartographiables (52). Les mêmes observations sur le canal 7 de Landsat ont été effectuées dans le Dakota (86), en Inde (75). Ces deux articles précisent que la cartographie des milieux humides est plus aisée en hiver. En Colombie, les effets de l'érosion ont été décelés au 1/500 000 ; c'est au 1/250 000, dans les bandes 5 et 7, et sur les compositions colorées, qu'il a été possible d'étudier l'érosion hydrique dans la péninsule indienne (69).

Le drainage, la taille des parcelles, le pourcentage des terres de cultures sont les éléments à la base d'un inventaire au 1/1 000 000 dans le Dakota (80). La gestion des ressources (29,87) est abordée dans l'ouvrage (31) d'où est tiré cet article.

La reconnaissance sur photographies aériennes de la dégradation ou de l'érosion éolienne ou hydrique (42,68) de certains milieux peut constituer une première étape avant l'exploitation des données Landsat.

Les deux approches ne sont pas antagonistes. La délimitation d'unités homogènes fera suite au repérage des discontinuités, qu'elles soient spectrales ou texturales. Généralement les bandes 5 et 7 sont les plus utilisées. La bande 5 est plus sensible à l'érosion des sols, la bande 7 traduit davantage la nature, le taux de recouvrement et l'état de développement de la végétation. Certains articles ou communications (9), (28), (52), (53) ne font référence qu'aux seules informations du canal 5. COINER (11) utilise les deux canaux. POUGET *et al.* (64), dans le cadre de la cartographie régulière (au 1/200 000) des ressources en sol menée sur l'ensemble de la Tunisie, prend en compte le canal 4 ; ce canal permet en effet de discriminer les sols rencontrés d'après leur couleur en complétant les informations des canaux 5 et 7.

Un exemple particulier : les cartes F.A.O. au 1/5 000 000 et au 1/1 000 000

En novembre 1965 la F.A.O., le P.N.U.E. (Programme des Nations Unies pour l'Environnement) et l'UNESCO ont lancé un projet conjoint intitulé « évaluation mondiale de la dégradation des sols ». Un rapport collectif (46) conclut que Landsat peut servir de base, avec les données terrain, à la légende de la carte mondiale F.A.O. de dégradation des sols au 1/5 000 000. Des cartes, qui couvraient à peu près tous les types de climats, ont été réalisées : en Gambie, Guinée et Sierra Leone (5), au Niger, Haute-Volta, Mali, et Nigeria (37), en Jordanie, Syrie et Irak (45), en Iran (48). Au Maroc, l'étude plus fine a conduit à une carte au 1/1 000 000 (60).

Ces études reposent sur l'interprétation visuelle des canaux Landsat (48), des compositions colorées ou des diazos (37), et sur l'introduction de données extérieures : cartes thématiques, observations au sol, etc. Il n'y a pas eu d'étude numérique réalisée. Il a été tenu compte, dans l'édification de la légende des cartes, du fait que le risque de désertification d'un milieu s'accroît quand le couvert végétal diminue et l'utilisation des terres s'intensifie (17,18,45). Les problèmes de salinisation ou d'alcalinisation (en Irak), d'inondation (entre le Tigre et l'Euphrate) font partie des processus de dégradation étudiés (46).

Le 1/5 000 000 présente évidemment de grandes limitations et ne permet qu'une vue globale de la dégradation. La méthodologie peut servir de support après adaptation à des études à des échelles beaucoup plus grandes.

Il est souligné dans certains articles (35,66) que Landsat peut intervenir dans la quantification de l'érosion. La méthodologie retenue (66) est une méthode paramétrique permettant d'évaluer chaque type de dégradation de l'environnement selon le modèle :

$$D = f(C,S,T,V,L,M)$$

(où D = dégradation des sols, C = facteur d'agressivité climatique, S = facteur sol, T = facteur topographique, V = facteur végétation naturelle, L = facteur d'utilisation des terres, M = facteur d'aménagement).

Le calcul du risque de dégradation tient compte des facteurs de l'environnement relativement stables, tels qu'agressivité climatique, topographie et sol auquel on applique ensuite des coefficients correspondant à l'utilisation actuelle du sol ou à la végétation naturelle pour obtenir la dégradation du sol :

$$R = f(C,S,T,K)$$

(où R = risque de dégradation, K = constante représentant les conditions normalisées de V,L,M).

La cartographie de l'érosion à grande échelle

Les auteurs ne sont pas tous d'accord sur les échelles de cartographie que permettent les satellites. Si

certaines pensent qu'il n'est pas possible de dresser une carte à une échelle inférieure ou égale à 1/200 000, d'autres voient un intérêt possible de Landsat jusqu'au 1/20 000 (cf. Ref. 35) ou tout au moins jusqu'au 1/50 000. Aucune étude à ces échelles n'a été répertoriée.

QUANTIFICATION DE L'ÉROSION

La quantification de l'érosion éolienne ne paraît pas avoir été étudiée à partir de l'imagerie satellite.

L'érosion hydrique des sols est reconnue comme étant l'un des processus majeurs à l'origine de la baisse de productivité des terres cultivables. Les plus spectaculaires des formes élaborées par les eaux courantes sont les formes de creusement (parfois directement cartographiables par satellite) ; mais cette érosion n'est ni la plus répandue, ni la plus pernicieuse. Sans avoir à se concentrer, les eaux décupent et érodent. D'une manière générale, la quantification de l'érosion est difficile. Elle est estimée suivant un modèle mathématique à partir des données pluviométriques, topographiques, morphologiques, de la succession des cultures etc. Au niveau de la prévention, de l'estimation des dégâts, les images satellites peuvent se révéler utiles, d'autant qu'elles sont répétitives. Afin d'évaluer l'érosion, les données satellites seront intégrées, soit :

- dans un modèle d'étude d'érosion des sols ;
- dans un modèle hydrologique.

Un modèle d'étude d'érosion des sols

Pour apprécier les dangers d'érosion, un modèle mathématique de l'érosion, désigné sous le vocable d'« Universal Soil Loss Equation » (88,89,90,91), a été établi. Nous retiendrons toutefois qu'il s'agit d'un modèle empirique établi à partir du traitement statistique des résultats de nombreuses mesures en parcelles expérimentales. Il a d'abord été mis au point pour des conditions de milieux existant aux Etats-Unis et n'est pas forcément applicable tel quel (définition des paramètres) dans d'autres régions (34,6) et notamment dans le milieu méditerranéen (13). Il a pour expression :

$$A = R.K.L.S.C.P.$$

(où A est l'érosion attendue en t/ha, R l'indice d'érosivité des pluies, K l'indice d'érodibilité du sol, L est fonction de la longueur de la pente, S de la valeur de cette pente, C est un paramètre relatif aux pratiques culturales, P un indice qui caractérise les pratiques de lutte antiérosive).

De nombreuses études réalisées par photographies aériennes, traitant d'érosion des sols, exploitent cette équation (50,51). L'utilisation des données satellites, malgré le pouvoir de résolution limité des capteurs, est possible comme le prouvent STEPHENS *et al.* (79) : les statistiques comparées du scanner MSS et des données

simulées des scanners TM et HRV estiment à plus de 92 % de réussite les résultats des données HRV et TM pour la reconnaissance des cultures. Dans les études qui vont découler de l'équation de Wischmeier, les différents auteurs se sont surtout intéressés à la définition de l'« indice de cultures » (C) considérant que les autres paramètres n'évoluent que très peu dans le temps (20,78,79), et peuvent être acquis plus précisément par d'autres moyens : enquêtes de terrain (52), cartes topographiques (21), ou photographies aériennes (88).

Un modèle de terrain le « DEM » (Digital Elevation Model) a été expérimenté avec succès pour estimer les paramètres L et S. Une étude statistique (24) révèle que la définition des unités de sol associée au « DEM » est la plus pertinente pour estimer l'érosion des sols. SPANNER *et al.* (78) estiment le facteur (R) à partir des cartes de précipitations éditées par la N.O.A.A., les facteurs (K), (L), (S) au moyen des cartes pédologiques et topographiques. Il est précisé que le facteur (P) n'a pu être défini à partir des données MSS. La pente (S) et le mode de mise en culture (C) se sont révélés être les coefficients les plus sensibles de l'U.S.L.E. Les auteurs soulignent qu'un résultat « valable » sera fonction de la bonne estimation de ces deux facteurs.

Les modèles hydrologiques

L'étude des ressources en eau d'une région peut avoir pour objectif soit la modélisation du cycle de l'eau soit la quantification des écoulements pouvant exister sur différents bassins versants. Divers modèles ont été proposés qui associent aux inventaires à dominantes descriptives des modélisations de systèmes hydrologiques particuliers.

Le modèle couplé de simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains (25,26) est un modèle de transformation-précipitation-débit basé sur le découpage d'un bassin hydrologique en mailles carrées sur lesquelles seront discrétisées les caractéristiques tant superficielles que souterraines du milieu. La reproduction des débits est obtenue en effectuant le bilan de chaque carreau à chaque « pas de temps ». Le cycle de l'eau y est schématisé en cinq fonctions :

- une fonction d'entrée qui constitue la source des apports en eau dans le système ;
- une fonction production dont le rôle est de répartir les précipitations entre l'infiltration, le ruissellement, l'évapotranspiration et le stockage dans le sol en fonction des caractéristiques physiographiques du bassin ;
- une fonction de transfert de surface ;
- une fonction de transfert souterrain ;
- une fonction de transfert surface-souterrain.

La fonction production est la pièce maîtresse de ce modèle : chaque surface élémentaire détermine sa propre fonction. Il est donc impératif de dresser une carte précise et exhaustive des milieux (1). Les modèles d'éro-

sion interviennent donc dans la définition des propriétés des sols vis-à-vis de leur influence sur la fonction production. Il ne s'agit alors que d'un paramètre parmi les autres, et non une finalité en soi. Ces modèles permettent de mieux comprendre comment se fait la composition des écoulements des différentes zones d'un bassin versant et par là de mieux cerner les processus de genèse des crues.

Il est possible dans le domaine de surface de définir les caractéristiques physiques propres à chaque carreau par l'étude de l'imagerie satellite et la création de néocanaux (7-5 et 7+5), (10). Le néocanal 7-5 donne entre autres l'état de la végétation, le néocanal 7+5 la brillance et le modelé hydrographique. Neuf états de surface ont été définis à partir d'une classification supervisée (Procédure « loterie » basée sur l'analyse des valeurs radiométriques des pixels et leur regroupement en thèmes).

Le modèle développé par le S.C.S (U.S. Soil Conservation Service) est un modèle mathématique, basé sur une description physique des bassins versants (drainage, sol, végétation) et sur des mesures de précipitations et de débits. Les données Landsat trouvent leur utilité dans la définition des grands bassins versants. Elles permettent une vision globale des paysages (1). La répétitivité des observations permet de choisir l'image la mieux adaptée à la résolution du problème posé.

Les auteurs ne s'accordent pas là encore sur les échelles de cartographie. La résolution des données MSS, jugée suffisante pour ALEXANDER *et al.* (1), ne le sera pas pour d'autres auteurs (76). Les données TM plus précises suppriment ces difficultés (59).

SUIVI DE L'ÉROSION

L'analyse multispectrale et multitemporelle des données satellitaires peut déboucher sur une cartographie évolutive des paysages, utile à la connaissance des processus d'érosion. La cartographie diachronique est complexe : il faut séparer l'information évolutive de l'invariance à partir de valeurs de luminances altérées par les conditions d'enregistrement, par la transmissivité atmosphérique, par les rayonnements diffusés par les gaz, aérosols, particules... le problème peut être envisagé de différentes manières :

- il est possible d'exploiter les variations de l'albedo ;
- de « mesurer » l'évolution d'un ou de plusieurs thèmes pour un canal donné.

Analyse multitemporelle basée sur des variations d'albedo

L'albedo est défini comme le rapport du rayonnement solaire réfléchi sur le rayonnement solaire incident.

Différents modèles, plus ou moins élaborés, ont été testés, mais toujours avec une simplification de la réalité, en supposant par exemple :

- une contribution uniforme de l'angle solaire à la clarté de la scène entière, les surfaces horizontales (67) ;
- une diffusion atmosphérique uniforme sur toute la scène.

La méthode développée (77) sur des données MSS prend en compte les valeurs numériques de clarté des pixels, les valeurs d'éclairement solaire, des corrections de la diffusion atmosphérique. Il est tenu compte encore de l'angle solaire, et de la calibration du scanner. L'albedo est un facteur primordial à l'étude de la désertification. La valeur enregistrée de même que le pourcentage de végétation semblent toutefois très liés à la pluviosité du milieu (14).

Analyse multitemporelle basée sur des variations de luminance

BRERA *et al.* (7) ont choisi de « croiser » les informations d'un canal à deux dates dans un histogramme bidimensionnel. A chaque axe est affectée une couleur fondamentale, cyan et jaune par exemple ; si l'on n'enregistre, pour un pixel donné, aucune variation de réflectance entre les deux dates, celui-ci apparaîtra vert, si une variation est enregistrée, il apparaîtra soit bleu-vert, soit jaune-vert. Cette technique permet de localiser, d'évaluer et de contrôler rapidement les inondations. FRANK (22) définit des images résiduelles ; elles correspondent à la différence entre les données MSS enregistrées et les données estimées à partir d'un modèle mathématique (positionnement d'un pixel donné dans un nuage par rapport à la droite de régression des deux nuages). Si le pixel se situe au-dessus des valeurs estimées à partir du canal 5 ou 6 ou du ratio 5/6 il y a dégradation du milieu. DE LA TORRE *et al.* (14) qui utilisent les données Landsat emploient deux paramètres (l'albedo et le pourcentage de couverture d'une cible donnée) comme indicateur des progrès de la désertification. MAINGUET *et al.* (37) ont pris jour après jour sur les images Météosat les renseignements les plus évidents avant d'établir un croquis final.

CONCLUSION

Les avantages généraux tirés de l'utilisation à petite échelle des données de la télédétection spatiale sont les suivants :

- le caractère homogène des observations sur des superficies importantes. Un satellite couvre plusieurs milliers de kilomètres carrés (35 millions d'hectares par image (76)) ;
- une égale facilité d'accès à l'information concernant les régions inhospitalières (8,74,80) ;

— la dissociation de l'information par le système des canaux (57,76) ;

— le caractère global et synthétique des informations recueillies (38,39,86) ;

— la répétitivité, c'est-à-dire la possibilité d'obtenir périodiquement, à courts intervalles, sous réserve de conditions météorologiques favorables, le même type de données, sur une même zone, pour en suivre l'évolution (1,76).

A petite échelle, il s'agit bien souvent de gérer de manière rationnelle un territoire ; *la télédétection spatiale apparaît comme le moyen des inventaires et d'une surveillance systématique sur de vastes superficies* ; ces inventaires consistent à dresser en chaque point un descriptif précis pour un nombre déterminé de paramètres du milieu.

La télédétection peut ouvrir l'accès au recueil d'informations multidisciplinaires dans les pays neufs, elle peut intervenir comme moyen complémentaire aux systèmes traditionnels (71,83), permettant de faciliter voire d'améliorer la saisie des données. Dans presque tous les cas il s'agira d'associer l'imagerie satellite et les photographies aériennes (8,16,79) avec des relevés sur le terrain (20,36,44,65). Les observations faites à petite échelle permettent de cerner les problèmes et d'orienter l'utilisation des moyens au sol. La télédétection spatiale ne se pose pas en concurrente des méthodes « traditionnelles » d'acquisition des données mais en complément. L'accent est mis sur la différence qui existe entre cette vision instantanée du milieu naturel et les inventaires systématiques mettant en œuvre un personnel qualifié, des moyens lourds et entraînant de longs délais d'exploitation (8,16,22,51). La notion du coût de l'opération n'est pas à négliger non plus pour des pays en voie de développement (23).

Dans la démarche adoptée, l'association des utilisateurs au processus d'interprétation est souhaitable (16). Trop souvent en effet, ceux-ci considèrent les traitements utilisés comme des « boîtes noires » qui transforment des données en résultats en ne se préoccupant pas des conditions de validité des hypothèses sous-jacentes et du caractère « relatif » des résultats.

Pour en finir avec ces remarques d'ordre général nous dirons qu'il faut se méfier des prosélytes enthousiastes, et de leurs estimations de coûts, qui cherchent à « vendre » la télédétection spatiale dans des situations où elle n'est pas nécessaire (c'est « l'overselling » critiqué en son temps par les Américains) ou lorsque des méthodes plus classiques peuvent permettre de s'en passer avantageusement.

Limites d'utilisation

Les résultats obtenus à moyenne échelle (échelle régionale), pour des études à objectifs très globaux peuvent

apparaître aux yeux de certains décevants ; nous abordons là les problèmes de limites d'utilisation et de contraintes. Jusqu'à présent, quel que soit le degré de précision de l'analyse et des traitements, les résultats étaient limités par les caractéristiques du système d'acquisition des données.

— La résolution au sol des images MSS de Landsat est insuffisante vis-à-vis des phénomènes à détecter (39,59). Pour pouvoir distinguer correctement un milieu dégradé, il faut que celui-ci couvre plusieurs pixels. Si la superficie de ces milieux est inférieure à trois ou quatre hectares, comme c'est souvent le cas en ce qui concerne les phénomènes d'érosion en régions tempérées, ceux-ci seront en général invisibles sur les images Landsat. De plus, la probabilité de confusion et d'erreur augmente avec la diminution de taille du phénomène observé ; il est donc illusoire de vouloir répertorier toutes les « empreintes » de l'érosion.

— La répétitivité est elle aussi insuffisante (8,9,43) ; la quantité des enregistrements disponibles est largement inférieure au nombre d'images théoriquement réalisables. Pour la France, par exemple, on ne peut espérer plus de six images utilisables par an, c'est-à-dire qui comportent moins de 10 % de nuages.

— Les délais d'acquisition des données sont longs, les mémoires de Landsat fonctionnent en deçà de leurs capacités et il est nécessaire maintenant de demander la programmation d'une mission sur une scène donnée.

— Peu d'organismes élaborent une politique globale d'utilisation des données de la téledétection. Des études ponctuelles ne peuvent conduire qu'à des expériences localisées, parfois remarquables mais il paraît difficile dans ces conditions d'aboutir à une généralisation.

Les possibilités actuelles

Une « deuxième génération » de satellites avec Landsat 5 (lancé le 1^{er} mars 1984) et SPOT 1 (lancé le 21 février 1986) est actuellement en place. Les bandes spectrales du scanner TM plus fines et plus nombreuses,

la haute résolution (30 mètres pour le TM, 10 mètres en panchromatique pour SPOT) vont permettre l'observation de paysages complexes ainsi qu'en témoigne l'acquisition des premières images Spot. Il sera possible alors de travailler à moyenne échelle jusqu'à 1/25 000.

La programmation des visées latérales de SPOT permettra d'augmenter considérablement la répétitivité ; en visée verticale celle-ci est de 26 jours, en orientant les miroirs, à une latitude de 45° comme la nôtre, celle-ci pourra être ramenée à 2 jours. Nous disposerons alors d'un suivi efficace des états de surface.

Les visées obliques vont permettre en outre d'obtenir des images stéréoscopiques et donc nous offrir la possibilité d'intégrer directement la morphologie dans les prochaines études thématiques sur l'érosion des sols.

Les possibilités que nous offrent ces nouveaux systèmes ne doivent pas nous faire oublier les écueils déjà dénoncés :

— développer l'outil pour lui-même ne présente aucun intérêt ;

— chercher à refaire par la téledétection ce que les utilisateurs savent déjà faire autrement ;

— le problème des données de référence au sol, parfois insuffisantes, ou insuffisamment pertinentes, pour comprendre les données enregistrées, risque de s'amplifier avec des échelles d'observation croissantes.

Nous avons à notre disposition un outil nouveau susceptible de nous apporter une nouvelle vision de certains phénomènes qu'il convient d'utiliser à bon escient. Ceci ne veut pas dire que l'interprétation des images spatiales diffère sur le principe de celles des photographies aériennes.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Monsieur POUGET (ORSTOM), Monsieur REVEL (UPS) et Monsieur LATARCHE (GDTA) d'avoir bien voulu me laisser libre accès à leur bibliothèque et de m'avoir prodigué de nombreux conseils qui m'ont permis de rédiger cet article.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) ALEXANDER (D.P.), RAO (A.R.), 1985. — Hydrologic modeling using Landsat MSS data — Machine Proceedings of Remotely Sensed Data Symposium, pp.103-111.
- (2) ANDRAWIS (A.S.), BHATTARAI (K.D.), JOSHI (P.M.), RAJBHANDARI (M.D.), VAIDYA (N.N.), SHERESTHA (P.P.) (1978). — An evaluation of Landsat technology for operational use by Nepal resource agencies — Proc. of the 12th Int. Symp. on Rem. Sens. of Env., Manilla, USA ; *Ann Arbor* ; Michigan, V2, pp.1503 — 1512.
- (3) BERGSMAN (E.), 1974. — Soil erosion sequences on aerial photographs — *ITC Journal*, 3, pp.342-376.
- (4) BERGSMAN (E.), 1974. — Soil erosion toposequences on aerial photographs — Proc. of Symp. on Remote Sensing and Photointerpretation ; Alberta October 7-11, Canada, V1, pp.317-328.
- (5) BLEEKER (P.), 1978. — The application of Landsat imagery to soil degradation mapping at 1 : 5.000.000 of Gambia, Guinea, Sierra Leone, and parts of Senegal,

- Liberia and Ivory Coast — Remote Sensing Unit, FAO Rome.
- (6) BOLLINE, (A.) LAURANT (A.), 1983. — La prévision de l'érosion en Europe atlantique : le cas de la zone limoneuse de Belgique — *Pédologie* XXXIII, 2, pp.117-136.
- (7) BRERA (A.M.), SHAHROKHI (F.), 1978. — Application of Landsat data to monitor desert spreading in the Sahara region — Proc. of the 12th Int. Symp. on Rem. Sens. of Env., *Ann. Arbor*, Mich., USA (V2), pp.1329-1338.
- (8) BREYER (J.), 1982. — Reconnaissance geomorphological terrain classification, Lower Boteti region, Northern Botswana — *ITC Journal*, 3, pp.317-323.
- (9) CARTER (D.J.), HOUGHTON (H.J.), 1982. — Remote sensing of wind erosion in cropland — *In papers selected for presentation at the 16 th Int. Symp. on Rem. Sens. of Env.*, (V1), *Ann. Arbor*, Mich., USA, pp.275-282.
- (10) CHEVALLIER (P.), LOINTIER (M.), LORTIC (B.), 1985. — Water levels of a sahelian Lake — *In Acte of « International Workshop on Hydrologic Applications of Space Technology »*, IAHS, WMO, Cooabeach, août 1985, 12 p.
- (11) COINER (J.C.), 1980. — Using Landsat to monitor changes in vegetation cover induced by desertification processes — Proceedings of the 14 th Int. Symp. on Rem. Sens. of Env., ERIM, *Ann. Arbor*, Mich., USA ; pp.1341-1350.
- (12) COOLEY (M.E.), TURNER (R.M.), 1982. — Applications of Landsat products in range and water-managment problems in the sahelian zone of Mali, Upper Volta and Niger — Geological Survey Professional Paper, U.S. Dep. of. the interior, N° 1058, 52 p.
- (13) CORMARY (Y.), MASSON (J.), 1964. — Etude de conservation des eaux et du sol au Centre de Recherche du Génie Rural de Tunisie. Application à un projet type de la formule de perte de sols de Wischmeier — *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* vol.II, n° 3, pp.3-26.
- (14) DE LA TORRE (J.C.), SASSER (J.H.), LIRA (J.), 1985. — A measuring reference system to quantify the desertification process in a semiarid ecosystem based on LANDSAT MSS Data — *in Machine Proceeding of Remotely Sensed Data Symposium*, pp.112-121.
- (15) DE NONI (G.), NOUVELOT (J.P.), WINCKELL (A.), et collaborateurs équatoriens, 1984. — Los principales procesos erosivos en Ecuador — Pronareg, Pronacos, Acuerdo Mag-ORSTOM, Quito, 31 p.
- (16) DOSSO (M.), KILLIAN (J.), SAVARY (G.), 1983. — Campagne de simulation des données de Spot Burkina : Région de Bagre — *In Expériences de simulation du satellite Spot en Afrique de l'Ouest* (ed. G.D.T.A.), p.73-96.
- (17) EL-BAZ (F.), 1978. — The meaning of desert color in earth orbital photographs — *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, pp.61-73.
- (18) FAO, 1978. — Methodology for assessing soil dégradation — FAO — UNDP.
- (19) FAO, 1979. — Methodology for soil degradation assessment — FAO — UNDP. Rome, Italy.
- (20) FENTON (T.E.), 1982. — Estimating soil erosion by remote sensing techniques — *In Remote Sensing for Resource Management ;* (ed. by Johannsen C.J., Sanders J.L.) IOWA, USA ; Soil Conservation Society of America, pp.217-231.
- (21) FOIN (P.), 1985. — Cours de télédétection — Fascicule 2 ; Bases sur la connaissance du milieu naturel et humain (ed. Institut Géographique National ; n° 107), 78 p.
- (22) FRANK (T.D.), 1984. — Assessing change in the surfacial character of a semi-arid environment with Landsat residual images — *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol.L, N° 4, avril, pp.471-480.
- (23) GEORGE (T.S.), TAYLOR (R.S.), SHUBINSKI (R.P.), 1980. — Cost effectiveness of conventional and remote sensing techniques for watershed planning — Proc. of the 14 th Int. Symp. on Rem. Sens. of Env., *Ann. Arbor*, Mich., USA, pp.739-644.
- (24) GESCH (D.B.I.), NAUGLE (B.I.), 1984. — An analysis of the utility of Landsat Thematic Mapper data and digital elevation model for predicting soil erosion — *In Machine Processing of Remotely Sensed Data Symposium*, pp.260-265.
- (25) GIRARD (G.), MORIN (G.), CHARBONNEAU (R.), 1972. — Modèle précipitations-débits à discrétisation spatiale — *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol.IX, n° 4, pp.35-52.
- (26) GIRARD (G.), LEDOUX (E.), VILLENEUVE (J.P.), 1981. — Le modèle couplé simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un système hydrologique, *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XVIII, n° 4, 191 p.
- (27) GURUSWANY (V.), KRISTOF (S.J.), BAUMGARDNER (M.), 1980. — A case study of soil erosion detected by digital analysis of the remotely sensed multispectral Landsat scanner data of a semi-arid Land in Southern India. (BURROF P.G., MORRISON D.B., ed) — *Machine Processing of Remotely Sensed Data and Soil Information Systems and Remote Sensing and Soil Survey* — Proc. of the 6th An. Symp. held at Lafayette, Indiana USA ; Purdue Univ. ; pp.266-271.
- (28) HAMZA (A.), 1978. — Télédétection et cartographie de l'érosion en Tunisie centrale — Proc. of the Int. Symp. on Rem. Sens. for Observation and Inventory of Earth Resources and the Endangered Environment, July 2-8, Freiburg, F.R. of Germany. V3, pp.2231-2237.
- (29) ISAACSON (D.L.), SMITH (H.C.), ALEXANDER (C.J.), 1982. — Erosion hazard reduction in a wildlife damaged area. *In Remote Sensing for Resource Management* (ed. by JOHANNSEN C.J., SANDERS J.L.), Iowa, USA, Soil Conservation Society of America, pp.179-190.
- (30) JACOBBERGER (P.A.), 1982. — Drought-Induced wind erosion in southwestern Kansas, U.S.A. Integration of Landsat, Seasat, and airborne multispectral data — Proc. of the Int. Symp. on Rem. of Env. ; First Thematic Conference : « Remote Sensing of Arid and Semi-arid Lands », January 19-25, Vol.2, pp.937-946.
- (31) JOHANNSEN (C.J.), SANDERS (J.L.), 1982. — Remote sensing for resource management — Ankeny, Iowa, USA ; Soil Conservation Society of America, 665 p.
- (32) KING (C.), 1985. — Etude des sols et des formations superficielles par télédétection. Approche de leurs caractéristiques spectrales et temporelles dans le visible et dans le proche infra-rouge — Thèse INA-PG, 174 p.
- (33) LATZ (L.), WEISMILLER (R.A.), VANSCHOYOC (G.E.), 1981. — A study of the spectral reflectance of selected eroded soils of Indiana in relationship to their chemical and physical properties — Purdue University, Labora-

- tory for Applications of Remote Sensing. Lafayette, Indiana ; USA ; 71 p.
- (34) LAURANT (A.), BOLLINE (A.), 1978. — Caractérisation des pluies en Belgique du point de vue de leur intensité et de leur érosivité — *Pédologie* XXVIII, 2, pp.214-232.
- (35) LEROY (G.), 1980. — Utilisation des données satellites en pédologie. ORSTOM, Paris, 43 p. *multigr.*
- (36) LOMBARDO (M.A.), CARVALHO (V.C.), 1980. — Preliminary analysis of the potential of Landsat imagery to study desertification — Proc. of the 14 th Int. Symp. on Rem. Sens. of Env., 23-30 April, San Jose, Costa Rica, *Ann. Arbor.*, Mich., USA ; Vol. 2, pp.645-652.
- (37) MAINGUET (M.M.), SPIERS (B.), CANON (W.D.), LANGERAAR (L.B.), 1978. — Application of Landsat Imagery to soil degradation assessment and mapping at 1 : 5.000.000 : Niger, Upper Volta, Eastern Mail, Northern Nigeria, Chad, and Central African Empire — FAO Rome.
- (38) MAINGUET (M.), COSSUS (L.), CHAPELLE (A.M.), 1980. — Utilisation des images Météosat pour préciser les trajectoires éoliennes au sol, au Sahara et sur les marges sahéliennes. Interprétation des documents Météosat du 28 mars 1978 au 9 février 1979. — *Bull. Soc. Fr. de Photogrammétrie et de Téledétection* ; 1980-2, N° 78, pp.1-15.
- (39) MAINGUET (M.), CHEMIN (M.C.), 1981. — Utilisation des images Landsat pour la cartographie de la dynamique éolienne et la définition de son influence dans la désertification en milieu sahélien — 4° Colloque International du G.D.T.A., 22-26 juin, Toulouse, pp.135-149.
- (40) MALON (J.F.), 1984. — Principaux traitements des images satellitaires et associées — Point 1984, B.R.G.M. Département carte géologique et géologie générale. Division téledétection. 84 SGN 396 GEO. 47 p.
- (41) Mc CORD (T.B.), CLARK (R.N.), MELOY (A.), SINGER (R.B.), 1982. — An example of the application of a procedure for determining the extent of erosional and depositional features and rock and soil units in the Kharga oasis region, Egypt, using remote sensing — Presented at the first Thematic Conference : « Remote Sensing of Arid and Semi-arid Lands », Cairo, Egypt, Jan. 19-25, V2, pp.909-919.
- (42) MENSCHING (H.G.), IBRAHIM (F.N.), 1980. — Mapping desertification in the Sudan : a methodological approach — School of Geography, Univ. of New South Wales, pp.19-28.
- (43) MILLINGTON (A.C.), TOWNSHEND (J.R.G.), 1984. — Remote sensing applications in African erosion and sedimentation studies — Proc. of the Harare Symposium IAHS-AISH publication. N° 144, pp.373-384.
- (44) MILLS (G.F.), 1972. — The application of multispectral remote sensing to the study of soil properties affecting erosion — 1 st Canadian Symposium on Remote Sensing, pp.731-743.
- (45) MITCHELL (C.W.), PACHECO (R.), HOWARD (J.A.), 1978. — The application of Landsat imagery to the soil degradation mapping of Jordan, Syria and Iraq at 1 : 5.000.000 — FAO, Rome.
- (46) MITCHELL (C.W.), HOWARD (J.A.), 1978. — The application of Landsat imagery to soil degradation mapping at 1 : 5.000.000 — F.A.O., Rome, Italy. 43 p.
- (47) MITCHELL (C.W.), HOWARD (J.A.), 1978. — The application of the Landsat imagery to soil degradation mapping at 1 : 1.000.000 — FAO, Rome.
- (48) MITCHELL (C.W.), GHORASHIAN (K.), 1978. — The application of Landsat Imagery to soil degradation mapping of Iran at 1 : 5.000.000 — FAO Rome.
- (49) MITCHELL (C.W.), HOWARD (J.A.), MAINGUET (M.M.), 1982. — Soil degradation mapping from LANDSAT in North Africa and the middle East — Presented at the first Thematic Conference « Remote Sensing of Arid and Semi-arid Lands » ; Cairo, Egypt, Jan.19-25, V2, pp.899-908.
- (50) MORGAN (K.M.), 1978. — Assessing the potential for soil erosion using remote sensing image interpretation — PHD Dissertation, University of Wisconsin-Madison.
- (51) MORGAN (K.M.), 1979. — Application of Remote Sensing airphoto interpretation to cropland erosion studies — PHD, 1979, University of Wisconsin-Madison, 111 p.
- (52) MORRISON (R.B.), COOLEY (M.E.), 1973. — Application of ERTS-1 multispectral imagery to monitoring the present episode of accelerated erosion in Southern Arizona — In Symp. on Significant Results obtained from the Earth Resources Technology Satellite-1. New Carrollton, Maryland, March 1973, Vol.1, pp.283-190.
- (53) MOWER (R.D.), ARDILA (T.M.), 1982. — Using Landsat Digital Data to identify erosional zones in the Cuenca Alta del Rio Bogota. In papers selected for presentation at the 16 th Int. Symp. on Rem. Sens. of Env., Vol.1, *Ann. Arbor.*, Mich., USA ; pp.257-261.
- (54) NAERT (B.), 1977. — Méthodologie de l'application de la téledétection à la cartographie des sols. Premières conclusions obtenues à partir des traitements photographiques des données — 1^{er} Colloque Pédologie et téledétection, Rome.
- (55) NAKATA (J.K.), WILSHIRE (H.G.), BARNES (G.G.), 1976. — Origine of Mojave Desert dust plumes Photographed from space. *Geology*, Vol. 4, pp.644-648.
- (56) OPRESCU (N.), MANDESCU (E.), 1978. — Résultats obtenus dans l'inventaire des ressources du bassin inférieur du Danube et dans le delta du Danube par téledétection ; technologies adoptées au cas des moyens restreints — Proc. of an Int. Conf. on Earth Observation from Space and Management of Planetary Resources. Toulouse, 6-11 March — (ESA SP-134), pp.63-76.
- (57) OTTERMAN (J.), GORNITZ (V.), 1983. — Saltation versus soil stabilisation : two processes determining the character of surfaces in arid regions — *Catena*, Vol.10, n° 4, pp.339-362.
- (58) OWE (M.), ORMSBY (J.P.), 1984. — Improved classification of small-scale urban watersheds using thematic mapper simulator data — *Int J. Remote Sensing*, Vol. 5, N° 5, 761-770.
- (59) PACHECO A., (1977). The use of Landsat Imagery for assessing soil degradation in Morocco. 1^{er} Colloque Pédologie-Téledétection, 29 août - 7 sept. — Rome pp.109-117.
- (60) PENA (M.S.), CAMPI (M.G.), MARLENRO (N.), 1982. — Potential application of Remote Sensing to the study of arid and semi-arid Lands in Argentina — Presented at the first Thematic conference « Remote Sensing of Arid and Semi-Arid Lands », Cairo ; Egypte, Jan. 19-25, pp.33-36.

- (62) PICKUP (G.), NELSON (D.J.), 1984. — Use of Landsat radiance parameters to distinguish soil erosion, stability, and deposition in arid central Australia. *Rem. Sens. of Env.* 16 : 195-209.
- (63) POUGET (M.), 1985. — Analyse et interprétation des données Télédétection en Pédologie — CETEL 85/86, ENSG/GDTA, 6 p.
- (64) POUGET (M.), LORTIC (B.), SOUISSI (A.), ESCADAFAL (R.), MTIMET (A.), 1984. — Apport des données MSS LANDSAT pour la cartographie des ressources en sols en régions arides (feuille au 1/200 000 de Tatahouine et de Zarzis, Tunisie). 18th Symp. Int. sur l'observation de la terre, 1-5 oct. 1984, Paris, France.
- (65) POUQUET (J.), 1971. — Les sciences de la terre à l'heure des satellites P.U.F., Paris, 259 p.
- (66) RIQUET (J.), 1982. — Evaluation globale de la dégradation des sols — *Nature et ressources*, Vol.XVIII, N° 2, avril-juin, pp.19-23.
- (67) ROBINOVE (C.J.), CHAVEZ (C.Jr), GÉHRING (D.), 1981. — Arid Land monitoring using Landsat albedo difference image — *Rem. Sens. of Env.* 11 : 133-156.
- (68) RODRIGUEZ-BEJARENO (D.), 1978. — Applications of Landsat and Skylab imagery in Mexico. Detection of erosion and forest damage — *In papers selected for presentation to the 12th Int. Symp. on Rem. Sens. of Env.*, Vol. 3, *Ann. Arbor.*, Mich., USA, pp.1609-1615.
- (69) SAMBASIVA RAO M., 1985. — Environmental geomorphology and Landscape management of Tamilnada using remote sensing data — 6th Asian Conf. on Remote Sensing, Nov. 21-26 1985, Hyderabad, India, pp.85-90.
- (70) SEUBERT (C.E.), BAUMGARDNER (M.F.), WEISMILLER (R.A.), 1979. — Mapping and estimating areal extent of severely eroded soils of selected sites in Northern Indiana — *In Machine Proc. of Remotely Sensed data.* 5th An. Symp. held at Purdue Univ., West Lafayette, Ind. pp.234-239.
- (72) SILLEOS (N.G.), 1981. — The effect of calcium carbonate on soil erodibility in a survey area in northern Greece — *ITC Journal* 1981-4, pp.418-434.
- (73) SINGH (B.M.), 1977. — Interpretation of satellite imagery for delineation of ravines — *J. Indian Soc. Photo-Int.* 5(1), pp.31-34.
- (74) SINGH (A.N.), VENKATARATNAM (L.), SINHA (A.K.), VENKATACHALAM (P.), RAO (K.R.), DWIVEDI (R.S.), 1983. — Utilisation of Landsat data for dealineating, mapping and managing of soil ressources. The problems and prospects under Indian conditions. Proc. of the 17th Int. Symp. on Rem. Sens. of Env., *Ann. Arbor.* ; Mich., USA ; May 9-13, pp.787-795.
- (75) SINGH (A.N.), 1980. — Delineating ravinous areas on aerial photographs and satellite imageries — a comparative study — Seminar on Application of Photo-interpretation and Remote Sensing Techniques for Natural Resources survey and environmental Analysis. IPI, Dehradun, India.
- (76) SLACK (R.B.), WELCH (R.), 1980. — Soil conservation service runoff curve number estimate from Landsat data — *Water resources Bulletin*, Vol.16, N°5, pp.887-893.
- (77) SOBUR (A.S.), CHAMBERS (M.J.), CHAMBERS (R.), DAMOPOLII (J.), HADI (S.), HANSON (A.J.), 1978. — Remote sensing applications in the southeast Sumatra coastal environment. *Rem. Sens. of Env.*, Vol. 7, N° 4, : 281-303.
- (78) SPANNER (M.A.), STRAHLER (A.H.), ESTES (J.E.), 1983. — Soil Loss prediction in a geographic information system format — Presented at the 17th Int. Symp. on Rem. Sens. of Env., Vol.1, *Ann. Arbor.*, Mich., USA ; pp.81-102.
- (79) STEPHENS (P.R.), CIHLAR (J.), 1981. — The potential of Remote Sensing to monitor soil erosion on cropland — Proc. of the 15 th Int. Symp. on Rem. Sens. of Env., *Ann. Arbor.*, Mich. USA, pp.985-995.
- (80) STEPHENS (P.R.), CIHLAR (J.), 1982. — Mapping erosion in New Zealand and Canada — Remote Sensing for Resource Management (ed by Johannsen C.J., Sanders J.L.), Iowa, USA, Soil Conservation Society of America, pp.232-242.
- (81) STRAHLER (A.H.), ESTES (J.E.), MAYNARD (P.F.), MERTZ (F.C.), STOW (D.A.), 1980. — Incorporating collateral data in Landsat classification and modelling procedures — Proc. of the 14 th Int. Symp. on Rem. Sens. of Env., *Ann. Arbor.*, Mich. USA, pp.1009-1026.
- (82) SVENSSON (M.), 1972. — The use of stress situation in vegetation for detecting ground conditions on aerial photographs — *Photogrammetria*, Vol. 28, N° 3, sept.72, pp.75-87.
- (83) VASS (P.A.), V GENDEREN (J.L.), 1978. — Monitoring environmental pollution by remote sensing — Proc. of the 12th Int. Symp. on Rem. Sens. of Env. 1978, Manila, *Ann. Arbor.*, Mich., USA, Vol.1, pp.219-234.
- (84) VENKATARATNAM (L.), 1980. — Delineation and mapping of agricultural soil limitations/hazards in arid and semi-arid tropics using Landsat MSS data. An Indian example — Proc. of the 14 th symp. on Rem. Sens. of Env. Vol.1, *Ann. Arbor.*, Mich. USA, pp.905-914.
- (85) VENKATARATNAM (L.), 1984. — Mapping of Land/soil degradation using multispectral data — 8^e Symposium Canadien de Télédétection : 4^e Congrès de l'association Québécoise de Télédétection : L'A.Q.T./C.R.S.S. pp.421-429.
- (86) WESTIN (F.C.), FRAZEE (C.J.), 1975. — Landsat-1 data, its use in a soil survey program — Proc. of the NASA Earth Resources Survey Symposium, HOUSTON, Texas, June, Vol.1, pp.67-95.
- (87) WESTIN (F.C.), 1982. — Soil and Land resource inventory using Landsat data — Remote Sensing for Resource Management (ed by JOHANSEN C.J., SANDERS J.L.), IOWA, USA, *Soil Cons. Soc. of Am.*, pp.243-252.
- (88) WISCHMEIER (W.H.), SMITH (D.D.), 1960. — A universal soil-loss equation to guide conservation farm planning — Trans. 7th Int. Congr. Soil. Sci. (Madison, Wis.) V1, pp.418-425.
- (89) WISCHMEIER (W.H.), SMITH (D.D.), 1962 — Soil Loss estimation as a tool in soil and water management planning. *Assoc. Int. Hydrol. Sci.* V 59, pp.148-159.
- (90) WISCHMEIER (W.H.), SMITH (D.D.), 1965. — Predicting rainfall-erosion losses from cropland East of the Rocky Mountains — Guide for selection for practice for soil and water conservation. *Handbook* N° 282. USDA, Washington, D.C., 47 p.
- (91) WISCHMEIER (W.H.), SMITH (D.D.), 1978 — Predicting rainfall-erosion losses — *Supersedes Agriculture Handbook*, N° 282, 58 p. U.S. Govern printing office.