

Caractérisation des sols et paysages des garrigues méditerranéennes

Typologie et extrapolation spatiale par traitement d'images satellitaires

M. Bornand⁽¹⁾, J.M. Robbez-Masson⁽¹⁾, A. Donnet⁽¹⁾ et B. Lacaze⁽²⁾

1 ENSA. M-INRA. - U.F.R.Science du Sol - Place Viala - 34060 Montpellier Cedex 01

2 CEFÉ-CNRS -1919 route de Mende - BP 50551 - 34033 Montpellier Cedex 01

RÉSUMÉ

Les garrigues calcaires méditerranéennes sont des milieux présentant une grande hétérogénéité dans les caractéristiques des sols et une extrême variabilité dans leur distribution spatiale. Une typologie des sols et des paysages est établie dans des écosystèmes ; elle met particulièrement l'accent sur les relations pouvant exister entre les couvertures pédologiques et végétales. Sur cette base, une cartographie détaillée des sols et des paysages est réalisée au sein d'aires d'extension limitée représentatives de la diversité de ces espaces naturels : elle sert de référence locale de terrain pour réaliser une extrapolation spatiale des données à de vastes territoires. Pour ce faire, une procédure de traitements et d'analyse d'images satellitaires a été utilisée, basée sur le principe d'une classification tenant compte du voisinage spatial. Une confrontation est alors réalisée entre l'image classique obtenue et les cartes découlant de la prospection directe de terrain. Celle-ci permet d'évaluer la pertinence et les insuffisances des hypothèses émises au départ sur les relations sol-végétation. Des améliorations de la démarche sont alors proposées pour une meilleure discrimination des unités.

Mots clés

Cartographie - sol-végétation - classification - traitement d'images.

SUMMARY

SOILS AND LANDSCAPES CHARACTERIZATION OF TYPICAL MEDITERRANEAN « GARRIGUES », IN SOUTH OF FRANCE

Typology and spatial extrapolation with processing of satellite imagery

« Garrigue » is a typical mediterranean vegetation growing on karstic limestones of southern France, where *Quercus ilex* are largely dominating (fig. 1). The natural environment is characterized by a very large spatial variability of soils and vegetation cover. In these ecosystems, a soil and landscape typology was built ; we demonstrate that strong relations can be established between soil pattern and vegetation cover (table 2). From these data, we propose to build an estimating method to precise, at a low cost, the spatial soil variability. For thus, we mixed the soil cartographic investigations and the aerial photographic interpretations to describe vegetation (fig. 2). Fine soils and soil-landscapes maps were realized, in several little - but representative - reference areas (table 1). This survey (example fig. 4) was used, on the field, as training reference area to understand the soil's organization and to transfer this knowledge to larger spatial fields. This transposition has been made possible by an image processing procedure, whose aim is to assign pixels to classes in res-

pect to texture of their spatial neighbourhoods (fig. 3).

The image classification (fig. 5, 6, 7) is compared with the map obtained directly from the field work (table 3). In this way, we can evaluate how adequate the hypothesis for relations between soils and vegetation patterns is. The results obtained are largely satisfying for this type of procedure, in environmental conditions, frequently disturbed by human actions (fires, pastures...). They can constitute a good assistance of the field work, and help for the pedological survey. But the diagnosis is very heterogeneous depending on the cartographic units. We propose several improvements to the classification results.

Key-words

Cartographic survey - soil-vegetation - classification - image processing.

RESUMEN

CARACTERIZACION DE LOS SUELOS Y PAISAJES DE LAS " GARRIGUES "MEDITERRÁNEAS

Tipología y extrapolación espacial por tratamiento de imágenes de satélites

Las " garrigues " calcáreas mediterráneas son medios que presentan una gran heterogeneidad en las características de los suelos y una muy fuerte variabilidad en su distribución espacial. Una tipología de los suelos y de los paisajes se establece en los ecosistemas; esta tipología se focaliza sobre las relaciones que pueden existir entre las coberturas pedológicas y vegetales. Sobre esta base, una cartografía detallada de los suelos y de los paisajes está realizada en el seno de áreas de extensión limitada, representativas de la diversidad de estos espacios naturales: sirve de referencia local de terreno para realizar una extrapolación espacial de los datos a extensos territorios. Para eso, un procedimiento de tratamiento y de análisis de imágenes de satélites fue utilizado, basado sobre el principio de una clasificación teniendo en cuenta la vecindad espacial. Luego una confrontación está realizada entre la imagen clásica obtenida y los mapas deducidas de la prospección directa del terreno. Esta permite evaluar, al principio, la pertinencia y las insuficiencias de las hipótesis emitidas sobre las relaciones suelo-vegetación. Mejoramientos del método están propuestos para una mejor discriminación de las unidades.

Palabras claves

Cartografía, suelo-vegetación, clasificación, tratamiento de imágenes.

Les garrigues sont des formations sclérophylles calcicoles qui contribuent largement à l'élaboration des paysages méditerranéens. Ce sont des écosystèmes typiques couvrant de vastes espaces, et dont la végétation, exploitée par l'homme depuis des millénaires, est particulièrement sensible au feu. Souvent mis à nu, les sols y ont subi une lente évolution régressive ; ils sont aujourd'hui dégradés, érodés (Nahal, 1975) et présentent une extrême variabilité de distribution spatiale (Vergès, 1981 - Barthès et Bornand, 1986). Ils sont donc difficiles à définir et surtout à cartographier. Pourtant, des cartes de sols à une échelle moyenne (1/50 000 à 1/100 000) fourniraient une aide précieuse pour la conception de plans de gestion et de revalorisation de ces espaces, ainsi que pour l'évaluation des risques d'incendies, d'érosion ou de pollution.

L'objectif du travail présenté est de proposer une méthode de cartographie des sols et des paysages se basant sur les relations mises en évidence par différents auteurs entre sol et végétation (Barbéro et al., 1992 - Barthès, 1979 - Aubert, 1986). A partir d'une typologie des sols élaborée localement sur des superficies limitées servant de secteurs de référence, l'extrapolation spatiale à échelle régionale est proposée grâce à une caractérisation des unités obtenue par analyse et traitement d'image satellitaire.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Zone d'étude

Il s'agit des petits Causses de l'Hérault, formation karstique d'environ 70 000 ha située près de Montpellier (Sud de la France). De superficie suffisamment vaste pour tester la fiabilité et l'intérêt de la méthode, cette formation correspond à une seule unité cartographique au sein des pédo-paysages du Languedoc-Roussillon délimités à échelle du 1/250 000 (Bornand et al., 1989 - Bornand et al., 1994). Elle est constituée par un ensemble de sols développés sur calcaires durs. Les terrains sédimentaires de cette formation se sont mis en place à la fin du Jurassique et pour partie à l'Eocène moyen. Ces dépôts se distinguent essentiellement par l'épaisseur des bancs calcaires. Seuls, ceux de l'Eocène se révèlent différents, de par leur richesse en impuretés (Gêze, 1979). La zone d'étude étant située juste sous la partie la plus externe du domaine Pyrénéo-Provençal, la tectonique a provoqué des plis et des failles d'axe principal SSW-NNE ; tous les terrains n'ont cependant pas été fracturés partout avec la même intensité. Ces mouvements ont modelé un relief où tous les types de pentes sont représentés, de la zone tabulaire aux surplombs rocheux localisés.

Etendue depuis le littoral méditerranéen jusqu'aux contreforts des Cévennes et des Grands Causses (figure 1), la zone d'étude présente un gradient altitudinal et climatique très net. L'étage typi-

quement méditerranéen au Sud laisse peu à peu place à l'étage méditerranéen supérieur au Nord (Godron et al., 1968), soumis à un climat plus humide et plus frais (Ascensio, 1984). La végétation spontanée est dominée par des espèces xéro-héliophiles ; le couvert végétal est caractérisé par la diversité de ses physiologies (depuis les formations basses jusqu'aux forêts), résultant de la variabilité des ressources édaphiques et de l'exploitation humaine. Les secteurs sud sont recouverts par des formations basses où trois espèces peuvent être dominantes : le brachypode rameux, le thym vulgaire et le chêne kermès. En s'éloignant vers le Nord, les formations deviennent plus hautes : ce sont surtout des buis, des genévriers cades, des taillis de chênes verts et d'arbousiers. Ces formations se ferment pour donner tout au Nord des forêts de chênes verts en mélange avec le chêne pubescent.

Méthodologie

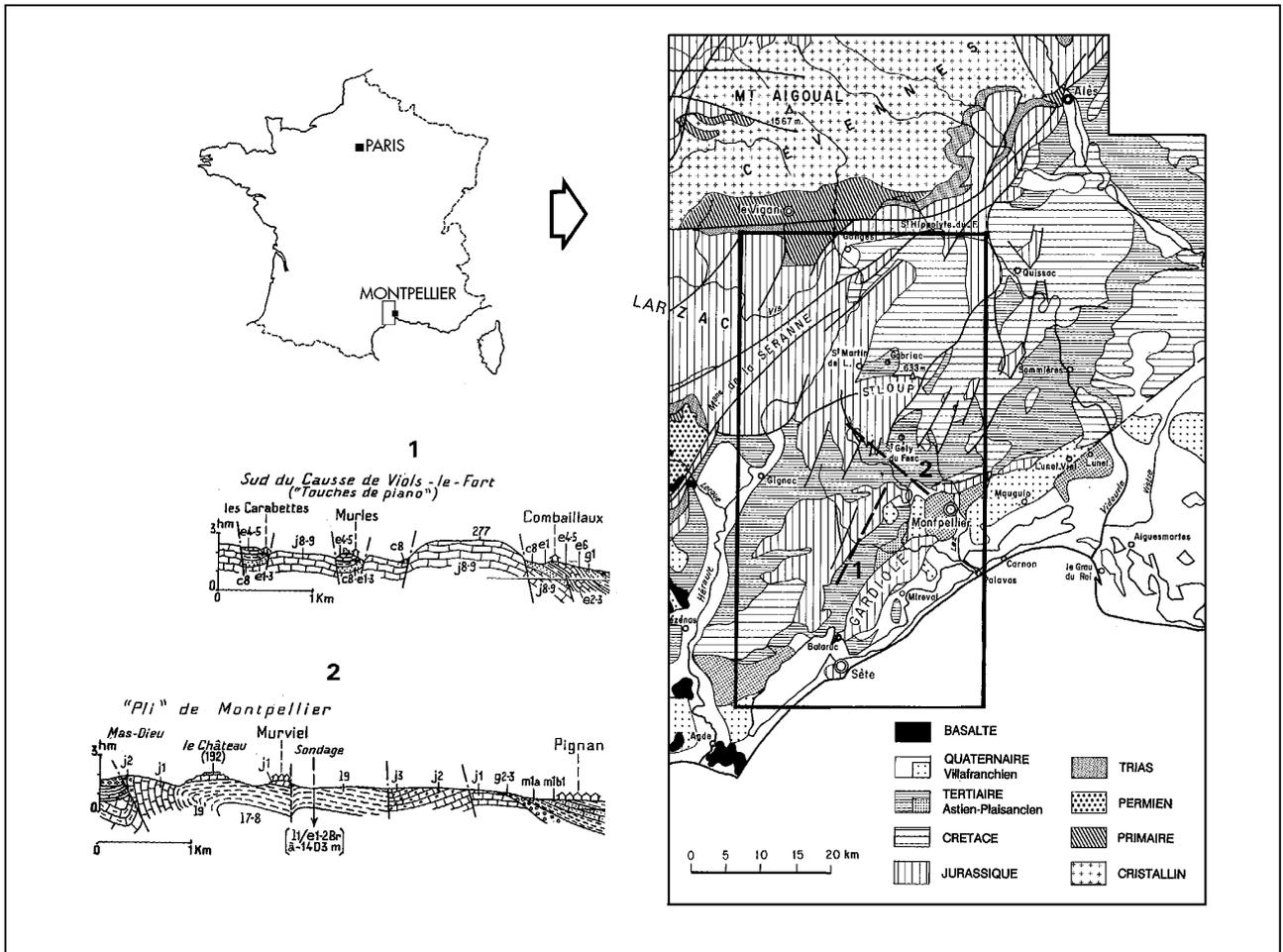
La méthodologie utilisée repose sur une approche ascendante basée sur une caractérisation de secteurs de superficie limitée représentatifs des principales causes de variabilité de la zone d'étude (géologie, pente, végétation, etc.) (Barthès et Bornand, 1986 - Bornand et Ménier, 1989 - Favrot, 1989). Ces secteurs sont essentiellement décrits à partir de critères pédologiques de surface dont l'influence est prépondérante en termes de gestion. Une cartographie à l'échelle du 1/25 000 sous forme d'unités complexes de sols permet de déboucher sur une typologie (Boulaine, 1981). Il s'agit ensuite de transposer ces résultats à l'ensemble de l'unité pédo-paysagère, en utilisant une relation établie entre les unités complexes de sols et la distribution des indices de végétation mesurés par télédétection spatiale (données Landsat-Thematic Mapper). La procédure de classement des images mise en oeuvre pour y parvenir a fait l'objet d'une mise au point récente (Robbez-Masson, 1994). La méthode utilisée comprend quatre phases essentielles résumées dans la figure 2 et explicitées ci-après.

Première phase : choix de secteurs de référence

L'objectif de cette étape est de choisir l'emplacement de secteurs de référence, représentatifs des principaux facteurs du milieu et de leurs interactions (Favrot, 1989). A partir de cartes thématiques traitant de ces facteurs (cartes lithologiques, bioclimatologiques, topographiques, des formations végétales), la zone d'étude est découpée en aires écologiques homogènes, dont on vérifie sur le terrain la pertinence. Le nombre, la surface et la position géographique des secteurs doivent permettre de représenter chacune des situations. Les contraintes de facilité d'accès et de précision de repérage ont également été prises en compte. 4 secteurs de référence de 200 à 300 ha ont été retenus in fine. Chaque secteur a été divisé en deux parties : une moitié est destinée à servir de secteur d'apprentissage, l'autre est utilisée comme secteur-test pour apprécier la validité de la procédure de segmentation.

Figure 1 - Situation des milieux étudiés au sein des systèmes géologiques régionaux.

Figure 1 - Location of the study area and geological situation.



Deuxième phase : cartographie pédologique des secteurs de référence

Une étude de terrain a permis l'établissement d'une typologie et d'une carte détaillée pour chacun des 4 secteurs de référence. Les différents types de sols possèdent une grande variabilité de distribution spatiale et chaque sol peut présenter une extension locale très limitée. De plus, leur charge caillouteuse empêche l'utilisation d'une tarière pour la prospection elle-même. Face à cette particularité, la cartographie pratiquée n'utilise pas les seuls moyens pédologiques classiques (échantillonnage systématique, sondages, profils, analyses), mais se base largement sur des indices de surface et sur la photo-interprétation (Allag et al., 1980 - Vergès, 1981), ainsi que sur les relations que l'on peut établir entre ces deux types d'observations.

Nous avons choisi l'emplacement des relevés en effectuant un type d'échantillonnage stratifié dans chaque secteur de

référence : à partir de photographies aériennes, nous avons positionné les relevés au sein d'unités isophènes de végétation. Les relevés sont effectués en utilisant trois types de critères :

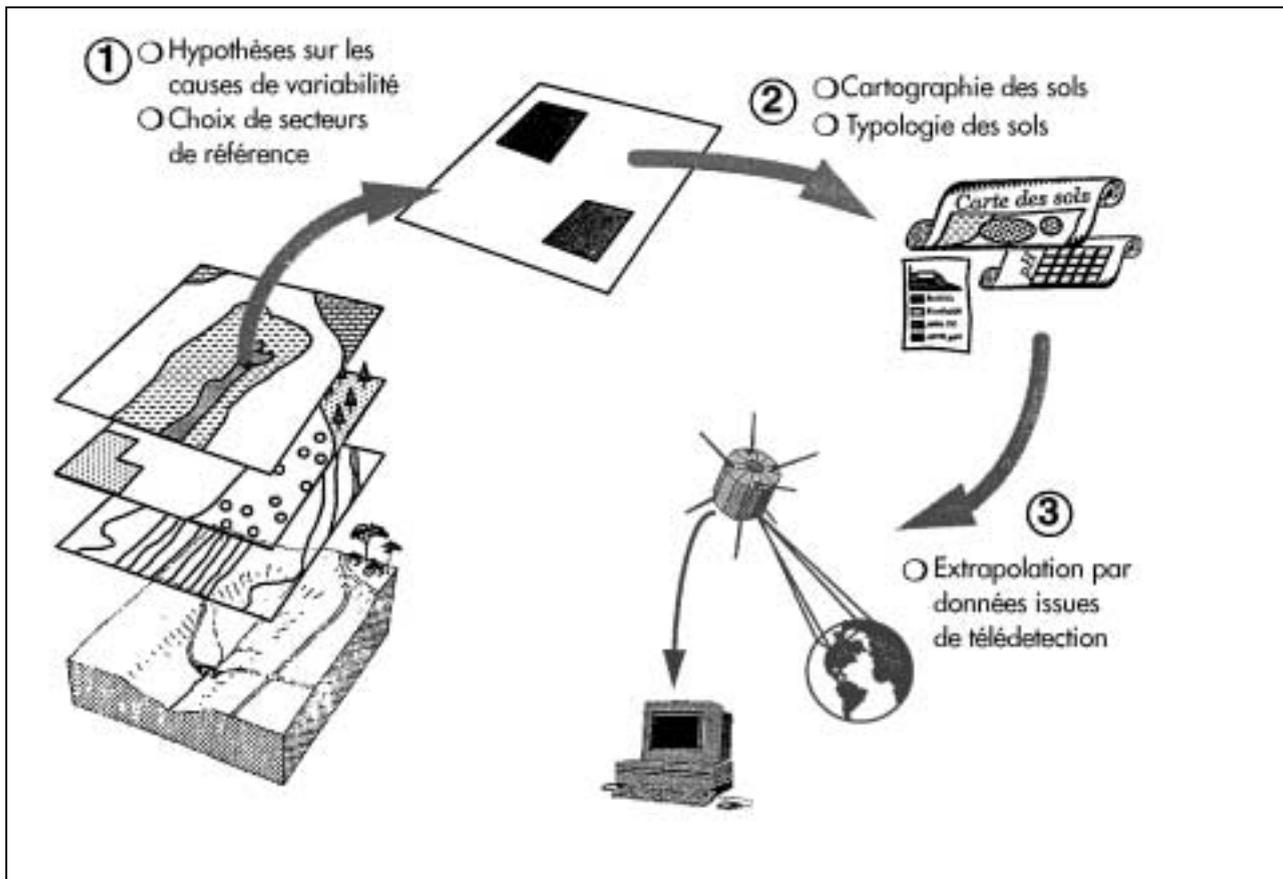
- des critères généraux : le faciès pétrographique (Soumet-Delaigue, 1976 - Callot, 1978), la fracturation et la fissuration (Callot et Barthès, 1981), la topographie (Gerrard, 1981 - Lagacherie, 1992 - Moore et al., 1993 - Odeh et al., 1992 - Walker, 1989).

- des critères liés spécifiquement au sol : la nature et la densité des affleurements rocheux, la pierrosité, la profondeur de sol, la texture, la structure, l'acidité (test à HCl) et la couleur (Chrétien, 1968).

- des critères de végétation, premier déterminant de la réponse spectrale dans le visible jusqu'au proche infrarouge (voir en particulier la revue de Graetz, 1990) : la physionomie

Figure 2 - Méthodologie.

Figure 2 - Methodology of approach.



de la formation végétale et les espèces dominantes (Godron et al., 1968).

Les critères retenus pour la typologie tiennent compte de l'ensemble de ces éléments et descendent donc à un niveau de caractérisation plus fin que celui utilisé par le référentiel pédologique français (AFES, 1992 et 1995).

La typologie établie résulte de l'analyse des fiches de relevés et s'inspire de systèmes de subsurface déjà décrits. La plupart des unités décrites sont des unités complexes (Boulaine, 1981 - Fridland, 1972). Nous avons insisté sur la description de la forme et de la répartition des affleurements des roches par rapport aux sols puisque ceux-ci sont dominants dans le milieu étudié.

Troisième phase : extrapolation spatiale sur la base d'images de télédétection

On recueille d'abord pour chaque unité de sols l'histogramme des réponses spectrales observées sur une image de télédétection. Les signatures obtenues serviront de référence

pour une cartographie de l'ensemble de la zone d'étude. Du fait de la variabilité spatiale des réponses spectrales, le principe retenu consiste à considérer l'ensemble de l'information contenue dans les histogrammes de référence (et non seulement la réponse spectrale moyenne p. ex.).

On recueille ensuite l'histogramme de composition dans le voisinage spatial de chaque point de la zone d'étude. Cet histogramme, comparé à chacun des histogrammes de référence au moyen d'une métrique statistique explicitée ci-après, permet d'étiqueter chaque point dans l'une des catégories de référence.

Acquisition des données cartographiques et satellitaires

La base d'extrapolation est une image Landsat TM du 23/08/90, dont les canaux rouge (R) et proche infra-rouge (PIR) ont servi à calculer l'indice de végétation NDVI :

$$NDVI = (PIR - R) / (PIR + R)$$

Civeyrel (1992) a établi, sur cette image et dans la gamme de variations qu'elle présente, l'existence de la relation linéaire suivante entre NDVI et indice foliaire LAI (qui représente la sur-

face de feuilles par unité de surface) :

$$\text{LAI} = 5.376 \text{ NDVI} + 0.986$$

L'image représentant numériquement NDVI, intéressante pour sa corrélation avec une représentation de la biomasse, nous servira donc d'image d'extrapolation. Cette image est géoréférencée à l'aide d'amers répartis sur l'ensemble de l'image et d'un modèle polynomial de déformation (Fortin, 1983). Pour une meilleure correction, on choisit plusieurs amers sur chaque secteur de référence. Les cartes de sols sont numérisées également de manière à pouvoir être superposées à l'image satellitaire.

Définition des réponses spectrales

La superposition des cartes pédologiques et de l'image permet de recueillir des histogrammes de réponses spectrales pour chaque unité de sol. La distance mathématique entre chaque couple d'histogrammes est mesurée en mettant l'accent sur la ressemblance de leurs formes (au moyen de la métrique V dite de Cramér-Von Mises - Sprent, 1989). On est alors en mesure de bâtir un arbre hiérarchique qui nous permet de regrouper les unités aux histogrammes les plus voisins. Ces unités regroupées sont croisées avec les imagerie pour définir de nouveaux histogrammes. Nous vérifions leur séparabilité par un nouveau test. Ce sont ces dernières réponses qui vont

servir de « paysages de référence » pour le classement de l'ensemble de la zone.

Extrapolation des réponses sur l'ensemble de la zone d'étude

Nous avons utilisé pour le classement de l'image le modèle CLAPAS (« Classement de Paysages et Segmentation » - Robbez-Masson, 1994 - Robbez-Masson et al., 1996), inspiré des méthodes mises au point dans la filiation de ceux de Girard en France (Rogala, 1982 - Yongchalermchai, 1993) et de Wharton aux USA (Wharton, 1982 - Gong et Howarth, 1992). Le modèle permet de déterminer à quel paysage de référence rattacher chaque point d'une image en analysant la composition de son voisinage spatial.

CLAPAS recueille pour cela l'histogramme de composition dans une gamme de tailles de fenêtres carrées donnée (figure 3), compatible avec les surfaces des unités. Les histogrammes obtenus sont comparés avec ceux des paysages de référence. Le point est alors classé dans la catégorie de paysage qui correspond à la distance de classement minimale pour toutes les tailles de fenêtres envisagées.

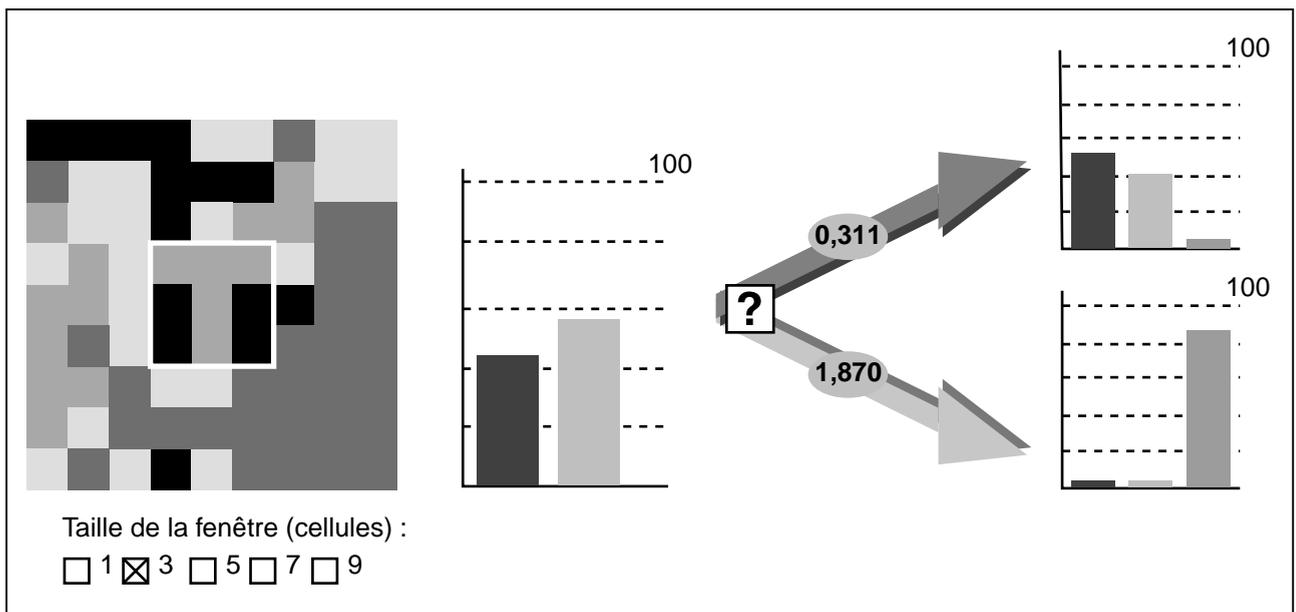
Évaluation des résultats

Les cartes des secteurs tests sont croisées avec les imagerie correspondantes issues de l'image classée. Les

Figure 3 - Calculer et classer des vecteurs de composition.

Figure 3 - Obtaining and assigning cover-frequency vectors.

Sur l'exemple d'une image comportant 4 classes, on extrait de chaque cellule - ici, la cellule centrale et au moyen d'un voisinage 3x3 - son vecteur de composition (à gauche). Celui-ci est comparé à chacune des $k = 2$ compositions de référence \mathfrak{X} et \mathfrak{Y} au moyen d'une distance statistique V . La cellule est classée dans la catégorie minimisant V dans les k comparaisons - ici \mathfrak{X} avec une distance de 0.311 (à droite).



matrices de confusion permettront de chiffrer l'intérêt de la segmentation.

MISE EN ŒUVRE DE LA MÉTHODE. PRINCIPAUX RÉSULTATS

Nous présenterons d'abord les facteurs du milieu caractéristiques de chaque secteur, puis les cartes et la typologie des sols obtenue d'après l'étude de terrain. Enfin, nous insisterons sur les résultats issus du classement des paysages par segmentation d'image.

Caractérisation des secteurs de référence

Les secteurs pris comme référence doivent représenter les facteurs du milieu responsables de la formation, de l'évolution et de l'érosion des sols. C'est pourquoi les 4 secteurs retenus intègrent :

- les variations possibles dans la nature des calcaires (dureté, massivité, homogénéité, etc.), caractérisant les différences de constitution des roches ;
- la topographie, responsable de l'évolution ou de l'érosion des sols ;
- les différences dans l'éloignement de la mer, responsable d'écart pluviométriques et thermiques importants.

Ces 3 causes de variations engendrent aussi des types de couvertures végétales spécifiques dont la typologie précise les relations privilégiées avec l'organisation et la caractérisation des sols. Le tableau 1 présente les principaux facteurs de variations caractérisant chaque secteur de référence.

Le Causse d'Aumelas est le seul à présenter plusieurs faciès géo-lithologiques car des mouvements tectoniques particulièrement importants l'ont affecté. Morphologiquement, ce secteur est un plateau associé à un versant qui présente des

pentés élevées. Proche de la mer, cette région est peu arrosée. Le Causse de Viols-Le-Fort est constitué de deux étages lithologiques formés de bancs calcaires métriques. Ces étages couvrent d'ailleurs une large surface de l'ensemble de l'unité d'étude. Les pentes de ce secteur sont faibles. La pluviométrie moyenne annuelle y est notablement plus faible qu'à Ferrières. Le secteur de la Taillade est situé sur l'étage géologique très complexe qu'est l'Eocène, qui présente plusieurs changements de faciès lithologiques (calcaires lacustres et bancs marneux localisés et interstratifiés).

Les cartes et la typologie des unités de sol

L'étude de terrain a permis de cartographier les sols des secteurs tests et d'en établir une typologie. Onze unités de sols sont distinguées ; leurs principales caractéristiques sont présentées dans le tableau 2. D'après le référentiel pédologique français, les sols de ces unités sont formés majoritairement de LITHOSOLS CALCIQUES et de FERSIALSOLS. En effet, 8 unités (A1, A2, A3, F1, F2, V1, V2, V3) sont une association de ces deux types de sols. L'unité Do ne comprend que des FERSIALSOLS. Les deux unités Dc et T sont formées de CALCOSOLS plus ou moins caillouteux.

Le sol des milieux étudiés est avant tout dominé par le minéral. En effet, les affleurements rocheux occupent une place particulièrement importante, voire quelquefois dominante et sont caractérisés par des formes et des répartitions variées. Ce critère est donc privilégié dans la distinction de chaque unité. Par exemple, Do est souvent entourée d'un escarpement rocheux, A1 ne possède pratiquement pas de blocs et cailloux lapiazés, F1 présente de grandes étendues de pavages caillouteux tandis que celles de F2 sont de tailles plus modestes, etc. La figure 4 illustre de manière schématique et à titre d'exemples la répartition des sols au sein des unités A1, A3, F1 et T. Elle permet de se faire

Tableau 1 - Variables écologiques caractéristiques de chaque secteur de référence.

Table 1 - Main ecological variables of each reference area.

Secteurs de référence	Nature lithologique	Pente	Pluviométrie	Formation végétale
Aumelas	marnes, petits et gros bancs calcaires	0-5 % et > 30 %	700 à 800 mm	garrigue régulièrement pâturée
Viols-le-Fort	calcaires en bancs métriques	0-15 %	900 à 1 000 mm	garrigue pâturée et résultant d'incendies anciens. taillis clair et garrigue arborée
Ferrières-les-Verreries	calcaires en bancs métriques.	0-15 %	1 100 à 1 200 mm	futaie assez claire
Taillade	calcaires lacustres et marnes.	> 15 %	800 à 900 mm	taillis et futaie denses

Figure 4 - Exemples schématiques de l'organisation spatiale des sols dans les unités complexes de pédopaysages des garrigues.
 Figure 4 - Spatial pattern of «garrigues» soil cover = schematic examples.

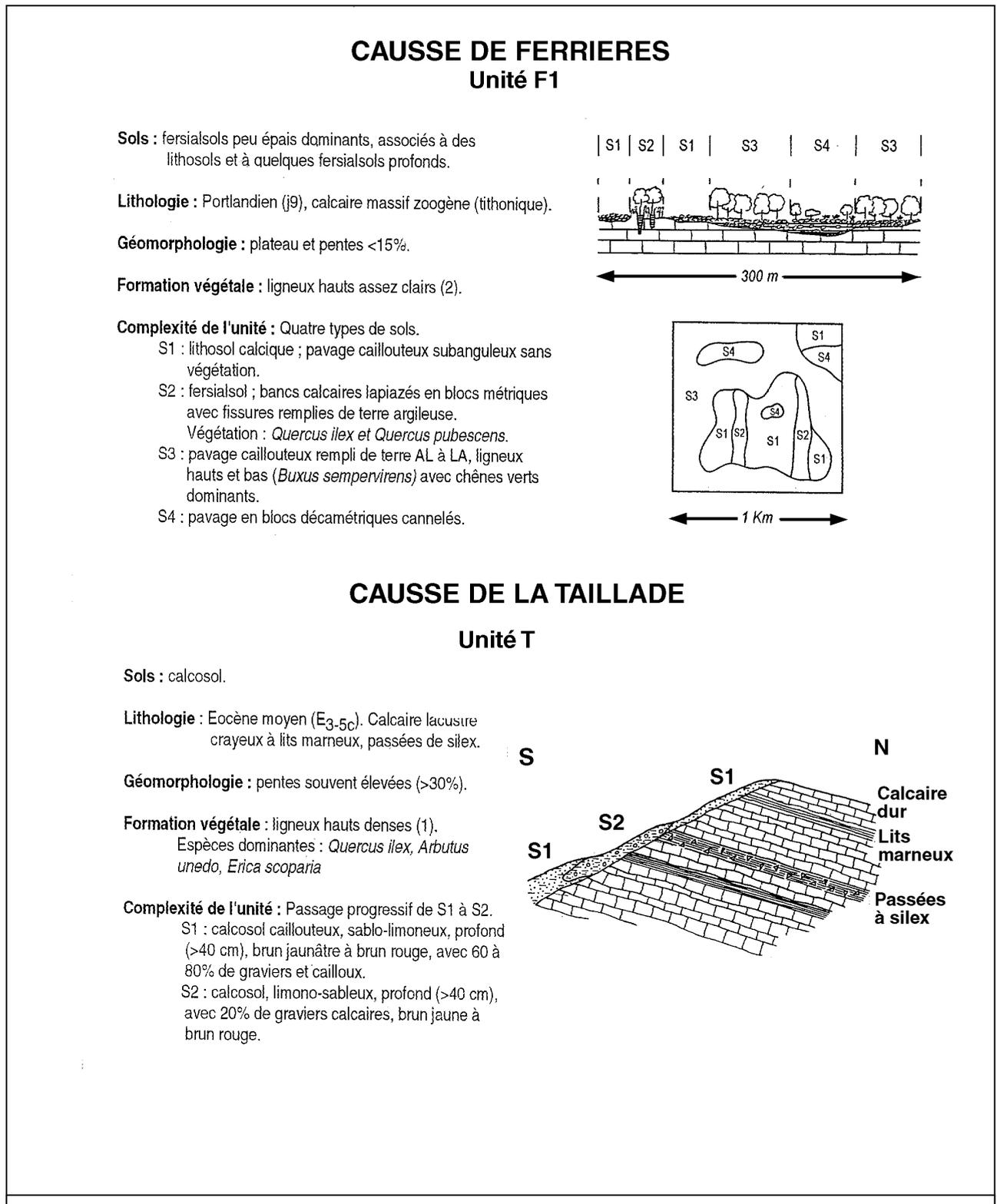


Figure 4 - Exemples schématiques de l'organisation spatiale des sols dans les unités complexes de pédopaysages des garrigues.
 Figure 4 - Spatial pattern of «garrigues» soil cover = schematic examples.

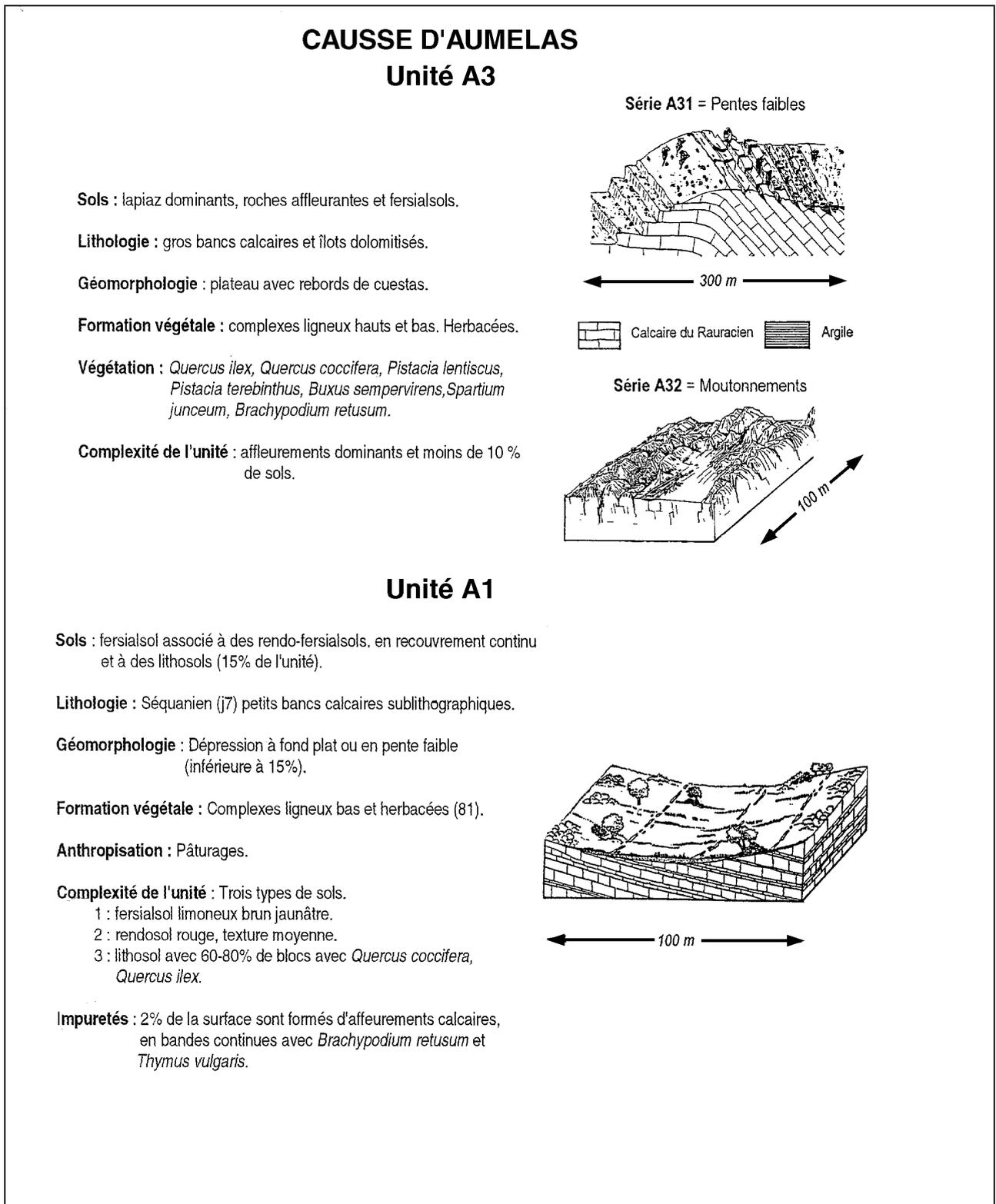
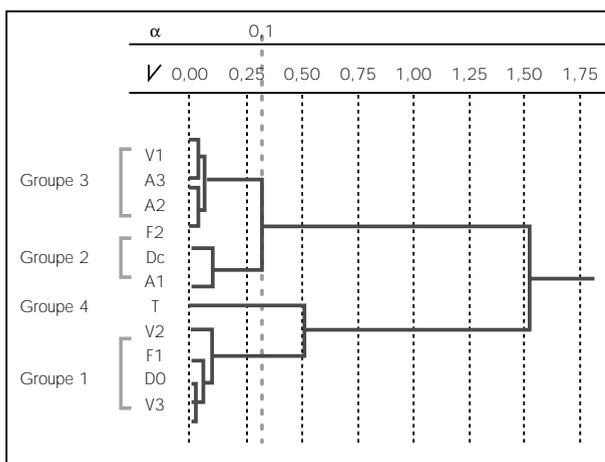


Figure 5 - Analyse de séparabilité des compositions spectrales.

Figure 5 - Separability analysis of the spectral compositions.



Les onze histogrammes figurant les compositions spectrales des sols sont soumis à une classification hiérarchique avec le lien moyen comme critère d'agrégation, et sur la base de la distance de Cramér-Von Mises V . α est la probabilité basée sur V et attachée à l'hypothèse nulle («les deux histogrammes considérés sont semblables»). Le dendrogramme figurant l'agrégation des signatures spectrales permet de déterminer quatre groupes au niveau α de 10 %.

une idée de la discontinuité et de la complexité de la couverture pédologique dans les milieux étudiés.

Nous avons mis en évidence les relations existant entre les unités de sols différenciées et la couverture végétale de la zone d'étude :

- la formation à ligneux hauts denses caractérise particulièrement l'unité T, mais l'unité V2 peut parfois présenter un couvert végétal tout aussi dense. Le couvert de V2 est aussi plus ouvert ; il se rapproche alors de la formation caractéristique de F1 et F2.

- l'unité Dc est caractérisée par deux types de formations végétales : des herbacées et ligneux bas au Sud ; cette formation est très proche de celle de l'unité A1 ; au Nord, la végétation change radicalement : les ligneux hauts sont plus nombreux et la formation végétale devient complexe (ligneux hauts, bas et herbacées).

Les formations végétales ne permettent donc pas toujours de différencier nettement chaque complexe de sols, les uns des autres. La discrimination de ces unités complexes par l'intermédiaire du seul couvert végétal apparaît donc difficile. Pour tenter un classement à partir des indices de végétation, nous allons procéder à un regroupement de certaines unités carto-

graphiques.

Classement des paysages par segmentation et analyse d'images

Pour chaque secteur d'apprentissage, des unités complexes de sols ont été inventoriées et on dispose d'une cartographie détaillée. Pour l'ensemble de la zone d'étude, on dispose simplement d'une image satellitaire LANDSAT. Si l'on veut espérer transposer les données détaillées obtenues sur les secteurs localisés des zones-tests, il faut être capable de croiser les diverses cartes détaillées avec l'analyse satellitaire. Ceci suppose de pouvoir surmonter deux types de difficultés :

- définir dans quelle mesure, à chaque unité complexe de sols des secteurs de référence, on peut associer une réponse spectrale caractéristique et bien identifiable,
- disposer d'un outil permettant d'extrapoler ces données de référence spectrales à l'ensemble de la zone d'étude.

Le signal spectral de référence

La composition spectrale de nos zones de référence est définie par un histogramme de composition en termes d'indice NDVI sur l'image LANDSAT. Pour les quatre secteurs de référence, où 11 unités complexes de sols ont pu être définies, on extrait donc les 11 signatures spectrales en termes de NDVI et on les soumet à une classification statistique hiérarchique. Seuls quatre groupes sont ici significativement différents les uns des autres au niveau de probabilité de 10 % (figure 5). Ce sont les signatures de ces quatre groupes que l'on va pouvoir agréger.

Le groupe 1 est constitué de complexes de sols dans lesquels les FERSIALSOLS sont plutôt dominants. Les groupes 2 et 3 comportent essentiellement des affleurements et LITHOSOLS CALCIFIQUES ; ils sont relativement semblables en composition (bien que très distincts en effectifs). Le groupe 4 représente quant à lui des ligneux hauts denses sur CALCOSOLS épais développés à partir de calcaire éocène (tableau 2).

Ces signatures spectrales, qui sont représentées sur la figure 6, seront finalement retenues comme histogrammes de référence pour le classement de l'image sur la totalité de la surface étudiée.

L'extrapolation des références

Il s'agit de retrouver sur l'image entière toutes les cellules ayant un voisinage spatial de composition spectrale homologues à celles des groupes de référence retenus. On ne connaît pas la taille précise des motifs à retrouver, mais on sait que leur ordre de grandeur est hectométrique. La méthode utilisée permet d'optimiser cette recherche à partir d'une gamme de taille donnée, bornée ici entre 150 m et 630 m. Chaque cellule de l'image est alors classée dans l'une des catégories spectrales prédéfinies dans les quatre groupes de paysages de référence retenus (groupes 1 à 4, figures 5 et 6). On réalise ensuite des matrices de confusion pour chaque secteur-test, dont la synthèse est figurée

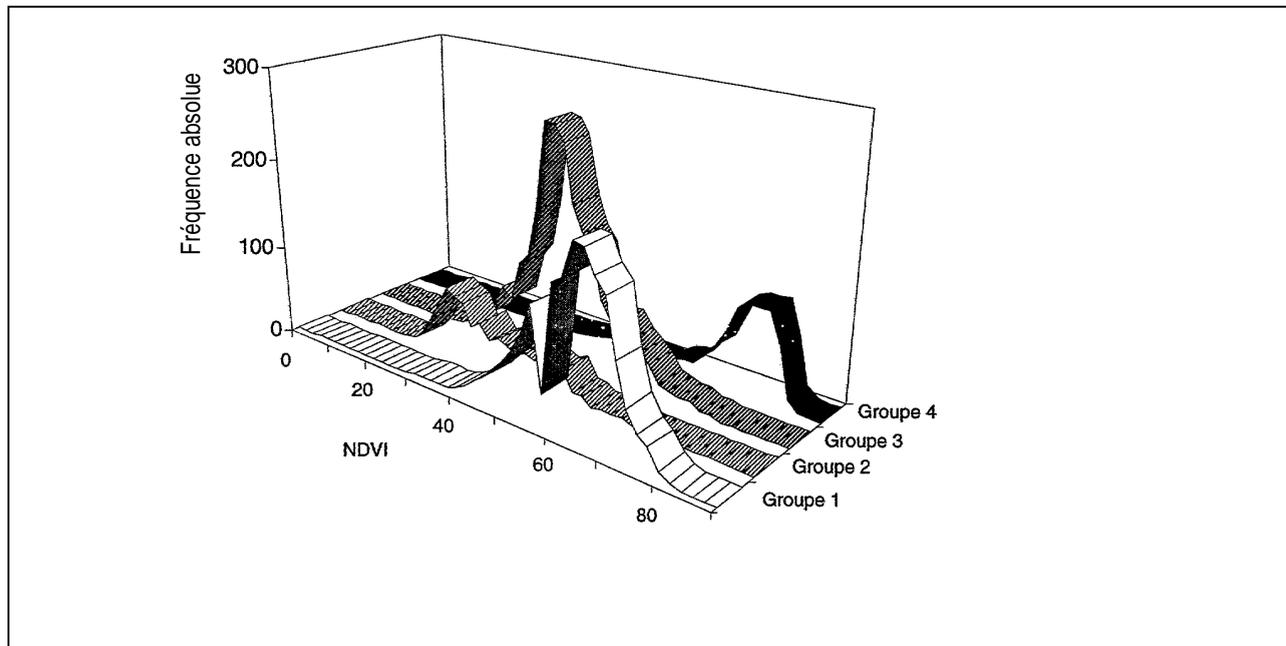
Tableau 2 - Principaux critères descriptifs des unités complexes de sols.
Table 2 - Main specific parameters of complex soils units.

Unité	Types de sols	Etage géologique	Pente	Fracturation /fissuration	Types et % d'affleurements rocheux	Formation végétale	Espèces dominantes	Activités
Do	FERSIALSOLS	j8-9	0-15 %	nulle/nulle	escarpements rocheux		herbacées, Quercus pubescens	pâturage
Dc	CALCOSOLS épais	j8-9	0-5 %	nulle/nulle	murets	garrigue régulièrement pâturée	Quercus ilex, Brachypodium retusum, prairies	pâturage, prairie artificielle
T		e3-5c	> 15 %	nulle/nulle	nul	ligneux hauts denses	Quercus ilex, Arbutus unedo, Erica scoparia	
V1	Affluements, LITHOSOLS calciques	j8-9	0-5 %	faible/importante	blocs décimétriques	garrigue régulièrement pâturée	Quercus ilex, Quercus pubescens, Juniperus oxycedrus, Thymus vulgaris	pâturage, zone militaire
V2	et	j8-9	> 30 %	faible/importante	molaires d'éléphants	ligneux hauts	Quercus ilex	coupes
V3	FERSIALSOLS en poches	j8-9	5 à 30 %	faible /importante	pavage et blocs décimétriques	garrigue sans strate herbacée	Quercus ilex, Phyllaria angustifolia, Arbutus unedo	coupes
A1		j7, j4-5	0-15 %	faible/nulle	rare blocs	ligneux bas, herbacée	Quercus coccifera, Thymus vulgaris, Brachypodium retusum, taillis de Quercus ilex	pâturage
A2		j6, j8-9	35 %	importante /importante	corniches et éboulis	garrigue pâturée occasionnellement,	Quercus coccifera	pâturage
A3		j6	5-15 %	importante /importante	pavage, molaires d'éléphants	ligneux hauts, bas et herbacée	Quercus ilex, Quercus coccifera, Brachypodium retusum	
F1		j9	0-15 %	faible /moyenne	pavage, molaires d'éléphant	ligneux haute clair	Quercus ilex, Quercus pubescens, Juniperus oxycedrus, Thymus vulgaris, Brachypodium retusum	

Nota bene : Les unités se nomment respectivement A, F, T et V parce qu'elles sont respectivement caractéristiques des secteurs d'Aumelas, de Ferrières-les-Verreries, de la Taillade et de Viols-le-Fort.

Figure 6 - Histogrammes représentant les signatures d'indices de végétation pour les quatre groupes retenus.

Figure 6 - Histograms showing vegetation index signatures for the four groups.



dans le tableau 3. L'image classée finalement obtenue à partir de cette matrice est présentée dans la figure 7.

DISCUSSION DES RÉSULTATS

Classement des paysages

Le paysage 4 est défini par un histogramme présentant son maximum dans des indices NDVI les plus élevés. C'est celui qui montre les meilleurs résultats dans la matrice de synthèse puisque 72 % de ses cellules sont bien classées. Il n'est jamais confondu avec les paysages 2 et 3. Il est cependant très sous-classé puisque seulement 205 cellules au total ont été classées en paysage 4 alors que ce groupe couvre en réalité 864 cellules (total du groupe 4 sur la Taillade).

Avec un pourcentage moins élevé, le paysage 3 révèle des résultats globalement meilleurs. En effet, 2226 sur 3326, soit 67 % de ses cellules sont bien reconnues et il n'est pas sous-classé (3348 cellules classées en paysage 3 pour 3326 cellules appartenant effectivement au paysage 3). De plus, ces résultats sont représentatifs puisque ce groupe couvre 54.3 % de la surface totale des secteurs tests. Le paysage 2 montre encore de bons résultats avec près de 45 % de cellules bien classées, mais ce paysage est sous-classé. Enfin, le paysage 1, lui, est mal reconnu : seulement 10 % de cellules sont bien

classées dans la matrice de synthèse. De plus, les résultats sont hétérogènes : 53 % de cellules bien classées sur le secteur de Viols-le-Fort, 27 % sur celui d'Aumelas et 7 % sur Ferrières. Il est à noter qu'en testant la différence entre deux histogrammes, les paysages 1 et 4 étaient ceux qui possédaient la plus petite distance. Ils sont donc plus susceptibles de se confondre. Or les cellules du groupe 3 sont plus souvent prises pour du paysage 1 que les cellules du groupe 4 (respectivement 961 contre 716).

En résumé, $2818/6125 = 46\%$ des cellules (situation diagonale dans la matrice de confusion du tableau 3) sont « bien classées ». A l'inverse, si les situations « très mal classées » sont celles pour lesquelles une confusion a été réalisée entre des groupes très distants dans l'espace des données (1 ou 4 classé en 2 ou 3, et vice-versa, au sens où cette distance est définie dans le dendrogramme de la figure 5), alors 31 % des cellules répondent à cette définition.

Interprétations et améliorations possibles

Au vu des résultats obtenus, il est possible de mettre l'accent sur quelques unes des causes majeures qui sont responsables de la médiocre qualité de ces résultats. Certaines sont liées aux caractéristiques des milieux étudiés, d'autres à la qualité des données utilisées.

La méthode mise au point est basée sur l'hypothèse d'une relation étroite entre l'état de la

Tableau 3 - Matrices de confusion obtenues à l'issue du classement.

Table 3 - Confusion matrices after the assignation process.

Les tableaux de gauche présentent les effectifs croisés, exprimés en nombre de cellules, des groupes obtenus par classement paysager (en lignes) et des groupes définis après regroupement des unités cartographiques de terrain (en colonnes). Les groupes paysagers n'apparaissant pas dans un secteur donné n'ont pas été figurés. Les tableaux de droite figurent les mêmes résultats, mais exprimés en termes de fréquences-ligne (les totaux marginaux des lignes sont donc de 100 %). On a remplacé les totaux marginaux des colonnes, sans objet ici, par les moyennes pondérées par les surfaces des fréquences-colonne (ce qui donne la fréquence de chaque groupe de complexes de sols dans chaque secteur). Les cases grisées représentent les situations d'accord entre la cartographie de terrain et le classement d'image (situations diagonales sur la matrice de confusion).

	Groupes					Groupes					
Aumelas	1	2	3	Total	Aumelas	1	2	3	Total		
Groupe 1	51	63	76	190	Groupe 1	26,84	33,16	40,00			
Groupe 2	139	218	139	496	Groupe 2	28,02	43,95	28,02	100,00		
Groupe 3	119	432	1176	1727	Groupe 3	6,89	25,01	68,09	100,00		
Total	309	713	1391	2413	Moyenne	12,81	29,55	57,65	100,00		
Ferrières	1	2	3	Total	Ferrières	1	2	3	Total		
Groupe 1	78	110	869	1057	Groupe 1	7,38	10,41	82,21	100,00		
Groupe 3	43	0	449	492	Groupe 3	8,74	0,00	91,26	100,00		
Total	121	110	1318	1549	Moyenne	7,81	7,10	85,09	100,00		
Taillade	1		4	Total	Taillade	1		4	Total		
Groupe 1	79		716	795	Groupe 1	9,94		90,06	100,00		
Groupe 4	57		148	205	Groupe 4	27,80		72,20	100,00		
Total	136		864	1000	Moyenne	13,60		86,40	100,00		
Viols	1	2	3	Total	Viols	1	2	3	Total		
Groupe 1	18	0	16	34	Groupe 1	52,94	0,00	47,06	100,00		
Groupe 3	455	73	601	1129	Groupe 3	40,30	6,47	53,23	100,00		
Total	473	73	617	1163	Moyenne	40,67	6,28	53,05	100,00		
Synthèse	1	2	3	4	Total	Synthèse	1	2	3	4	Total
Groupe 1		173	961	716	2076	Groupe 1		8,33	46,29	34,49	100,00
Groupe 2	139		139	0	496	Groupe 2	28,02		28,02	0,00	100,00
Groupe 3	617	505		0	3348	Groupe 3	18,43	15,08		0,00	100,00
Groupe 4	57	0	0		205	Groupe 4	27,80	0,00	0,00		100,00
Total	1039	896	3326	864	6125	Moyenne	16,96	14,63	54,30	14,11	100,00

Résultats en effectifs

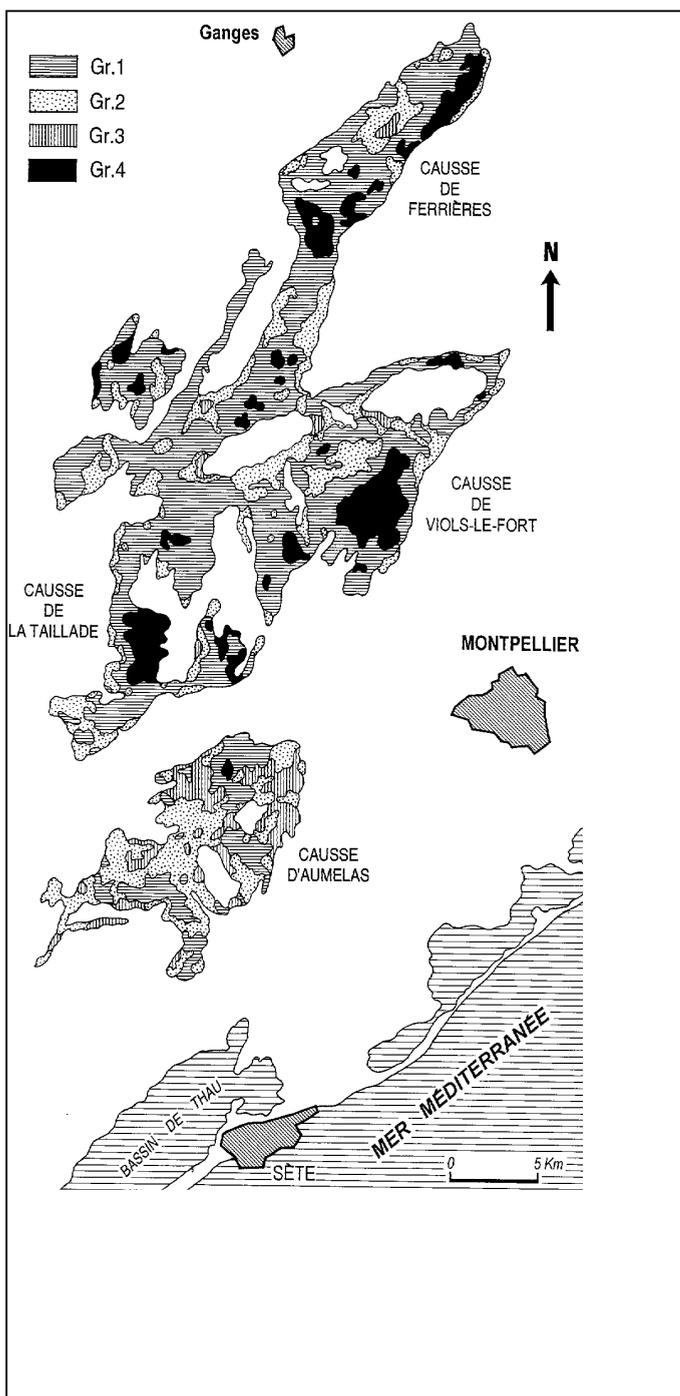
Résultats en fréquences-ligne

surface du sol et la végétation. En raison de la forte utilisation anthropique des espaces étudiés, on se situe dans un cas difficile, car les stades des successions de végétation peuvent être différents pour un même sol ; par suite, l'indice de végétation enregistré peut lui-même être différent. Par

exemple, la végétation peut subir une altération comme dans le cas du groupe 1. Constitué pour une large part de taillis de chênes verts, les forêts couvrant ces sols sont parfois exploitées pour le bois de chauffe. Les coupes sont effectuées en mosaïques et le milieu devient plus ouvert. Le couvert

Figure 7 - Classement et localisation des garrigues montpelliéraines en quatre unités de paysage.

Figure 7 - Assignment and location of the Montpellier « garrigues » into four groups of landscape units.



arbusatif alterne avec des épandages de cailloux calcaires et l'indice de végétation caractérisant de telles cellules prend une valeur moyenne.

Le substrat manifeste son influence surtout dans les premiers stades des séries phytodynamiques. La végétation peut ensuite devenir identique pour des sols différents (Nahal, 1975). L'unité V2 du groupe 1, formée de LITHOSOLS, est couverte par des forêts de Chênes verts. L'unité T du groupe 4, constituée de CALCOSOLS, présente un couvert végétal identique. Cependant, au niveau de l'indice de végétation, ces deux unités se distinguent puisque leurs histogrammes respectifs présentent une différence significative (figure 6).

L'indice de végétation ne permet pas de reconnaître chaque unité complexe de sols, et de fait nous avons dû procéder à des regroupements. Et même lorsqu'un sol correspond à un type unique de végétation, cet indice n'est pas non plus suffisant. Il constitue cependant un bon indicateur qu'il faudrait combiner avec d'autres indices (pente, exposition, lithologie, tableau 2) pour obtenir des résultats plus satisfaisants.

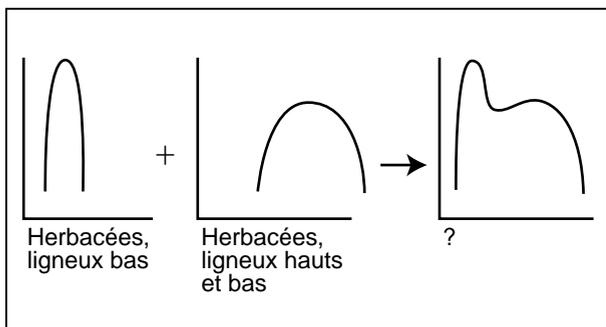
Pour obtenir la réponse spectrale définissant chacun des paysages, du fait du faible pouvoir de résolution de l'image satellitaire utilisée nous avons regroupé toutes les unités du même groupe quelles que soient leurs positions géographiques. Ces regroupements entraînent une déformation des histogrammes qui perturbe leur allure caractéristique : l'unité de sol Dc illustre bien le type de la déformation engendrée. En effet, l'unité qui se trouve au Sud est couverte par une formation végétale complexe avec des herbacées et des ligneux bas tandis que la formation végétale qui caractérise celle du Nord possède en plus des ligneux hauts. La figure 8 illustre la forme de l'histogramme résultant d'un tel regroupement.

L'histogramme résultant d'un tel regroupement n'est évidemment plus caractéristique d'un motif défini au départ. Le groupe 2 est constitué pour partie de l'unité Dc. Ce groupe se trouve justement être très mal classé, et surtout il est sous classé donc très peu reconnu.

Notre objectif était de mettre au point une méthode de cartographie à moyenne échelle des sols de garrigues. Nous avons donc travaillé sur le terrain à grande échelle pour comprendre la disposition très hétérogène et discontinue des sols dans ces milieux ; ceci n'était pas forcément compatible avec les outils de généralisation dont nous disposions : la résolution spatiale du capteur est de 30 x 30m. Suivant la loi du quart, la plus petite surface représentable est de 0.25cm² à notre échelle de travail, ce qui correspond à la

Figure 8 - Histogramme résultant du regroupement de deux unités aux formations végétales différentes.

Figure 8 - Histogram obtained by merging two units having some quite different vegetal cover.



surface couverte par 16 cellules. Pour classer un point, le logiciel observe l'environnement de ce point sur une taille minimale de 25 cellules (5 x 5) ; cette taille est donc déjà supérieure à la plus petite surface représentable. Il compare ensuite les histogrammes obtenus sur des fenêtres allant jusqu'à 21 x 21 cellules. Cette surface correspond à peu près à la taille des unités les plus grandes. Seules, les cellules du centre de ces unités seraient donc classées correctement avec une telle taille de fenêtre.

Les conditions optimales de représentativité des références n'étaient donc pas remplies. Il faut en effet choisir des tailles qui permettent de calculer des histogrammes avec un nombre de cellules suffisant pour que l'interprétation statistique soit valable, et d'autre part, cette taille doit être compatible avec celle des unités définies sur le terrain. Nous pourrions espérer des résultats plus discriminants en appliquant diverses améliorations :

- Nous pourrions effectuer un regroupement non pas sur la base de l'indice de végétation mais en réunissant les unités complexes en associations de complexes (Boulaine, 1981).

- Le programme CLAPAS pourrait être légèrement modifié : i) en ajoutant une consigne accompagnant chaque histogramme de référence. Elle préciserait la gamme des tailles de fenêtres à explorer pour chacun d'eux. ii) en pondérant le poids de chaque cellule, de manière à ce que leur influence sur l'histogramme soit décroissante au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la cellule centrale.

CONCLUSION

L'objectif du travail présenté visait à mieux caractériser les sols et les paysages des garrigues méditerranéennes, réputés pour leur forte hétérogénéité pédologique et végétale et pour leur intense dégradation anthropique liée à la pression des pâturages

et des incendies. Malgré la complexité du milieu d'étude, des relations ont pu être établies entre les sols et la végétation au sein de secteurs-tests, de superficies limitées, qui servent de zone d'apprentissage. Ces données ont été utilisées comme base pour une extrapolation spatiale sur une vaste surface ; ceci a été rendu possible grâce à une procédure de classification-classement d'image sur une base texturale, récemment mise au point.

Bien qu'encore perfectible, cette procédure fournit une qualité d'extrapolation spatiale que l'on peut considérer comme satisfaisante pour une première étape puisque :

- pour la moitié environ des situations, l'extrapolation obtenue permet de bien reconnaître ces unités de pédopaysages « sol-végétation »,

- pour un peu moins du tiers des cas, les résultats sont à remettre en cause et nécessitent des améliorations, avec prospection de terrain complémentaire. Mais, le diagnostic est en lui-même intéressant puisqu'il indique précisément les zones sur lesquelles le pédologue doit faire porter son effort de prospection.

Ainsi, on peut considérer possible de générer une cartographie de reconnaissance sur les 70 000 hectares à étudier dans de bonnes conditions de fiabilité à partir d'une surface prospectée en détail (échelle 1/10 000) d'environ 1 200 hectares. Des analyses complémentaires sont requises sur une petite partie du terrain à l'aide d'une stratégie d'échantillonnage adaptée.

Sur le plan méthodologique, les améliorations envisageables concernent essentiellement :

- un meilleur ajustement entre qualité des images satellitaires de base et outil d'analyse d'image utilisé pour les traitements,

- une utilisation optimale de l'outil de traitements d'image pour parfaire la qualité statistique des résultats en ajustant mieux la taille des fenêtres à explorer, en pondérant le poids des cellules, enfin en améliorant l'indice utilisé, qui ne doit pas seulement être un indice de végétation, mais aussi intégrer d'autres critères du milieu physique, comme la pente et la nature de la roche.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier Christine King et Jean Chrétien pour la lecture éclairée qu'ils ont faite du premier manuscrit.

BIBLIOGRAPHIE

- AFES - INRA - 1992, 1995 - Baize D. et Girard M.C. coord - Référentiel pédologique, principaux sols d'Europe. INRA, Paris, 222 p.
- Allag F., Hétiér J.P., Méchain A., 1980 - Bases cartographiques pour la mise en valeur des garrigues Gard-Hérault. I.A.R.E., Montpellier, 41 p.

- Ascensio E., 1984 - Aspects climatologiques des départements de la région Languedoc-Roussillon. Ed. de la Météorologie Nationale, Paris, 94 p.
- Aubert G., 1986 - Guide écologique de la forêt domaniale de la Gardiole. La végétation et ses relations avec les facteurs écologiques. C.R.D.P., Marseille, 69 p.
- Barbéro M., Loisel R. et Quezel P., 1992 - Biogeography, ecology and history of Mediterranean Quercus ilex ecosystems. *Vegetatio*, 99-100, pp 19-34.
- Barthès J.P., 1979 - Analyse géopédologique du massif forestier de la Gardiole de Rians (83). S.E.S. n° 466, INRA, Montpellier, 33 p.
- Barthès J.P., Bornand M., 1986 - Cartographie des sols en moyenne montagne calcaire sèche. Une méthode d'approche possible. Les colloques de l'INRA, 39, pp 95-106.
- Bornand M., Arrouays D., Baize D., Jamagne M., 1989 - Cadre méthodologique d'une cartographie régionale des sols à l'échelle 1/250 000. *Science du Sol*, 27 (1), pp 17-20.
- Bornand M., Legros J.P., Rouzet C., 1994 - Les banques régionales de données-sols. Exemple du Languedoc-Roussillon. *Etude et gestion des sols*, 1, pp 64-82.
- Bornand M., Ménier D., 1989 - Approche pédologique du milieu prairial en Margeride. *Agronomie*, 9, pp 13-26.
- Boulaine J., 1981 - Exemple de démarche cartographique dans le cas d'une couverture pédologique complexe. Sols de la forêt des Piards. *Jura méridional. Sols*, Grignon, 1, pp 10-15.
- Callot G., 1978 - Analyse des litho-systèmes carbonatés. Rôle du substratum calcaire dans la pédogénèse. S.E.S. n° 454, INRA Montpellier, 23 p.
- Callot G., Barthès J.P., 1981 - Analyse des structures géo-pédologiques en zone de montagne calcaire. Recherches méthodologiques sur les relations sol/pelouse/forêt en zone méditerranéenne. C.R. Action DGRST. Structure, dynamique et utilisation des formations à chênes pubescent en zone climatique méditerranéenne.
- Chrétien J., 1968 - Exemple d'une méthode d'étude des terrains en friche en vue de leur mise en valeur. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 272-278.
- Civeyre L., 1992 - Etude de la variabilité spatio-temporelle des flux de Carbone au sein d'un écosystème à Chêne Vert. DEA Univ. Sci. Techn. Languedoc, Montpellier.
- Favrot J.C., 1989 - Une stratégie d'inventaire cartographique à grande échelle : la méthode des secteurs de référence. *Science du Sol*, 27 (4), pp 351-368.
- Fridland V.M., 1972 - Pattern of the soil cover. Traduit du russe, 1976. Israel program for scientific translations, Jerusalem, 291 p.
- Fortin M., 1983 - Recalage d'images multi-sources : Application aux images de télédétection. Thèse de doctorat 3ème cycle. Univ. Pierre et Marie Curie, Paris 6, 164 p.
- Gerrard A.J., 1981 - Soils and landforms. An integration of Geomorphology and Pedology. George Allen & Unwin, London, 219 p.
- Gèze B., 1979 - Guides géologiques régionaux. Languedoc Méditerranéen - Montagne Noire ; Masson ; Paris, 191 p.
- Godron M., Daget P., Emberger L., Le Floch E., Long G., Poissonet J., Sauvage C., Wacquart J.P., 1968 - Code pour le relevé méthodique de la végétation, CNRS, Paris, 292p.
- Gong P., Howarth P.J., 1992 - Land-use classification of SPOT HRV data using a cover-frequency method. *Int. J. of remote sensing*, 13 (8), pp 1449-1471.
- Graetz R.D., 1990 - Remote sensing of terrestrial ecosystem structure : an ecologist's pragmatic view. in : *Remote Sensing of Biosphere Functioning* (R.J.Hobbs & H.A.Mooney eds), Springer Verlag, New-York, pp 5-30.
- Lagacherie P., 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. Th. Univ. Sci. Techn. du Languedoc, Montpellier, 175 p + ann.
- Moore I.D., Gessler P.E., Nielsen G.A., Peterson G.A., 1993 - Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57, 443-452.
- Nahal I., 1975 - Principes de conservation du sol. Masson, Paris, 143 p.
- Odeh I.O.A., Mc Bratney A.B., Chittleborough D.J., 1992 - Soil pattern recognition with fuzzy-c-means : Application to classification and soil-landform interrelationships. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56, 505-516.
- Robbez-Masson J.M., 1994 - Reconnaissance et délimitation de motifs d'organisation spatiale. Application à la cartographie des pédopaysages. Th. Doct. ENSA. M, Montpellier, 173 p.
- Robbez-Masson J.M., Borne F. et Girard M.C., 1996 - Description et Segmentation de Motifs d'Organisation Spatiale. Application à l'obtention d'esquisses paysagères. Actes du Colloque INRA « Phénomènes Spatiaux en Agriculture », La Rochelle, 06 au 08/12/1995. 12 p.
- Rogala J.P., 1982 - Approche numérique de l'espace agricole. Analyse de l'hétérogénéité et de la structure des unités cartographiques. Th. Doct. Ing. Géol. Appl., INA PG, Grignon, 224 p.
- Soumet-Delaigue D., 1976 - Incidence du faciès pétrographique de quelques roches calcaires sur leur susceptibilité à la dissolution. Relations avec les types de sols associés des Charentes et du Causse de Roquefort. Th. Univ. Sci. Techn. Languedoc, Montpellier, 118 p.
- Sprent P., 1989 - Applied nonparametric statistical methods. Chapman and Hall, London, 259 p.
- Vergès V., 1981 - Massif du Ventoux (flanc Sud). Notice de la carte pédologique au 1/25 000. S.E.S. INRA, Montpellier, 94 p.

Walker P. H., 1989 - Contributions to the understanding of soil and landscape

relationships. Aust. J. Soil Res., 27, 589-605.

Wharton S.W., 1982 - A contextual classification method for recognizing land

use patterns in high resolution remotely sensed data. Pattern

Recognition, 15 (4), 317-324.

Yongchalemchai C., 1993 - Etude d'objets complexes sols-plantes à différents

niveaux d'organisation : de la parcelle au paysage. Th. Doct. INA PG,

Grignon, 200 p.