

# Apport de l'interprétation visuelle des images satellitaires pour l'analyse spatiale des sols

## Un exemple dans la région de Lodève

M-C. Girard

Institut National Agronomique Paris-Grignon - UER Dynamique des Milieux et Organisations spatiales - 78 850 Grignon

### RÉSUMÉ

L'objectif de cette étude est de présenter une méthode d'utilisation de la télédétection dans la cartographie des sols. L'interprétation des données de télédétection en vue de l'étude des sols se fait de deux manières : a) directe à partir des valeurs des réflectances, ce qui permet de détecter la rugosité, la couleur, des classes de matière organique, de calcaire etc., b) indirecte en définissant des lois chorologiques (lois d'organisation de la distribution des sols) dans les pédopaysages (ensembles des horizons pédologiques et des éléments paysagiques qui y sont liés).

La méthode employée est fondée sur une interprétation visuelle des images satellitaires Infra-Rouge Couleur (*fig. 1*) - qui se fait en fonction du comportement spectral des sols (*fig. 3*), de manière systématique en se basant sur une fiche de description des plages (*fig. 2*). Ensuite une classification des 635 plages décrites sur près de 2 500 km<sup>2</sup> est effectuée en utilisant une méthode statistique supervisée : DIMITRI (*fig. 4*).

Une première carte a été construite avec 9 unités cartographiques (*hors texte 1, et tab. 1 et 2*) en utilisant 9 variables relatives à l'occupation du sol et aux états de surface des sols, une seconde avec 17 unités se basant sur 29 variables comportant, en plus, des variables relatives à la morphologie (*hors texte 2*).

On a comparé alors cette seconde carte avec une carte de pédopaysages. Celle-ci a été établie à partir de nombreuses cartes pédologiques d'échelles diverses, pour une synthèse au 1/250.000 dans le cadre du programme français «Inventaire Gestion et Conservation des Sols». La comparaison, faite par une grille de points kilométriques (*tab. 3*), fait apparaître un accord de 53,7 % quand on prend toutes les régions y compris celles qui sont sous forêt. Cet accord est de 73,8 % pour les régions où la surface du sol est directement perceptible sur image satellitaire.

Une analyse des contours des plages cartographiques obtenues par télédétection satellitaire montre que, si on diminue l'information sémantique de 82 % , on ne perd que : moins de 8 % des unités cartographiques par rapport à la carte établie par synthèse du terrain (*tab. 4*), et que : moins de 18 % des limites des plages (*tab. 5 et fig. 5 et 6*). L'opération est donc significativement avantageuse pour établir une segmentation pédologique de la zone à étudier.

### Mots clés

Télédétection - pédologie - analyse statistique - cartographie - limites - plages cartographiques.

## SUMMARY

### CONTRIBUTION OF VISUAL INTERPRETATION OF SATELLITE IMAGES FOR SPATIAL ANALYSIS OF SOILS.

#### **An example in the Lodève area**

*This study presents a method of soil mapping with remote sensing data from visible and near infra-red spectrum. The interpretation of remote sensing data for soil survey is twofold : a) directly through reflectance values, which enables to study soil surface roughness, surface colour, organic matter content, limestone content..., b) indirectly through definition of chorology laws (laws of soil distribution patterns) inside soil landscapes ( sets of soil horizons and associated soil landscapes).*

*The method is based on visual interpretation of satellite images (fig.1) performed according to soil spectral behaviour (fig.3), systematically described using a description file (fig.2). Then the 635 mapped areas on nearly 2,500 km<sup>2</sup> are classified by a supervised statistical method : DIMITRI (fig.4).*

*The first map consists of 9 mapping units (colour plate 1, tables 1 and 2), using 9 variables concerning land cover and soil surface state, the second one contains 17 mapping units based on 29 variables, some of them concerning morphology (colour plate 2).*

*This second map is then compared to a soil landscape map resulting from the synthesis at a scale of 1/250,000 in the frame of the French programme «Inventaire Gestion et Conservation des Sols», of various soil maps at different scales. Comparison is done using a grid (table 3) of approximately 2,500 dots, and shows, for areas where soil surface is directly seen from satellite images, a good agreement between both maps for 73.8% of the dots. It falls to 53.7% when considering also all forested areas.*

*Analysis of the shape of the mapping areas obtained by remote sensing data interpretation shows that when semantic information is decreased of 82%, less than 8% of the mapping units (table 4) and less than 18% of the limits of the areas (table 5), are lost when compared to the map obtained from synthesis of field work. This method is significantly interesting for stratification of information prior to soil mapping.*

#### **Key-words**

*Remote sensing, soil science, statistical analysis, mapping, limits, mapping areas*

**A** l'heure de l'Europe, il devient nécessaire de trouver des outils pour gérer l'espace au niveau non plus local mais régional. Des méthodes pour structurer l'espace, conçues depuis longtemps (Girard, 1973), se développent en se fondant, en particulier, sur la télé-détection (Favrot, *et al.*, 1994).

Les images satellitaires permettent d'étudier tous les phénomènes visibles en surface de la terre, et donc en particulier la surface des sols nus ainsi que les diverses occupations du sol selon la saison ou l'année. Cette information est exhaustive, et couvre la surface du globe (Girard M-C. et C-M., 1989).

Il est possible de tenter une analyse spatiale sur ces documents en se basant sur les nouveaux concepts de la pédologie, et en particulier ceux de pédopaysage, de chorologie et de cartogénèse.

## MÉTHODE D'INTERPRÉTATION DES IMAGES SATELLITAIRES

### De nouveaux concepts

Le concept de **pédopaysage** (Girard, 1983a) : "*ensemble des horizons pédologiques et des éléments paysagiques : végétation, effets des activités humaines, géomorphologie, hydrologie, substrat ou roche-mère, dont l'organisation spatiale permet de définir dans son ensemble une (ou une partie d'une) couverture pédologique*", met en valeur les relations entre les données intrinsèques de la couverture pédologique et les informations extrinsèques à la couverture pédologique. On définit des sous-ensembles : unités de pédopaysage, puis éléments de pédopaysage.

De même qu'il existe des **lois pédogénétiques** qui régissent l'organisation des horizons au sein de la couverture pédologique, il existe des lois de distribution et d'organisation des facteurs de pédogénèse dans un espace géographique : les **lois chorologiques** (du grec Choros : la contrée) définissant les "*liens qui existent entre la caractérisation sémantique des unités pédologiques retenues (facteurs intrinsèques) et leur distribution et organisation dans le paysage à trois dimensions (facteurs extrinsèques)*".

Cette notion débouche sur la **cartogénèse** : étude dans l'espace et dans le temps de l'organisation de la couverture pédologique, et la distinction de la **cartographie** qui est la problématique de la représentation (en deux dimensions) du volume (trois dimensions) qu'est la couverture pédologique.

En utilisant ces concepts de paysage on peut effectuer une structuration régionale du territoire à partir des données de télé-détection. En effet, les pédopaysages sont constitués d'une combinaison d'unités de pédopaysage qui représentent des zones suffisamment vastes pour qu'on puisse les identifier en

télé-détection satellitaire avec des résolutions géométriques de 10 à 30 m.

### Utilisation de la télé-détection pour la carte pédologique

Une carte de sols est un modèle simplifié de l'organisation de la couverture pédologique indiquant la répartition spatiale de différents sols de référence dont la description est fournie dans une notice explicative. L'objectif du cartographe est de subdiviser les couvertures pédologiques en sous-ensembles territoriaux qui puissent être localisés et délimités avec précision sur un fond topographique (Baize et King, 1991; Baize, 1986). La carte des sols se présente sous la forme de plages cartographiques délimitant des zones dont le contenu se réfère aux unités cartographiques que l'on trouve dans la légende et la notice.

L'informatique est un outil intéressant, dans le domaine de la cartographie des sols, pour élaborer une carte modélisée ou une carte de synthèse. L'informatique autorise des traitements numériques et des traitements statistiques par divers modèles tels que DIMITRI (Girard et King, 1988).

En matière d'analyse spatiale de la couverture pédologique, on peut utiliser les images satellitaires de diverses manières.

Il est possible de s'en servir comme fond de plan, ce qui est fort utile dans certaines régions du monde. On désire alors reconnaître sur les images ce que l'on peut voir sur le terrain, tant en matière d'occupation des sols qu'en tant que couleur de la surface des sols. L'image est alors utilisée sur le terrain directement. C'est la fonction d'initialisation.

On peut s'en servir pour partitionner un espace géographique et préparer des cheminements de reconnaissance, des zones d'échantillonnage en vue d'établir une carte des sols. L'image est alors interprétée avant d'aller sur le terrain. C'est la fonction de segmentation.

On peut aussi se baser sur les images satellitaires pour effectuer une carte pédologique de synthèse en se basant sur des cartes d'échelles différentes, couvrant des superficies différentes et présentant entre elles des zones non étudiées. Les images sont alors utilisées après les études pédologiques. Ces dernières servent alors de référence pour le traitement des données de télé-détection. C'est la fonction d'unification et d'extrapolation.

### Interprétation directe des états de surface du sol

Le suivi radiométrique de terrain permet de définir l'évolution des états de surface des sols de diverses couleurs en fonction de leur recouvrement par la végétation et des ombres portées de la végétation. Ainsi divers types de sols peuvent être caractérisés à l'aide des données radiométriques de terrain lorsqu'il y a un rapport entre la surface du sol et le type de sol. En fait on identifie uniquement la couche la plus superficielle des sols (Girard C-M et M-C, 1975 ; Cipra *et al.*, 1980 ; Escadafal *et al.*, 1988).

La luminance mesurée depuis l'espace étant toujours très fortement corrélée aux données radiométriques de terrain (Cipra *et al.*, 1980 ; Thompson *et al.*, 1983), il est donc possible d'interpréter les états de surface du sol par satellites en se basant sur la réflectance de terrain (Lefebvre d'Hellencourt, 1981 ; King C., 1983 ; Combe, 1984 ; Traube, 1985 ; Courault, 1986 ; Courault et Girard, 1988b ; Agbu *et al.*, 1990a).

Des études ont permis de démontrer qu'il existe une bonne corrélation entre les mesures effectuées par spectrométrie sur 1 cm<sup>2</sup>, par radiométrie sur 1 m<sup>2</sup> et les mesures relevées sur les images sur 100 m<sup>2</sup>. Quand les zones étudiées sont relativement homogènes (Courault, 1989), il n'y a pas de perte d'informations entre les mesures faites sur des placettes d'observation (50 cm / 50 cm) ou sur une parcelle de 1 000 m<sup>2</sup>.

Dans le cas des images satellitaires, les variables les plus importantes pour les sols nus sont les caractéristiques de la surface :

- la rugosité (King C., 1985 ; Cierniewski, 1988 ; Courault, 1989), qui lorsqu'elle est forte fait diminuer la réflectance, mais qui donne des valeurs très élevées de réflectance pour une surface lisse ;
- la composition minéralogique, qui permet de séparer les calcaires du quartz et du gypse ;
- et la couleur (Escadafal, 1989), qui est si importante pour faire la corrélation avec le terrain. Selon Agbu *et al.* (1990b), les images SPOT permettent de définir la clarté et la pureté des sols, mieux que sur la carte des sols, les résultats sont moins bons pour la teinte.

Interviennent aussi :

- les teneurs en calcaire, qui, entre 25 et 55 %, sont liées positivement avec la réflectance ;
- la teneur en matière organique, qui lorsqu'elle croît entre 1,5 et 5 %, entraîne une diminution de la réflectance ;
- le fer qui demande d'avoir une bande de longueur d'onde dans le bleu pour pouvoir être identifié ;
- et en dernier lieu, l'humidité qui n'intervient sur le signal que si les paramètres précédents sont fixes (Girard, 1983b).

La surface du sol est très importante car elle constitue l'interface au niveau de laquelle s'exerce la réception des flux thermiques et hydriques et par voie de conséquence des flux biologiques. C'est aussi le lieu qui régit la séparation des eaux, entre infiltration et ruissellement, d'où son importance en matière d'érosion.

En ce qui concerne la végétation, le facteur de réflectance varie avec le recouvrement végétal et le stade phénologique (Girard C-M., 1987). La réflectance du couvert végétal dans le proche infra-rouge est forte quand la végétation recouvre le sol de plus de 40 %. Par contre, ce sont les caractéristiques spectrales du sol qui prédominent lorsque le recouvrement végétal est inférieur à 30% (Girard C-M. et Girard M-C., 1975 ; Courault et Girard M-C, 1988 ; Yongchalerchai, 1993).

Avec ses capteurs à haute résolution (10 ou 20 m) et ses possibilités de visée latérale, SPOT fournit des images dont l'utilisation opérationnelle se développe dans de nombreux domaines de cartographie, de ressources renouvelables, etc. En effet, on peut obtenir la vision en relief par stéréoscopie, et dans l'interprétation visuelle, les ombres et les couleurs du sol sont aisément repérables. On s'est donc basé sur ces deux paramètres pour faire le lien entre l'interprétation visuelle, l'interprétation des images numériques et les mesures au sol.

### Interprétation indirecte des images de télédétection

Actuellement, l'interprétation la plus efficace des images satellitaires associe l'utilisation des méthodes assistées par ordinateur et l'analyse visuelle. L'interprétation visuelle permet l'analyse la plus sûre des structures de l'image (Girard C-M. et Girard M-C., 1973 ; Girard M-C., 1986) ; par contre c'est en utilisant les possibilités de l'ordinateur que l'interprétation des textures (ici les comptes numériques des différents pixels) se fait le plus rigoureusement (Girard M-C. et C-M., 1989 ; Bonn *et al.*, 1989).

Cette dernière permet de caractériser les principaux objets présents : sols, végétations, eaux, etc, d'une manière fidèle, systématique et exhaustive par leur comportement spectral. Avec les différents algorithmes dont on dispose dans les logiciels, il est possible de réaliser diverses images mettant en valeur tel ou tel type d'information. Les analyses en composantes principales permettent de définir les canaux qui comportent le plus d'information. Cela est surtout utile quand on dispose de plusieurs images prises à des dates diverses et contenant de nombreux canaux. D'autres méthodes de segmentation statistique se basent sur des zones de référence, connues sur le terrain (approche statistique). Enfin des méthodes basées sur le seuillage prennent appui sur les comportements spectraux des divers objets (approche physique). Toutes ces méthodes nécessitent sur le terrain des zones de contrôle.

La détermination des unités de paysage se fait visuellement, à partir d'une ou plusieurs images préparées par les méthodes précédentes. On caractérise chaque unité délimitée par une série de variables ayant trait : à l'état de surface du sol (rugosité, couleur, calcaire, matière organique, fer, humidité), au recouvrement végétal (état chlorophyllien, structure des tissus végétaux, humidité), à la turbidité de l'eau (Girard, 1983b). On définit les abondances de ces différents facteurs dans l'unité, ainsi que leurs positions relatives. On y adjoint aussi des informations extrinsèques aux images utilisées et provenant de divers documents cartographiques : botaniques, pédologiques, topographiques, (modèle numérique de terrain), géomorphologiques, géologiques.

On effectue, ensuite, une classification ascendante de ces unités en se basant sur des unités de référence, fondées sur des lois chorologiques. Les classifications permettent alors, soit de vérifier si ces lois chorologiques sont respectées et dans quels lieux, soit d'inciter à en proposer d'autres.

Cette analyse par unité de paysage permet de définir des entités géographiques définies par un ensemble constant de facteurs basés sur les composantes principales du milieu naturel. A chacune de ces entités correspond un motif défini par une combinaison des diverses variables. Ces entités peuvent être regroupées à différents niveaux hiérarchiques et constituent des ensembles emboîtés. Cela représente une très bonne base de travail pour réaliser une segmentation du milieu afin d'élaborer des structurations régionales. A partir de cette segmentation géographique on peut élaborer, entre autres, des bases de données sur les sols au niveau régional associées à une représentation graphique de l'organisation pédologique du milieu. Il faut évidemment y adjoindre toute une série d'informations sur les sols, saisies sur le terrain.

Ceci, par exemple, constitue la base du programme "Inventaire, Gestion et Conservation des Sols" (IGCS), initié par le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche (INRA et Direction de l'Espace Rural et de la Forêt), dont l'un des buts est de couvrir la France d'informations pédologiques pour une représentation au 1 / 250 000 (Girard, 1992) afin de constituer des Systèmes d'Information pour l'Aide à la Décision.

### Présentation d'un exemple

Afin de montrer les possibilités d'utilisation de la téledétection en matière de cartographie pédologique on en a fait une application sur un exemple.

L'étude entreprise ici, à partir des images satellitaires, a pour objectif de mettre en oeuvre, l'interprétation des états de surface des sols à partir de leur réflectance, et leurs positions géographiques afin de définir des pédopaysages (Yongchalemchai, 1993). Ces derniers seront comparés avec une carte des sols précédemment élaborée (Bornand *et al.*, 1988) afin de savoir quelle peut être l'efficacité de l'interprétation des pédopaysages pour l'analyse de la couverture pédologique.

La zone étudiée recouvre une superficie de 2 469 km<sup>2</sup>, comprise entre Sète et Lodève, bordant Montpellier à l'Est. Elle correspond à la zone commune entre deux images SPOT, (images satellitaires XS de SPOT 2 de la scène 46-262 du 3 juin 1990 et du 4 décembre 1990) une fois supprimés les nuages.

La zone se caractérise par deux grands paysages différents : la forêt se situant sur la montagne et la vallée de l'Hérault. Celle-ci est essentiellement cultivée en vignes. Le recouvrement de la vigne étant faible (moins de 30 %), sur les images de juin et de décembre, on détecte les sols nus, et c'est leur couleur qui intervient essentiellement sur la réflectance.

## ÉLABORATION DE CARTES DE PÉDOPAYSAGES

L'objectif est d'élaborer une carte de pédopaysages à partir de l'interprétation visuelle d'images SPOT, puis, par analyse statistique, d'élaborer une classification à divers niveaux d'intégration.

### Interprétation visuelle

Elle porte sur des images Infra-Rouge Couleur, tirées sur papier au 1/100 000. Les deux images sont prises avec des angles de prise de vue de + 28° et de - 27° ce qui assure en stéréoscopie un relief apparent maximum. Ainsi, il est possible de distinguer plusieurs niveaux de terrasses dans la vallée de l'Hérault.

Les deux images étant prises le 3 juin et le 4 décembre 1990, la hauteur du soleil est très différente : 67°24' en juin et 22°42' en décembre ; les ombres portées en décembre sont importantes. Ainsi en stéréoscopie on voit, dans les gorges des Causses du Larzac, des occupations du sol qui sont complètement obscurcies en décembre. Cela ne facilite pas la détection, mais les images disponibles dans une même année et avec des angles de prise de vue très différents, ne permettaient pas d'en observer d'autres. Ou bien il aurait fallu les commander dans des conditions spécifiques, ce qui entraînait un coût très différent.

L'interprétation porte sur l'ensemble du champ de l'image qui est observée visuellement en stéréoscopie. La méthode consiste à délimiter des zones définies sur des critères de **structure de l'image** (1), et en s'aidant du traitement informatique des comptes numériques en ce qui concerne la **texture de l'image** (2).

La structure est liée aux ombres portées, à la morphologie, aux réseaux hydrographiques, à la dimension et à la forme des parcelles.

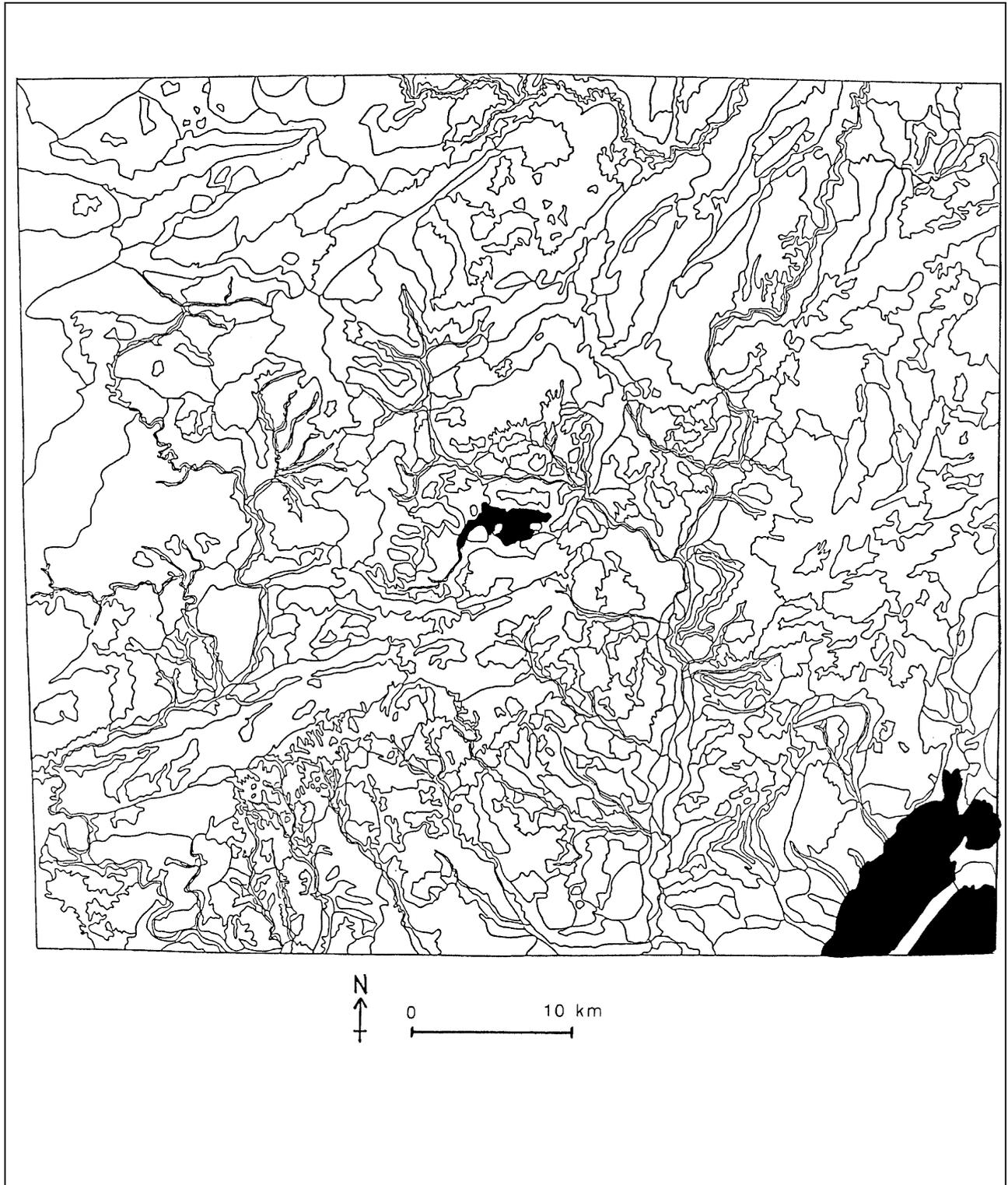
L'interprétation visuelle a permis de distinguer 635 unités de paysage (plages cartographiques) chacune étant caractérisée au moyen de descripteurs pertinents pour la description de l'occupation des sols et de la couleur des sols (*figure 1*). Mais on a porté une plus grande attention sur les plages cartographiques correspondant à des sols directement décelables par leur réflectance, que sur les plages couvertes de végétation et pour lesquelles l'interprétation en matière de sol était évidemment plus délicate, car indirecte.

(1) : La structure d'une image est l'ensemble défini en compréhension des éléments structuraux. Un élément structural d'une image est constitué d'ensembles texturaux qui caractérisent un motif dont on peut définir les connexités et au moins l'hétérogénéité (par une composition statistique).

(2) : La texture d'une image est l'ensemble défini en extension des éléments texturaux. Un élément textural d'une image est constitué par l'ensemble des pixels, connexes, qui ont la même valeur de compte numérique ou d'une fonction de compte numérique.

**Figure 1-** Interprétation visuelle de la zone étudiée à partir de la vision stéréoscopique de deux images satellitaires : 635 pages cartographiques. (En noir, étang de Salagou et Mer Méditerranée).

**Figure 1 -** Visual interpretation from stereoscopic of 2 satellite images of the zone of interest : the 635 mapped areas. (Lake of Salagou, Mediterranean Sea)





directement.

5°) Les substrats sont déterminés à partir des cartes géologique à 1/50 000.

Les variables utilisées pour la caractérisation des unités d'informations sont qualitatives ordonnées (Girard et King, 1988). Dans chaque unité de paysage, la superficie des diverses occupations du sol est notée de 0 à 5. Pour les variables à deux états (taille des parcelles, morphologie, substrat), l'absence est notée : 0 et la présence : 1.

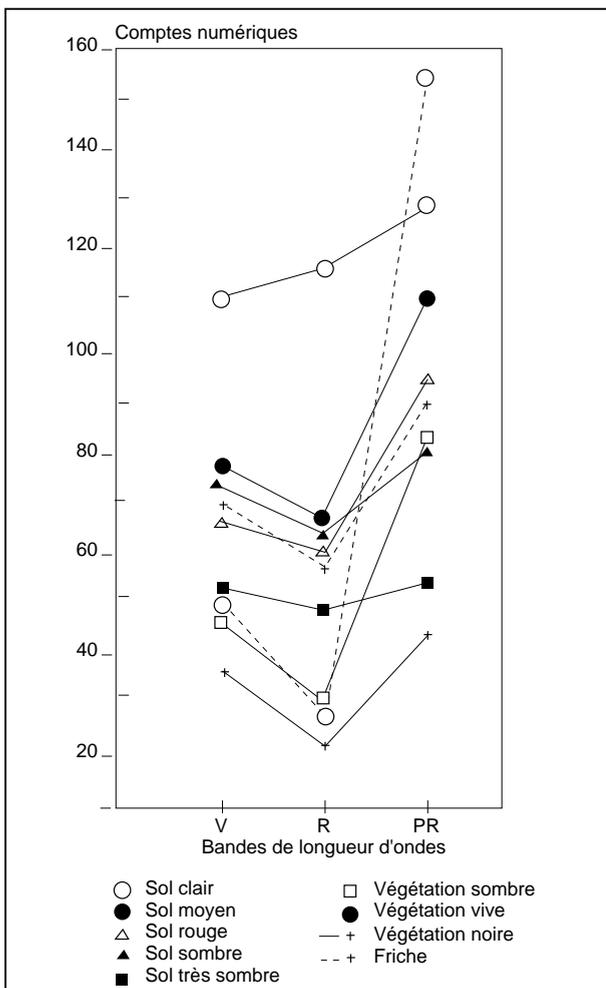
On a procédé à une classification des 635 plages en utilisant la méthode DIMITRI (Girard MC, 1983 - King D et Duval, 1988 - Derouich, 1983 - King D, 1986) basée sur la Distance Minimum de Tri en fonction de noyaux prédéterminés, repérés par la mesure de luminance d'un ensemble de 25 à 60 pixels (figure 3).

La figure 4 schématise la démarche utilisée pour obtenir la

carte des pédopaysages.

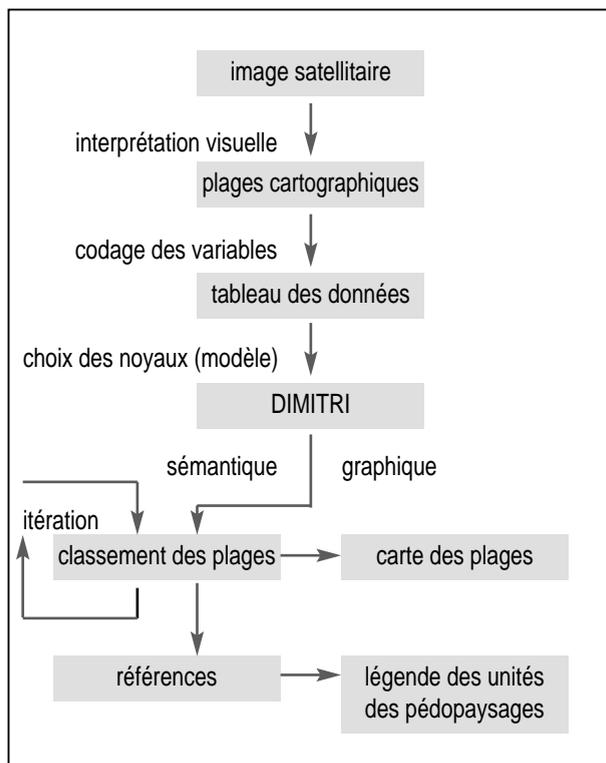
**Figure 3** - Comportement spectral des différents états de surface des sols et de la végétation.

**Figure 3** - Spectral behaviour of different soil surface conditions and vegetation cover.



**Figure 4** - Schéma de synthèse du modèle DIMITRI pour le classement des plages cartographiques

**Figure 4** - Synthetical sketch of DIMITRI model for classifying mapping areas



## Carte des pédopaysages en neuf unités

On dresse une carte à partir d'un modèle définissant chaque pédopaysage par une abondance maximale de l'une des 9 occupations du sol. On obtient la répartition suivante des 635 plages cartographiques (*tableau 1*).

La composition de chaque pédopaysage est alors définie par l'abondance, codée de 0 à 5, de chacune des occupations du sol (*tableau 2*).

**Tableau 1** - Répartition des plages cartographiques dans les 9 références.

**Table 1** - Distribution of mapping areas inside the 9 references.

Référence variable	cartographiques	nombre des plages	distance moyenne
1	sol clair	63	202
2	sol moyen	106	194
3	sol rouge	56	183
4	sol sombre	91	140
5	sol très sombre	32	133
6	végétation vive	81	147
7	végétation sombre	139	134
8	végétation noire ou ombre	42	276
9	friche	25	131
Total		635	Dmoy = 167

*Dmoy* : la moyenne générale des distances

**Tableau 2** - Les modalités les plus fréquentes de chaque variable dans chaque référence.

**Table 2** - The most frequent item of each variable within each reference.

Variable	SC	SM	SR	SS	STS	VV	VS	VN	FR
Référence	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1-	3-5*	3	0	0	0	1	2	0	0
2	1-2	4-5*	0	0	0	0-1	1-2	0	0
3	0	0	1-5*	0	0	1	1-2	0	0
4	0	0	0	3-5*	0	0-1	0-1-2	0	0
5	0	0	0	0	1-5*	2	2	0	0
6	0	0	0	0-1-2	0	3-5*	0-1	0	0
7	0	0-1	0	0-1	0	1-2	4-5*	0	0
8	0	0	0	0	0	1-2	0-1	2-5*	0
9	0	0	0	0	0	0-1	3	0-1	1-5*

Les unités cartographiques (1 à 5) définies par différents types de sols nus se situent principalement dans la vallée de l'Hérault. Ces unités sont toujours associées avec la végétation vive et sombre, mais la végétation est peu importante dans ce cas-là par rapport au sol. Sur le reste de la zone, on trouve des unités cartographiques définies par divers types de végétation (6 à 9), (*carte couleur 1*).

## Carte des pédopaysages en 17 unités

Puisque dans les régions montagneuses, les meilleurs résultats sont obtenus lorsqu'on combine les données topographiques de terrain (l'altitude et la pente) aux données spectrales (Kornblau et Cipra, 1983 ; Lee *et al.*, 1988 a et b; Senoo *et al.*, 1990), on est donc parti du modèle précédent, mais en utilisant les variables qui prennent en compte la morphologie, la pente, etc. Après 7 approximations, on a trouvé avec la classification par DIMITRI, un ensemble stable de 17 références (*carte couleur 2*), sans compter les étendues d'eau libre (lac Salagou, étang de Thau, etc.).

On dispose donc à l'issue de ce travail d'une segmentation de l'espace étudié en 9 ou en 17 Unités de pédopaysage.

## COMPARAISON DE L'INTERPRÉTATION VISUELLE ET DE LA CARTE DES SOLS

Cette carte des pédopaysages interprétée sur image satellitaire a été comparée avec celle à 1/250.000 levée par M. Bornand *et al.* (1988) dans le cadre du programme "Inventaire, Gestion et Conservation des Sols" (Girard MC, 1992).

Cette carte du Languedoc - Roussillon qui représente une

**Tableau 3** - Comparaison de la carte en 17 unités de référence de l'image Spot (UR) et de la carte des sols en 30 unités de pédopaysage (UPP).

**Table 3** - Comparison of the map with 17 reference units (UR), issued from SPOT data interpretation, and the soil map with 30 soil landscape units.

		Carte des 17 références																	total	total	
Carte des pédopaysages	UR	eau	33	35	31	25	30	34	37	23	22	36	38	39	29	26	28	32	24	17 UR	(+bruit)
	UPP																				
eau	61																			61	61
446D		82																		82	94
171A			60	50																110	118
532A					17															37	55
432B					18														18	34	
453A						9	28	11												48	50
456A								11												11	30
552T							22	37	52	69	13							11		204	219
309V									12											12	25
309A									30											30	50
372P									40											40	60
552V										23										23	40
306P										17										17	35
521A											16									16	23
551B											14									14	31
505G											11	11								22	42
553B												14								14	50
420A												12						11		23	27
723D												29	26						58	113	125
712B													12						14	26	35
423A											11	15		62			11	201		300	309
524A														26					44	70	90
759B															6	29	29			64	74
559B																29	24			53	79
423B												13							22	59	76
410B																			22	76	103
459A																		11	42	53	59
561E																				25	33
661A																			52	63	75
661B																				20	25
<b>Total</b>	<b>61</b>	<b>82</b>	<b>60</b>	<b>50</b>	<b>55</b>	<b>9</b>	<b>50</b>	<b>59</b>	<b>134</b>	<b>109</b>	<b>65</b>	<b>94</b>	<b>38</b>	<b>88</b>	<b>6</b>	<b>124</b>	<b>589</b>	<b>31</b>	<b>1 704</b>	<b>2 127</b>	
<b>Total</b>	<b>61</b>	<b>124</b>	<b>106</b>	<b>98</b>	<b>70</b>	<b>34</b>	<b>88</b>	<b>119</b>	<b>176</b>	<b>157</b>	<b>123</b>	<b>172</b>	<b>42</b>	<b>134</b>	<b>16</b>	<b>169</b>	<b>696</b>	<b>84</b>			<b>1 469</b>
+ bruit																					

synthèse effectuée par M. Bornand sur la base de très nombreuses cartes de sols et d'un travail de terrain ayant nécessité plusieurs années, a servi pour la validation.

La partie étudiée par télédétection de cette carte comporte 75 Unités de pédopaysage sur la zone étudiée. Ces Unités de pédopaysage sont décrites par les types de sols : Référentiel Pédologique (AFES, 1992), leur position morphologique et leur substrat, ainsi que par l'occupation des sols : végétation, pro-

ductions agricoles...

### Comparaison globale de la carte de 17 unités et de la carte levée sur le terrain

Pour ce faire, on a défini un maillage d'un pas de 1 km<sup>2</sup>. On a construit un tableau croisé pour comparer les 17 unités de références (UR) issues de l'interprétation des images et les 75 unités de pédopaysage (UPP) issues de la carte des sols, pour

chacun des 2 469 points.

Pour chaque croisement Unité de pédopaysage - Unité de Référence, on considère qu'on a affaire à du «bruit» quand l'effectif est inférieur à 10. On passe ainsi d'un tableau : 75 UPP x 17 UR à un tableau : 30 UPP x 17 UR. On obtient alors des correspondances entre les 30 Unités de pédopaysage et les 17 Références pour 1 704 km<sup>2</sup> (tableau 3).

On ordonne les UR en fonction de leur contenu en UPP, de telle sorte que la majorité des liens entre UR et UPP se situe sur la diagonale du tableau UR x UPP (tableau 3).

Dans 24,6 % de la superficie, les UPP et les UR se correspondent strictement. Dans 29,1 %, les UPP sont réparties dans 2 UR. L'interprétation est donc satisfaisante pour 53,7 % de la superficie. Elle aurait pu être meilleure si l'on avait porté plus de soin à interpréter les zones sous végétation.

Mais encore faudrait-il étudier de plus près le modèle ayant servi à la définition des UPP. En effet, s'il se base sur des objets qui ne sont ni directement, ni indirectement décelables par satellite, il est difficile de faire la comparaison entre l'interprétation de l'homme de terrain et l'interprète des images satellitaires.

Les résultats de cette étude montrent cependant des similitudes qui apparaissent évidentes, dans la structure générale. Rappelons que, si les caractéristiques que l'on peut acquérir sémantiquement sur les images satellitaires, sont obtenues rapidement et d'une manière exhaustive sur l'ensemble de la zone, elles ne peuvent pas avoir la précision et la richesse des informations sémantiques obtenues après des études sur le terrain, en ce qui concerne les sols.

### Comparaison pour les sols nus de la carte de 17 unités et de la carte levée sur le terrain

L'objectif portant sur la qualité de l'interprétation des sols et

cette qualité étant supérieure sur sols nus, on a donc supprimé les unités de paysage couvertes avant tout par la végétation. On a ainsi gardé 11 UR et 28 UPP couvrant 949 km<sup>2</sup> puis on a établi le tableau croisé UR x UPP correspondant aux sols nus.

Il y a concordance des UR avec les UPP dans 73,8 % des cas. Le résultat est donc bien meilleur quand on compare les unités de pédopaysage de la carte avec les unités de référence des pédopaysages de l'interprète, ce qui se comprend puisque l'interprétation a été faite par des pédologues. Cela montre l'intérêt d'utiliser des images avec le sol nu pour l'interprétation pédologique. Cela prouve aussi l'intérêt de l'analyse de la surface du sol pour la pédologie puisqu'elle permet d'établir des corrélations avec le solum qui, lui, n'est pas directement décelable.

### Conclusion

L'interprétation visuelle, utilisant la stéréoscopie, sur image satellitaire SPOT présente un grand intérêt car elle prend en compte non seulement le comportement spectral, mais aussi l'influence du voisinage, et surtout, elle est susceptible de déterminer des unités complexes.

En outre, à partir de l'interprétation visuelle d'images, le modèle DIMITRI permet de préparer rapidement la carte de reconnaissance sur un vaste champ spatial.

## RECHERCHE DU NOMBRE OPTIMUM DE VARIABLES POUR L'INTERPRÉTATION DES DONNÉES SATELLITAIRES

La carte des pédopaysages initiale se base sur 50 variables. Celle aboutissant à 9 références se base sur 17 variables concernant uniquement l'occupation des sols (nus ou couverts). Celle aboutissant à 17 références se base sur 29 variables (ne prenant pas en compte la lithologie). Il était intéressant de comparer l'influence du nombre de variables, mais

**Tableau 4** - Comparaison des plages et des variables selon les divers scénarios.

**Table 4** - Comparison of areas and variables according to various scenarii.

Nombre de variables	Rapport au nombre total de variables (%)	Nombre de plages	Rapport au nombre total de plages (%)	Perte d'information en %	
				sémantique	graphique
50	100	592	100	0	0
29	58	567	95,8	42	4,2
9	18	545	92,1	82	7,9

aussi du nombre de références retenues sur les résultats cartographiques.

### Evolution du contenu : les variables

Pour chaque cas on compare le nombre de variables retenues et le nombre de plages différentes (tableau 4).

On prend comme base la description en 50 variables car c'est elle qui a servi à délimiter les 635 plages cartographiques.

Avec 50 variables, on obtient 592 plages différentes ; ceci signifie qu'il y a 43 plages appartenant à divers lots d'ex-æquo.

Avec l'interprétation (aboutissant à 17 références) qui utilise 29 variables, soit 58 % des variables disponibles, on trouve 567 plages. Ainsi, en perdant 42 % des variables, on ne perd que 4,2 % des plages cartographiques.

Avec l'interprétation (aboutissant à 9 références) qui utilise 9 variables, soit 18 % des variables disponibles, on trouve 545 plages. Ainsi, en perdant 92,1 % des variables, on ne perd que 7,9 des plages cartographiques.

C'est à dire qu'en décrivant à peu près cinq fois moins de variables on ne décrit qu'un dixième de plages en moins. Ceci est très intéressant en matière de télédétection puisque les variables retenues, celles de l'occupation du sol, sont celles qui sont le plus facilement accessibles par l'interprétation automatique des images.

Du point de vue de l'ingénierie, cela démontre qu'il est possible de segmenter rapidement une assez vaste région par une interprétation visuelle des images satellitaires. C'est d'ailleurs ce qui est recommandé dans le programme "Inventaire, Gestion et Conservation des Sols".

Si l'on trouve ce type de résultats, à partir d'une description qui ne prend en compte que les variables d'occupation du sol, alors qu'on est dans des milieux où la morphologie, l'hydrologie et la lithologie sont très importantes (JM Robbez-Masson, 1994 ; Ph. Lagacherie, 1993), c'est qu'il existe des lois chorologiques fortes dans ces milieux. Cela est très net dans la vallée de l'Hérault où la couleur de la surface des sols rend compte

d'une manière très correcte du type de sol.

### Evolution du contenant : les limites

On a étudié pour chaque cas, le périmètre de toutes les plages cartographiques dessinées (tableau 5). On prend comme base la description en 50 variables car c'est elle qui a servi à délimiter les 635 plages cartographiques.

Avec 50 variables, on obtient 8 372 km de limites (figure 1).

Avec l'interprétation (aboutissant à 17 références) qui utilise 29 variables, soit 58 % des variables disponibles, le périmètre de l'ensemble des plages est de 7 452 km. La perte en périmètre n'est donc que de 920 km, soit 11 %, en diminuant de 42 % la quantité de variables de description. On a représenté sur la figure 5, les contours des limites qui n'existent plus sur cette carte basée sur les 29 variables.

Avec l'interprétation (aboutissant à 9 références) qui utilise 9 variables, soit 18 % des variables disponibles, le périmètre de l'ensemble des plages est de 6 930 km. La perte en périmètre n'est donc que de 1 442 km, soit 17,2 %, en diminuant de 82 % la quantité de variables de description. On a représenté sur la figure 6, les contours des limites qui n'existent plus sur cette carte basée sur les 9 variables.

Là encore, la diminution drastique de variables prises en compte ne fait que diminuer assez peu (17,2%) la quantité de limites entre les plages.

### Conclusion

La carte des pédopaysages en 17 unités établie par DIMITRI a été comparée avec la carte des pédopaysages à 1:250.000. Pour l'ensemble des unités (sol et végétation), il y a 53,7 % de concordance entre les Unités de Paysage et la carte des pédopaysages 1:250.000. Ce pourcentage monte à 73,8 % pour les unités de paysage correspondant aux sols nus (ou peu couverts par la végétation).

En conséquence, l'interprétation visuelle, puis la classification des Unités de pédopaysage obtenues par le modèle DIMITRI, permet de préparer une segmentation du territoire

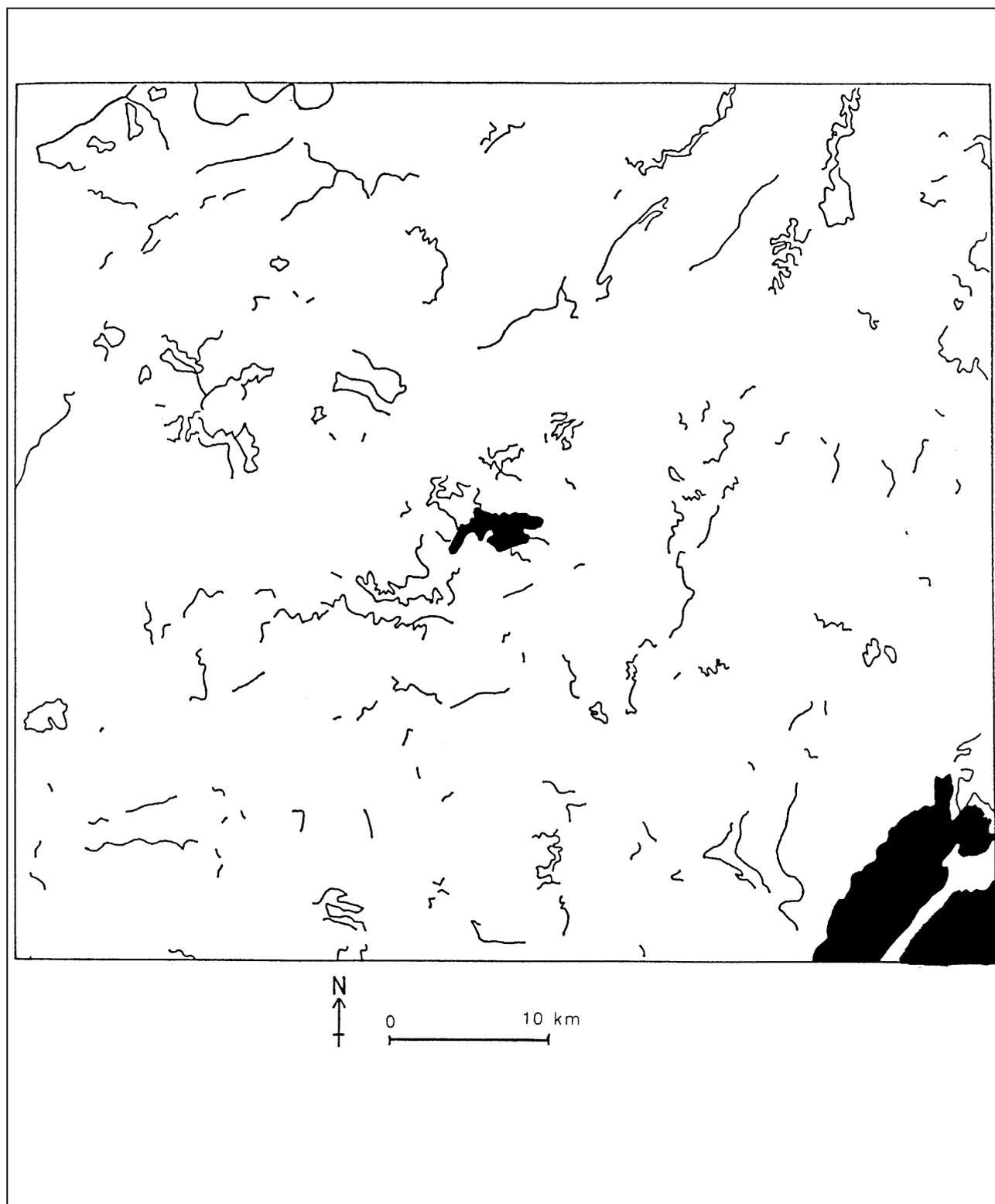
**Tableau 5** - Comparaison des plages et des longueurs des limites selon les divers scénarios.

**Table 5** - Comparison of areas and limits length according to various scenarii.

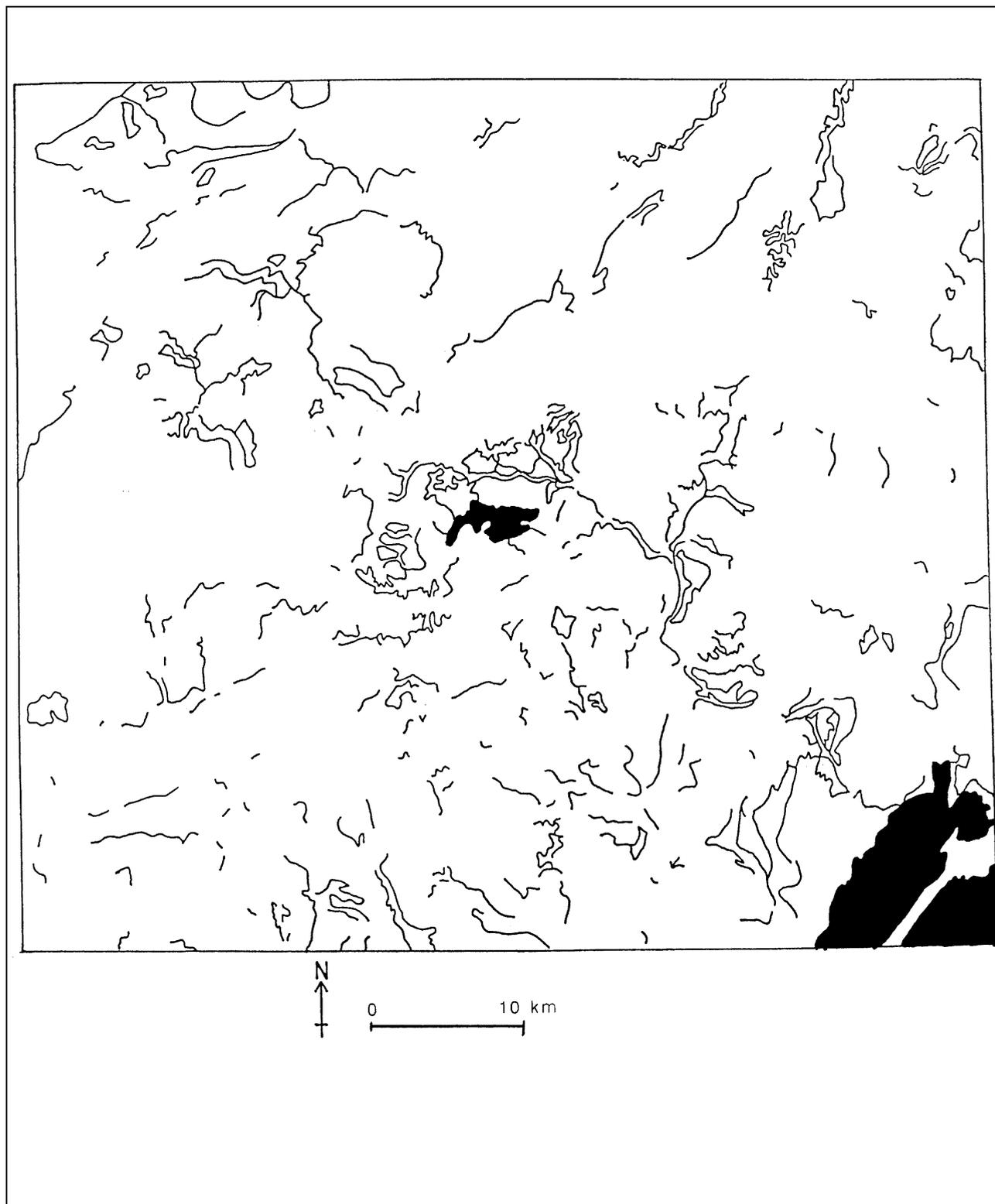
Nombre de variables	Rapport au nombre total de variables (%)	Nombre de plages	Rapport au nombre total de plages (%)	Perte d'information en %	
				sémantique	graphique
50	100	8 372	100	0	0
29	58	7 452	89,0	42	11,0
9	18	6 930	82,8	82	17,2

**Figure 5** - Représentation des limites de la carte initiale (figure 1) ayant disparues sur la carte basée sur les 29 variables.

**Figure 5** - Limits on the initial map (figure 1) disappearing on the map based on 29 variables.



**Figure 6** - Représentation des limites de la carte initiale (figure 1) ayant disparues sur la carte basée sur les 9 variables.  
**Figure 6** - Limits on the initial map (figure 1) disappearing on the map based on 9 variables.



pédologique avant d'aller sur le terrain. Cela fait gagner beaucoup de temps et constitue une stratification rigoureuse des milieux.

Enfin, l'interprétation visuelle des images SPOT permet de mieux comprendre les différentes structures des unités de paysage. Les similitudes paraissent évidentes dans la structuration générale avec d'autres cartes thématiques (végétation, relief, géologie, etc).

## CONCLUSIONS

Les images satellitaires permettent de définir les principales occupations du sol ainsi que les états de surface du sol (couleur, rugosité, composition...), mais elles ne laissent pas découvrir les caractéristiques des sols en profondeur, sauf si l'on peut modéliser la couverture pédologique avec les états de surface. Actuellement, seul le terrain permet l'étude des caractéristiques en profondeur et surtout autorise à définir puis modéliser l'organisation fine des couvertures pédologiques.

Cependant, l'occupation des sols et les états de surface des sols dépendent de divers facteurs tels que la géomorphologie, la lithologie, la végétation, les circulations hydriques. Ces facteurs sont en grande partie décelables à partir des images satellitaires. Il est donc possible d'en tirer parti et de les organiser dans un modèle pédologique de cartogénèse basé sur des lois chorologiques.

D'autre part l'imagerie satellitaire permet d'obtenir une information directe et exhaustive sur l'ensemble d'un territoire, ce qui n'est pas le cas de l'approche utilisée par le pédologue qui effectue des analyses ponctuelles et qui ne dispose, indépendamment des photographies aériennes, que de cartes thématiques (topographie, géologie, végétation...) donnant des informations déjà interprétées.

L'interprétation visuelle et stéréoscopique, des images satellitaires présente un grand intérêt, surtout quand elle est faite par le pédologue, car elle prend en compte non seulement le comportement spectral, mais aussi l'influence du voisinage et surtout, elle est susceptible de déterminer des unités complexes. Notons aussi que l'interprète fait facilement des modifications radiométriques dues aux légères brumes ou aux ombres des nuages, alors que ces dernières constituent des difficultés importantes pour l'interprétation numérique.

Les images satellitaires présentent sur les photographies aériennes, les avantages suivants :

- Le champ des images est beaucoup plus grand et comporte la plupart des «systèmes pédologiques» en entier.
- Les données sont multispectrales ou panchromatiques, et diachroniques avec une répétitivité beaucoup plus grande.
- Les données sont numérisées et peuvent être manipulées aisément : elles peuvent être l'objet de traitements itératifs au moyen de diverses méthodes statistiques.

## REMERCIEMENTS

Tous les travaux évoqués ici sont dus à une collaboration avec Mme Courault, et MM. Rogala, King, Escadafal, Yongchalemchai, Bornand, qui, bien qu'oeuvrant dans divers organismes (INA PG, INRA, APIC-Système), ont constitué depuis une dizaine d'année une équipe scientifique étudiant les apports de la téledétection à l'étude des sols.

Je remercie le Programme National de Téledétection Spatiale et le CNES (action « Incitation Spécifique à l'utilisation des Images SPOT»), le Ministère de l'Agriculture et de la pêche (Direction de l'espace rural et de la forêt - Bureau des sols : programme Inventaire, Gestion et Conservation des Sols), IBM et l'INRA, qui ont permis depuis plusieurs années le développement de ces travaux grâce à leurs appuis scientifiques et financiers

## BIBLIOGRAPHIE

- AFES 1992 - Référentiel pédologique. Principaux sols d'Europe. Baize D. et Girard M-C. éditeur, INRA-AFES, Versailles, 222 p
- Agbu P-A., Fehrenbacher D-J., Jansen I-J., 1990a - Soil property relationships with SPOT satellite digital data in east central illinois. *Soil Sci. Am. J.*, vol. 54, pp 807-812.
- Agbu P-A., Fehrenbacher D-J., Jansen I-J., 1990b - Statistical comparison of SPOT spectral maps with field soil maps. *Soil Sci. Am. J.*, vol. 54, pp 812-818.
- Baize D., 1986 - Couvertures pédologiques, cartographie et taxonomie. *Science du sol*, vol.24, no.3, pp 227-243.
- Baize D., King D., 1991 - La modélisation spatiale des couvertures pédologiques «Carte papier» et S.I.G.. *Gestion de l'espace rural et Système d'Information Géographique*. INRA. Florac, 22-24 octobre. pp 17-27.
- Bonn F., Charbonneau L., Brochu R., 1989 - Analyse de l'utilisation du sol à partir des données SPOT et TM : aspects méthodologiques. *Téledétection en francophonie*. Ed. AUPSELF-UREF. John Libbey Eurotext. Paris. p. 83-92.
- Bornand M., Barthes J.P., Bonfils P., Legros J.P., Conventi S., 1988 - Région Languedoc Roussillon. Carte régionale des sols et des contraintes du milieu à l'échelle du 1/250 000. Essai méthodologique. Convention PIM CEE Régions.
- Cierniewski J., 1988 - A model of soil surface roughness influence on the spectral response of bare soils in the visible and near-infrared range. *Remote Sens. Environ.* 23, pp 97-115.
- Cipra J-E., Franzmeier D-P., Bauer M-E., Boyd R-K., 1980 - Comparison of

- multispectral measurements from some nonvegetated soils using Landsat digital data and a spectroradiometer. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, vol 44, pp 80-84.
- Combe P., 1984 - Caractérisation radiométrique de volumes pédologiques de référence. D.E.A. de pédologie et aménagement des sols. INA-PG, 83 p.
- Courault D., 1986 - Modélisation du comportement spectral de la surface du sol. Etude intraparcellaire. D.E.A. de pédologie. INA-PG, Grignon, 102 p.
- Courault D., 1989 - Etude de la dégradation des états de surface du sol par télédétection. Analyses spectrales, spatiales et diachroniques. Thèse de Pédologie de Paris VI, SOLS, 239 p.
- Courault D., Girard M-C., 1988 - Analyse des hétérogénéités intraparcellaires des sols par télédétection. *Science du sol*, vol.26, no.1, pp 1-12.
- Courault D., Girard M-C., 1988 - Relationships between the composition of the soils and their spectral signatures. 5th Sympo. ISSS of Working Group Rem. Sens., Budapest, pp 178-185.
- Derouich C., 1983 - Essai de formalisation des limites entre taxons. Mémoire de spécialisation de l'Ins. Nat. Agro. de Tunis. Doc. multig. 111p., Tunis.
- Escadafal R., 1989 - Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection. Application : exemple de la région de Tataouine (Tunisie). Etudes et thèses. ORSTOM. 317 p.
- Escadafal R., Girard M-C., Courault D., 1988 - La couleur des sols : appréciation, mesure et relations avec les propriétés spectrales. *Agronomie*. 8 (2), pp 147-154.
- Favrot J-C., Arrouays D., Bornand M., Girard M-C. (1994) - Informatisation et spatialisation de la ressource sol. Le programme I.G.C.S. . Cahiers Agricultures, vol 3, pp 237-246.
- Girard C-M., Girard M-C., 1973 - Interprétation des photographies-ballon. Comparaison avec les petites régions agricoles. *Soc. Franç. Photogramm.* n° 52, Octobre, pp 23-36, Saint Mandé.
- Girard C-M., 1987 - Caractérisation des prairies permanentes par leur physiologie saisonnière et leur comportement spectral : application à l'évaluation de la biomasse. *Acta Oecol. Oecol. Plant.* 8:345-358.
- Girard C-M., Girard M-C., 1975 - Applications de la télédétection à l'étude de la biosphère. Masson. 186 p.
- Girard M-C., 1983 (a) - Recherche d'une modélisation en vue d'une représentation spatiale de la couverture pédologique. Thèse Etat, INA-PG, SOLS, n° 12, Grignon. 430 p.
- Girard M-C., 1983 (b) - Télédétection de la surface du sol. Applications de la télédétection à l'agriculture. Coll. INRA, No.32, pp 177-193.
- Girard M-C., 1986 - Interprétation pédologique des photographies prises par Spacelab 1. *ITC Journal*, n°1, Enschede, Hollande, p 14-18.
- Girard M-C., 1992 - Le programme Inventaire, Gestion et Conservation des Sols. in «Agrimatica, Colloque européen : informatique et télématique agricoles. Méthodes et conduites de projets». Regione Piemonte - région Rhône-Alpes. pp 89-93, Lyon.
- Girard M-C., Arousseau P., King D., Legros J-P., 1989 - Apport de l'informatique à l'analyse spatiale de la couverture pédologique et à l'exploitation des cartes. *Science du sol*, vol.27,no.4, pp 335-350.
- Girard M-C., Girard C-M., 1989 - La télédétection appliquée aux zones tempérées et intertropicales. Masson, 260 p.
- Girard M-C., Girard C-M., ROGALA J-P., 1980 - Automatisation de l'interprétation de l'humidité des sols et interprétation des paysages ruraux. OPIT, 85 p.
- Girard M-C., King D., 1988 - Un algorithme interactif pour la classification des horizons de la couverture pédologique. *Science du sol*, vol.26, no.2, pp 81-102.
- King C., 1983 - Les qualités spectrales des sol nus : analyse de spectres radiométriques acquis sur le terrain dans le bassin parisien. 2ème Coll. Int. Signatures spectrales d'objets en télédétection. Bordeaux, INRA, No. 23, pp 253-264.
- King C., 1985 - Etude des sols et des formations superficielles par télédétection. Thèse INA PG-BRGM, 211 p.
- King D., 1986 - Modélisation cartographique du comportement des sols basée sur l'étude de la mise en valeur du « Marais de Rochefort ». Thèse docteur ingénieur, INA-PG, Grignon, 243 p.

- King D., Duval O., 1988 - Logiciels pour l'étude de la géographie des sols.  
Notice de présentation des programmes de la bibliothèque LOGOS.  
Version 3.1 INRA-SESCPF, Orléans, 112 p.
- Kornblau M-L., Cipra J-E., 1983 - Investigation of digital Landsat data for mapping  
soils under range vegetation. *Remote Sens. Environ.* 13 : 103-112.
- Lee K-S., Lee G-B., Tyler E-J., 1988 (a) - Determination of soil characteristics  
from Thematic Mapper data of a cropped organic-inorganic soil land-  
scape. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 52, pp 1100-1104.
- Lee K-S., Lee G-B., Tyler E-J., 1988 (b) - Thematic Mapper and digital eleva-  
tion modeling of soil characteristics in hilly terrain. *Soil Sci. Soc. Am. J.*,  
vol. 52, pp 1104-1107.
- Lagacherie Ph. - 1992 - Formalisation des lois de distribution des sols pour  
automatiser la cartographie pédologique à partir d'un secteur pris  
comme référence. Cas de la petite région naturelle «moyenne vallée  
de l'Hérault». Thèse Montpellier II. 175 p
- Lefebvre d'Hellencourt T., 1981 - Contribution à l'étude des propriétés spectrales  
des sols : Etude sur le terrain et en laboratoire. DAA, INA PG, 35 p.
- Robbez-Masson J-M. - 1994 - Reconnaissance et délimitation de motifs d'orga-  
nisation spatiale - Application à la cartographie des pédopaysages.  
Thèse ENSA Montpellier.
- Senoo T., Kobayashi F., Tanaka S., Sugimura, T., 1990 - Improvement of forest  
type classification by SPOT HRV with 20 m Mesh DTM. *Int. J. Remote  
Sens.* 11:1011-1022.
- Thompson D-R., Pitts D-E., Henderson K-E., 1983 - Simulation of Landsat  
Multispectral Scanner response of soils using laboratory reflectance  
measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol 47, pp 542-546.
- Traube L., 1985 - Analyses radiométriques et caractérisation des différences  
locales de l'état de surface des formations loessiques de la région  
d'Ermenonville. DEA de pédologie, INA-PG, 121 p.
- Yongchalermchai C. 1993 - Etude d'objets complexes sols/plantes à différents  
niveaux d'organisation : de la parcelle au paysage. Thèse, Paris-gri-  
gnon, SOLS n°19, 183 p.