

Téledétection des ressources en sols des zones arides

Une méthode d'inventaire adaptée au travail sur le terrain, expérimentée dans la région de Djelfa (Algérie)

N. Boulahouat et B. Naert

Institut National de la Recherche Agronomique, Maison de la Télédétection, 500 rue J.F. Breton 34093 Montpellier Cedex 5

RÉSUMÉ

Afin d'évaluer l'apport de la télédétection pour l'agent de développement qui travaille en milieu aride, les méthodes classiques de traitement de l'image, supervisées et non supervisées, ont été appliquées sur deux images Thematic Mapper et une image SPOT prises dans la région de Djelfa (Algérie).

L'étude des résultats a permis de constater que, même dans une région steppique, la relation directe entre les classifications pédologiques et radiométriques était délicate à établir, mais que certains éléments de surface, secondaires pour la caractérisation des sols, étaient très influents dans l'image. Ils sont identifiés indépendamment des unités pédologiques auxquelles ils appartiennent, dans toutes les classifications des données de l'image.

Une méthode, économe en moyens et en temps, utilisant ces éléments prééminents comme identifiants de l'aptitude des sols à produire une phytomasse, a pu être proposée comme alternative, puis comme préalable à l'approche exclusivement pédogénétique.

Mots clés

Cartographie, télédétection, pédologie, zone aride, identifiants.

SUMMARY

REMOTE SENSING SOILS RESOURCES IN ARID LANDS

METHODOLOGICAL APPROACH SUITED TO WORKING CONDITIONS, DJELFA AREA (ALGERIA)

This study proposes to develop a soils inventory method through remote sensing adaptable to arid lands. This method needs to be economical and not time consuming. Spot and TM data available for the Djelfa site (see situation plan, fig 1) were treated on a 60 km x 60 km area.

A field work study enabled to evaluate a number of unsupervised classifications and to record positioned observations about the soil surface. This processing generally led to a space partition in more or less complex landscape units. In each unit, a pedological or non pedological component is outstanding (tab 1).

At a second stage, supervised classifications were carried out using training areas chosen from a pedological map of part of the site. Different levels of perception were considered : the elementary unit (fig 2), the group (tab 2) and the pedological sub-group (tab 3).

The results vary according to perception level and processing but on the whole they are inadequate. The use of positioned observation record and of reference map information (tab 4 and 5) showed a number of surface parameters, determining for these classifications, to be at the origin of this distortion between radiometric and pedological classes.

These parameters influence the picture composition. They are brought to the fore by the search of physiognomic factors common to a same class of classified or unclassified pixels.

These second series of processing thus confirmed the logic of the previous unsupervised classifications. It brought to the fore powerful pixels grouping factors within a same class, whatever the bands combination used : outcropping rocks, stones, gypsum, sand, salt and fine elements contents, structureless soils, vegetation, soil moisture, colour.

A classical approach of pedological units discrimination relying on laboratory and field measurement is hardly possible in local working conditions. It was thus interesting to get round the difficulty. It was done by exploiting these parameters as identifiers of edaphic characteristics interesting to soils resources managers (pl. 1). To satisfy local needs, a site partition in "equipotential" edaphic units was experimented through supervised classification. The results are convincing (tab 6) and a type of readily useful cartography was set up (pl 2).

For a number of soils resources management problems, thematic maps with identifiers can reduce the difficulties of discrimination thanks to an inversion of the problem : what are, among the surface aspects easily detected by satellite, those revealing edaphic characteristics of interest to a manager. This approach does not rely as much on a spectrum analysis. It emphasises the exploitation of the complementarity between different image processing methods and of the local environment knowledge.

Key-words

Remote sensing, pedology, arid land, identifiers, soils mapping.

RESUMEN

TELEDETECCION DE LOS RECURSOS EN SUELOS DE LAS ZONAS ÁRIDAS,

un método de inventario adaptado a las condiciones de trabajo en el campo, experimentado en la región de Djelfa (Argelia)

Para evaluar la contribución de la teledetección por el agente de desarrollo que trabaja en medio árido, los métodos clásicos de tratamiento de la imagen, supervisadas y no supervisadas fueron aplicados sobre dos imagenes Thematic Mapper y una imagen SPOT sacadas en la región de Djelfa (Argelia).

El estudio de los resultados permitió constatar que, incluso en una región estépica, la relación directa entre las clasificaciones pedológicas y radiométricas eran delicadas a establecer, pero ciertos elementos de superficie, secundarios para la caracterización de los suelos, eran muy influyentes en la imagen. Estos están identifica

dos en todas las clasificaciones de los datos de la imagen independientemente de las unidades pedológicas a las cuales ellos pertenecen.

Un método, económico en medios y en tiempo, usando estos elementos preeminentes como elementos de identificación de la aptitud de los suelos a producir una fitómasa, pudo ser propuesto como alternativa, y luego como premiso al estudio exclusivamente pedogenético.

Palabras claves

Cartografía, teledetección, pedología, zonas áridas, elementos de identificación.

الخلاصة

إستعمال الإستشعار عن بعد لدراسة التربة في المناطق القاحلة. إختبار منهجية تطبيق مع ظروف العمل على الميدان بمنطقة الجلفة (الجزائر).

قصد تقييم قدرة الإستشعار عن بعد على مساعدة أعوان التنمية العاملين بالمناطق القاحلة على تحديد نوعية التربة، تم إستعمال الأساليب التقليدية لتفسير الصور الملتقطة بواسطة الأقمار الصناعية. بالإضافة إلى صور الأقمار الصناعية (صورتين للقمر Thematic Mapper وصورة ثالثة للقمر SPOT)، التجأنا إلى إستعمال خريطة التربة ومعلومات أخرى جمعت على الميدان بمنطقة الجلفة (الجزائر). لقد أظهرت النتائج أنه من الصعب، حتى في مناطق السهوب، إيجاد علاقة مباشرة بين أنواع التربة ومعطيات الإستشعار عن بعد بواسطة الطرق العادية وذلك بسبب التأثير المهم لبعض صفات سطح التربة (لون التربة، درجة إستواء سطح التربة، نسبة وجود الأحجار، ...) على الصورة رغم أن هذه الصفاة لا تلعب إلا دورا ثانويا في عملية تصنيف الأراضي. لقد أمكنت هذه الدراسة من إستغلال هذه الصفات الخاصة بسطح التربة قصد تحويلها إلى مؤشرات تدل على طاقة إنتاج التربة. إن إستعمال هذه المؤشرات لمعرفة قدرة التربة على الإنتاج النباتي يمثل طريقة تقلل الوقت وتختصر الإمكانيات. يمكن إذا إستعمال هذه الطريقة، في بعض الحالات، كبديل للطرق الكلاسيكية، وفي حالات أخرى، كوسيلة لتمهيد دراسة علم التربة بالمناطق القاحلة.

L'inventaire pédologique est l'une des clefs de la gestion des ressources en sols et du contrôle de la désertification des zones arides. Or les nombreuses études localisées qui y sont disponibles ne permettent pas aux organismes chargés du développement de ces régions d'appréhender de façon rationnelle et globale les grands espaces dont ils ont la charge¹. Les méthodes classiques de cartographie sont longues et onéreuses et ne peuvent pas répondre à l'urgence des prises de décisions nécessaires.

Bien qu'apparemment adaptées à la situation, les techniques de télédétection ne connaissent pas, auprès des structures concernées, le développement qu'on pouvait en attendre. La technologie de la télédétection comme les méthodes de cartographie sont encore trop coûteuses en temps et en moyens, pour ne pas décourager les utilisateurs locaux.

La télédétection, basée sur l'étude des signatures spectrales (Escadafal, 1989 ; Courault, 1989 ; King, 1985), nécessite un important dispositif d'observation au sol et en laboratoire, qu'il est difficile de mettre en œuvre dans ces régions. Aussi est-il intéressant de s'orienter vers des méthodes de cartographie des sols par télédétection peu exigeantes en logistique et valorisant mieux les compétences locales, notamment la connaissance du milieu par les hommes de terrain (Naert, 1992 et 1995/2).

C'est dans ce but qu'une expérience d'inventaire des ressources en sols à l'échelle de 1/100.000, à partir d'images

satellitaires, a été engagée dans le cadre du projet relatif à la "surveillance de la dynamique de désertification au Nord du Sahara"², au laboratoire INRA de télédétection de Montpellier.

Nous nous sommes proposé d'évaluer, sur le site de Djelfa, les résultats des traitements d'images les plus couramment utilisés. Des classifications non supervisées (n'utilisant que les codes numériques de l'image) et supervisées (classifications établies à partir de parcelles de référence connues sur le terrain), ont été successivement expérimentées avec des moyens techniques³ compatibles avec les conditions de travail locales.

L'analyse comparée des résultats et leur confrontation au terrain ont conduit à concevoir et expérimenter une méthode qui exploite la complémentarité des deux modes de traitement, dans une démarche autre que pédologique mais plus conforme aux objectifs cartographiques recherchés localement.

1 : Une structure comme le Haut Commissariat au Développement de la Steppe (H.C.D.S.) en Algérie par exemple, doit gérer 20 millions d'hectares.

DONNÉES ET MÉTHODES

Le site de référence est un quadrilatère de 60x60 km dont la diagonale est approximativement délimitée par la ville de Djelfa au sud-ouest et le djebel Bou Denzir au nord-est. Le secteur étudié, qui correspond à la scène Spot 45-262, s'étend sur les monts des Ouled Naïls, où l'étage bioclimatique aride (sous étages supérieur et moyen) est largement représenté (Le Houerou, Claudin et Pouget, 1977).

Les images acquises dans le cadre du projet, sont :

- la scène Landsat-TM.195-36 du 18 Mai 1989 (7 canaux),
- la scène Landsat- TM.195-36 du 22 juillet 1989 (7 canaux),
- la scène Spot 45-262 du 21 Mai 1989 (3 canaux).

Toutes les données utilisées sont gérées dans un outil appelé "référentiel" (Naert 1992, 1994, 1995), qui est composé de l'ensemble des documents d'une base de données spatialisées, traduits en fichiers numériques de format identique pour être stockés et gérés en s.i.g. matriciel.

Dans cet outil, ouvert à toutes formes d'informations repérées dans l'espace, les données sont regroupées en fonction de leur origine en : référentiel cartographique (cartes préexistantes), référentiel radiométrique (données de télédétection), référentiel topographique (exploitations d'un Modèle Numérique de Terrain) ou référentiel thématique (interprétations combinants les fichiers précédents). Seuls les deux premiers sont utilisés dans ce travail et confrontés à des références recueillies sur le terrain.

Le référentiel cartographique

Il se compose des cartes topographiques à 1/100.000 qui constituent la référence planimétrique (Moudjbara, Slim, Djelfa, Rocher de sel, Zahrez Chergui, Ain Oussera) et d'une carte pédologique à 1/100.000 (feuille du Rocher de Sel), dressée par Pouget en 1971. Cette carte des sols, qui ne couvre que très partiellement la scène Spot, a été considérée comme la référence pédologique susceptible d'être étendue à l'ensemble de la scène (figure 1). Pour permettre une superposition suffisante (20 %) entre les documents radiométriques et pédologiques, le secteur expérimental a dû être légèrement étendu à des fenêtres, extraites des images TM, un peu plus grandes que la scène SPOT.

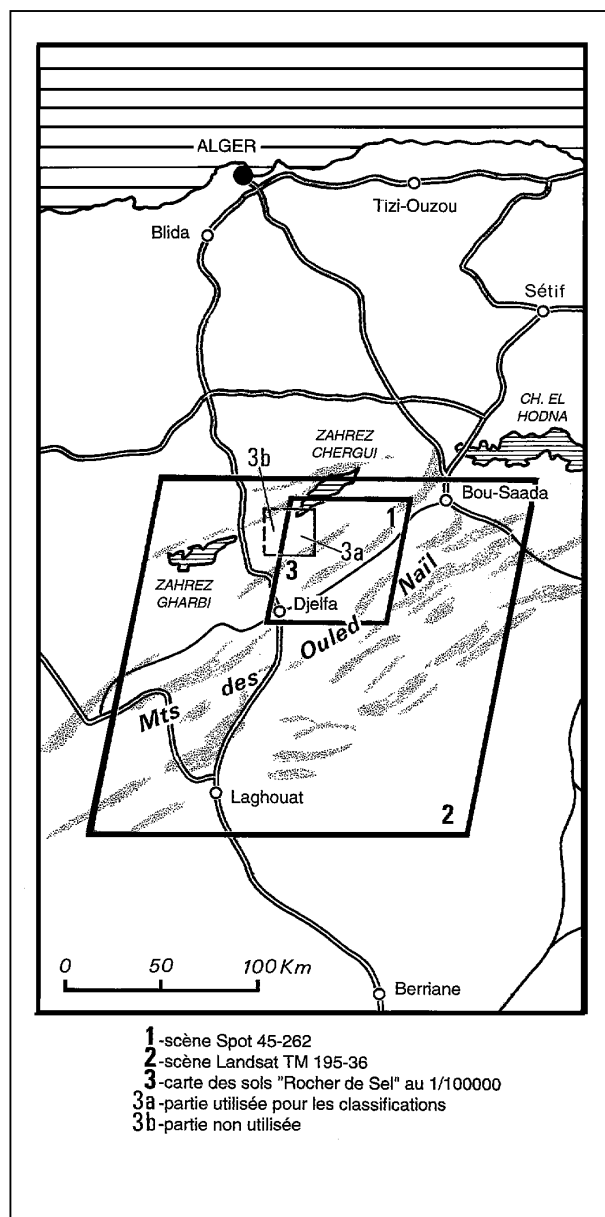
Le référentiel radiométrique

Pour pouvoir être superposables entre elles et au fond topographique à 1/100.000, les données de télédétection ont été géométriquement corrigées. L'erreur maximale de positionnement a été estimée par la suite, avec des mesures au GPS⁴ effectuées sur le terrain, à un maximum de 150 mètres.

Des pré-traitements classiques ont été appliqués pour obtenir des documents visuels proches des photographies aériennes en infrarouge couleur (combinaisons trichromes

Figure 1 - Plan de situation

Figure 1 - Situation map



2 : Contrat CCE n°946/88/65 passé avec le GUTLAR (groupement des Utilisateurs de la Télédétection du Languedoc-Roussillon).

3 : Micro-ordinateur et logiciel GM-IMAGE.

4 - G.P.S : Global Positioning System : appareil permettant le repérage sur le terrain en calculant les coordonnées géographiques par rapport à un certain nombre de satellites.

avec rehaussement de contraste), et pour améliorer l'intérêt thématique de ces images (diverses combinaisons arithmétiques). Une vingtaine de documents ont ainsi été réalisés en vue d'une exploitation sur le terrain. Ils comprennent :

- des trichromies pour comparer les données multi-dates et multi-sources (3 canaux XS pour Spot et 3 des canaux TM (2, 3 et 4) qui leur correspondent approximativement),
- des trichromies utilisant les canaux les moins corrélés des données TM, porteurs du maximum d'information (combinaison des canaux 1, 2 et 4 pour la scène de mai 1989 et 1, 3 et 5 pour celle de juillet),
- des indices de brillance et indices de végétation normalisés⁵,
- des néo-canaux issues de l'analyse en composantes principales, de calculs arithmétiques, ou de la combinaison bichrome indice de végétation - indice de brillance.

Dans ces pré-traitements, deux objectifs ont été poursuivis : mettre en valeur des objets facilitant le repérage au sol (réseau hydrographique, routes, pistes, végétation, unités géomorphologiques, etc.), et identifier des espaces naturels compatibles avec une cartographie à moyenne échelle.

Les références de terrain

La base de données a été complétée pour les besoins de l'expérience par des observations au sol localisées avec la plus grande précision possible dans l'espace. Il s'agissait de constituer une base d'informations de terrain pour contrôler l'extrapolation et expliquer d'éventuelles difficultés d'interprétation.

Pour y parvenir, à l'aide du référentiel radiométrique et de classifications non supervisées, un réseau d'itinéraires a été tracé afin de reconnaître, sur le terrain, avec les images pré-traitées, les principales variations du milieu. Ce réseau d'observations comporte :

- cinq transects principaux, traversant la totalité de la scène de référence essentiellement de direction SO-NE (direction de la chaîne atlasique) et S-N ;
- et onze transects secondaires, sans direction prédéterminée, dont le but est de reconnaître ou confirmer sur place le contenu de classes repérées sur l'image en mode non-supervisé.

Chaque unité de sol ou de végétation rencontrée le long de ces transects, a été décrite et localisée en latitude et longitude à l'aide du GPS. Sur 230 stations observées, 150 seulement ont été retenues, pour prendre en compte l'erreur de repérage possible ; erreur qui a été, par prudence, surestimée à 200 m. Les unités de sol et de végétation qui n'atteignent pas, sur un transect, une longueur supérieure à 200 m ont été éliminées.

⁵ - indice de végétation = $\frac{PIR-R}{PIR+R}$ et
indice de brillance = $\frac{-R^2 + PIR^2}{PIR+R}$ dans lesquels :
R = valeur numérique du canal rouge et
PIR = valeur numérique du canal proche infrarouge

Le fichier ainsi obtenu, a servi par la suite à valider les résultats des différentes classifications et à la recherche des identifiants (critères physiologiques caractéristiques d'une unité pédologique et perceptibles par le satellite).

A noter que :

- cet échantillon de 150 points s'est avéré suffisant pour une première recherche méthodologique,
- dans la mesure où les limites des zones homogènes de sols et de végétation sont repérées au GPS. le long de ces transects, il demeure possible, si nécessaire, de multiplier au gré des besoins le nombre de points de contrôle pour apprécier la qualité des différentes interprétations,
- ces points de contrôle se sont montrés particulièrement utiles pour tenter de comprendre les causes de l'association de plusieurs unités de sols ou de la dispersion de l'une d'elle entre différentes classes.

ANALYSE : ÉVALUATION DES PRINCIPALES MÉTHODES DE CLASSIFICATION DES DONNÉES SATELLITAIRES

Classifications non-supervisées

La classification hiérarchique ascendante conduit, en général, par une procédure entièrement automatique, à distinguer sur l'image plus de 200 classes différentes. Ce grand nombre de classes est difficile à interpréter pour un utilisateur, car s'il permet en théorie la reconnaissance de thèmes variés, il aboutit en pratique à la confection de documents complexes difficilement exploitables sur le terrain, sans pour autant garantir l'intérêt thématique de toutes les classes identifiées.

Il se pose donc, dans ces classifications non supervisées, le problème du choix du nombre de classes "gérables" et de la sélection des classes les plus "utiles".

Détermination du nombre de classes :

Quelle que soit la combinaison de canaux utilisée, on constate que certaines unités thématiques très proches sont distribuées dans des classes nettement différentes du point de vue radiométrique. Ainsi la cuvette du Zahrez Chergui visible sur les images, est éclatée en plusieurs secteurs correspondant à :

- des zones à efflorescences salines,
- des steppes crassulescentes bienvenantes,
- des zones humides,
- des bourrelets éoliens (façade sud du Zahrez).

Il en est de même du secteur forestier, où apparaissent des classes de densité et d'âge des peuplements, comme du cor-

don dunaire (zone centrale de dunes hautes à sable fin, périphérie à sable plus grossier et dunes plus basses).

A titre d'exemple, sur 15 classes obtenues avec les données Spot, on note 3 subdivisions dans le secteur du Zahrez Chergui, alors qu'il s'agit d'une unité pédologique globalement homogène.

Puisque la classification non supervisée crée ainsi, dans les unités naturelles, des classes indépendantes de l'intérêt recherché, il importe, pour que l'interprétation soit efficace, de supprimer les subdivisions inutiles et de valoriser les différences intéressantes.

Il s'est avéré préférable, pour y parvenir, d'opter pour un procédé de classification automatique partiellement directif. Après avoir constaté que dans notre exemple, l'algorithme produit plus de 220 classes, et que l'essentiel de l'espace est affecté dans les 30 à 40 premières, ce sont des classifications en 40 classes seulement qui ont été effectuées sur les différents documents composant le référentiel spectral.

Cette partition a été ramenée ensuite, par regroupement manuel, aux 15 classes les plus intéressantes sur le plan thématique. Pour cela, toutes les subdivisions des ensembles sol-végétation, que la connaissance du terrain a permis de juger inutiles, ont été supprimées. Cela concerne le Zahrez, les forêts anciennes, les reboisements et le cordon dunaire. Après cette opération, il subsistait encore quelques classes de faible superficie, qui ont été affectées aux 15 unités principales selon la proximité de leur code de couleur en faisant l'hypothèse qu'elle traduisait aussi une proximité thématique.

Ce mode de classification, qui comporte nécessairement une part d'arbitraire et demande une connaissance minimum préalable du terrain, offre l'avantage de réduire d'emblée les discordances entre classes thématiques et classes radiométriques.

Identification des classes utiles

Les classifications non supervisées, ainsi obtenues à partir des divers documents du référentiel radiométrique, ont été interprétées directement sur le terrain. Elle expriment globalement 11 thèmes du domaine minéral et 3 thèmes du domaine végétal (tableau 1).

On constate que les classes "pures", désignant un thème exclusif, sont l'exception. En général, les classes représentées ont une signification thématique majeure, mais elles incluent aussi un certain nombre d'unités secondaires occupant une surface moindre.

Certaines confusions sont communes à l'ensemble des traitements :

- sols halomorphes et domaine urbain,
- forêts, ou reboisements denses, et fonds de dayas humides⁶,

- sols fortement battants et marnes gypseuses ou affleurements calcaires,

- effet d'ombre et forêt adulte, en particulier le long des crêtes monoclinales exposées au Sud-Sud-Est, comme la façade Sud du Djebel El Baten,...

et cela, quelle que soit la source de données et la date de prise de vue (seule la proportion de pixels mal classés change).

Les thèmes secondaires varient en nature et en surface selon les traitements. Les regroupements les plus fréquents sont indiqués par la deuxième colonne du tableau 1.

Dans le domaine minéral, les classifications les plus intéressantes sont issues des triplets de canaux 1,2,3 et 1,3,5 (ou 1,3,7) de τ_M , alors que dans le domaine végétal, la supériorité de Spot XS et de la combinaison τ_M 2,3,4 est nette. A ce niveau de traitement, les données Spot n'apportent pas plus d'informations que celles de τ_M et se caractérisent par une relative hétérogénéité, probablement due à la plus grande résolution du pixel. Par contre la combinaison bichrome de l'indice de brillance et l'indice de végétation normalisé Spot s'est révélée plus efficace que la même combinaison exploitant les données τ_M dans les bandes spectrales équivalentes (canaux 2, 3 et 4).

L'exploitation du fichier de terrain permet d'émettre des hypothèses plausibles sur les liens qui unissent les unités de paysage qui n'ont pas pu être dissociées sur l'image. Ce fichier comporte, par exemple, sept points qui auraient dû être classés avec les formations gypseuses, mais qui sont attribués à tort soit à des sols halomorphes des dépressions (4 points), soit à des sols profonds limoneux à limonosableux des dayas (3 points). Ces points mal classés ont un caractère commun : la présence d'une pellicule de battance qui accroît la clarté de la surface.

La même analyse, répétée à l'ensemble des thèmes principaux, a permis de mettre en évidence quelques unes des caractéristiques de surface qui semblent particulièrement déterminantes sur le comportement spectral : la pierrosité, la texture, la présence d'une croûte de battance, le sable et le type de sable, le gypse, la salinité, la roche compacte calcaire, l'humidité, la végétation.

Le traitement "non supervisé" a donc permis d'identifier des unités de paysage, plus ou moins complexes, dont un composant (pédologique ou non pédologique) est dominant sur l'image. Il a confirmé dans cet exemple pris dans les régions steppiques, les aptitudes qui lui sont généralement attribuées : "fournir un bon dégrossissage de l'information et être utile lorsqu'on dispose de peu de données préalables" (Girard et Girard, 1989).

6 - après les 52.6 mm de pluie en Juin, suivie d'orages les 9, 12 et 14 juillet 1989 (source : station météo. Djelfa)

Tableau 1 - Thèmes détectés en mode non supervisé

Table 1 - Elements detected with the unsupervised method

Unités principales	Unités secondaires les plus fréquemment associées (a)	Classifications les plus performantes				
		spot XS	Spot IVB (b)	TM mai 2 3 4	TM juil1 1 2 3	TM juil 1 3 5 1 3 7
DOMAINE MINÉRAL						
1 Roche dure ou marneuse, dominante des Djebels et reliefs nus	2, 12, 13		x	x	x	
2 Sols à très forte pierrosité, cailloux et blocs calcaires ou gréseux des glacis d'érosion anciens quasi-entièrement dénudés, petits relief	1, 3, 14	x	x	x	xx	xx
3 Sols squelettiques à forte pierrosité, débris de croûte dans une matrice limoneuse des glacis plus ou moins érodés	2, 4	x	x	x	xx	xx
4 Dunes du cordon dunaire	-	xx	xx	xx	xx	xx
5 Sable grossier bordant le cordon dunaire (ou dunes plus basses)	-	x	x	x	xx	xx
6 Accumulations de sable mobile : voile éolien, nébkas, placage de sable, micro-dunes	7	x		x	xx	xx
7 Sols de texture sableuse dominante	4, 8	x		x	xx	xx
8 Alluvions, colluvions, texture limoneuse à limono-sableuse des terrasses et glacis récents, moins caillouteux	3, 5	x	x	x	x	x
9 Sols limoneux à limono-sableux profonds des dayas et zones d'accumulation	4,6,7,11,12,13,14	x	x	x	x	x
10 Sols halomorphes des dépressions	4, 5, 6	xx	xx	xx	xx	xx
11 Formations gypseuses, efflorescences, marnes, croûte gypseuse superficielle	4, 5, 11		x		xx	xx
DOMAINE VÉGÉTAL						
12 Forêts anciennes de pin d'Alep	1, 13, 14	xx	xx	xx		
13 Matorral à juniperus Ph. ou Ox. et bon peuplement Ziziphus L.	1, 2, 12, 14	xx	x	xx		
14 Jeunes reboisements et bonnes steppes à Stippa Tenacissima	1, 2, 13	xx	x	xx		x

(a) Les chiffres renvoient aux numéros des unités thématiques du même tableau

(b) IVB : combinaison bichrome indice de végétation - indice de brillance Spot

x : assez bien identifié

xx : bien identifié

Classifications supervisées

Repérer une unité de sol sur le terrain, ou sur un document cartographique de référence, puis s'en servir d'échantillon dans une procédure de classification supervisée paraît être la démarche la plus simple. C'est pourquoi, dans un premier temps, les principales unités pédologiques de la carte de référence ont été utilisées, l'une après l'autre, dans l'apprentissage.

Différents niveaux de détail sont envisagés dans la nomenclature utilisée par Pouget (classification C.P.C.S. 1967). Sa carte pédologique inventorie sept classes de sols qui sont, elles même, subdivisées en sous-classes, groupes et sous-groupes. Seize sous-groupes concernent la zone de référence, mais si on descend au niveau des familles et séries, on obtient des dizaines de combinaisons possibles. Ce nombre est encore plus élevé si on tient compte des associations de sols que l'Auteur désigne par les termes de "juxtapositions" et "séquences"⁷.

Les unités de sols décrites par Pouget représentent au total 20 % de la superficie des fichiers-images de l'expérience. Elles sont utilisées comme parcelles d'apprentissage pour des classifications supervisées utilisant un algorithme de maximum de vraisemblance (méthode de Bayes), et des combinaisons de canaux TM. Les combinaisons exploitées sont celles qui se sont révélées être intéressantes avec les classifications non supervisées précédentes, auxquelles ont été rajoutés les canaux 4, 5, 7, théoriquement adaptés à la discrimination des éléments minéraux (Foin, 1987).

Deux options importantes ont été prises dans ce travail :

- seules les données TM du 22 juillet ont été utilisées, pour limiter les interférences avec la végétation printanière et les cultures céréalières,
- ne sont utilisées comme parcelles d'apprentissage que les unités situées au niveau des groupes et sous-groupes pédologiques ; parce que d'une part les familles et séries ne sont pas délimitées sur la carte de référence par un contour, mais simplement désignées par l'adjonction de symboles, et que d'autre part, les classes et les sous-classes ne fournissent pas suffisamment d'informations pour gérer les ressources en sols.

Au niveau de l'unité pédologique

La prise en considération de la totalité des pixels extraits dans ces conditions par la classification supervisée conduit en général à une représentation exagérée de l'unité de sol concernée, qui est anormalement étendue à des unités pédologiques différentes ayant un comportement spectral voisin. On bute ainsi sur le choix du seuil de rejet optimal, qui ne peut pas

être valablement fixé pour une unité pédologique sans tenir compte des autres.

Ce problème peut être explicité avec deux unités de sol : les sols bruts d'apport éolien, qui sont particulièrement contrastés sur l'image et, à l'opposé, les sols calcimagnésiques bruns calcaires xériques dont la signature spectrale occupe une large plage dans le spectre.

Les premiers ont une plage radiométrique qui leur est relativement spécifique et sont homogènes sur le terrain. Avec un seuil de rejet de 1 %, les pixels ayant moins de probabilités d'appartenance à la classe des sols bruts d'apport éolien sont éliminés et la classification est satisfaisante. L'augmentation du seuil de rejet de 1 à 5 % apporte très peu de changement : au moins 81 % des pixels de l'échantillon restent bien classés (figure 2a).

Par contre, pour les sols calcimagnésiques bruns calcaires xériques (figure 2b), une variation minime du seuil de rejet entraîne un changement important de la classification. Cette unité cartographique, plus hétérogène sur le terrain, s'étend sur des plages radiométriques communes à d'autres unités de sols et demande en conséquence une plus grande précision dans le choix du seuil de rejet.

La classification supervisée nécessite donc une connaissance du terrain d'autant plus importante que l'unité pédologique est peu différenciée dans l'image.

Au niveau du groupe pédologique

Lorsqu'on utilise les 13 groupes pédologiques inventoriés dans l'apprentissage (tableau 2), on constate que sont relativement bien classés :

- les sols minéraux bruts d'apport éolien (cordon dunaire),
- les sols minéraux bruts d'érosion, en dehors des formes incluses dans les "séquences" et les "juxtapositions" (incursion gypseuse du Trias dénommée "Rocher de Sel", pour l'essentiel),
- les vertisols à drainage externe nul ou réduit,
- les sols calcimagnésiques carbonatés, rendzines hors zone forestière.

Dans les groupes de sols mal discriminés, on relève que la classe des rendzines est exagérément étendue aux zones forestières.

Dans les unités de sols complexes (séquences et juxtapositions de sols bruns calcaires ou rendzines et sols minéraux bruts d'érosion), des unités de sols qui n'entrent pas dans leur composition sont mises en évidence par la classification supervisée ; c'est le cas en particulier des sols minéraux bruts d'apport alluvial et surtout des siérozems.

7 - Juxtapositions : "ensemble de sols ne comportant individuellement que de petites surfaces et dont les positions relatives ne paraissent dépendre d'aucune règle de répartition précise"

- Séquences : "ensemble des sols dont la succession se trouve constamment dans un ordre déterminé, sans qu'il y ait de lien génétique apparent entre eux".

Figure 2 - Rôle du seuil de rejet dans la classification en fonction du type de sol

Figure 2 - Importance of the rejection point in a classification using one type of soil

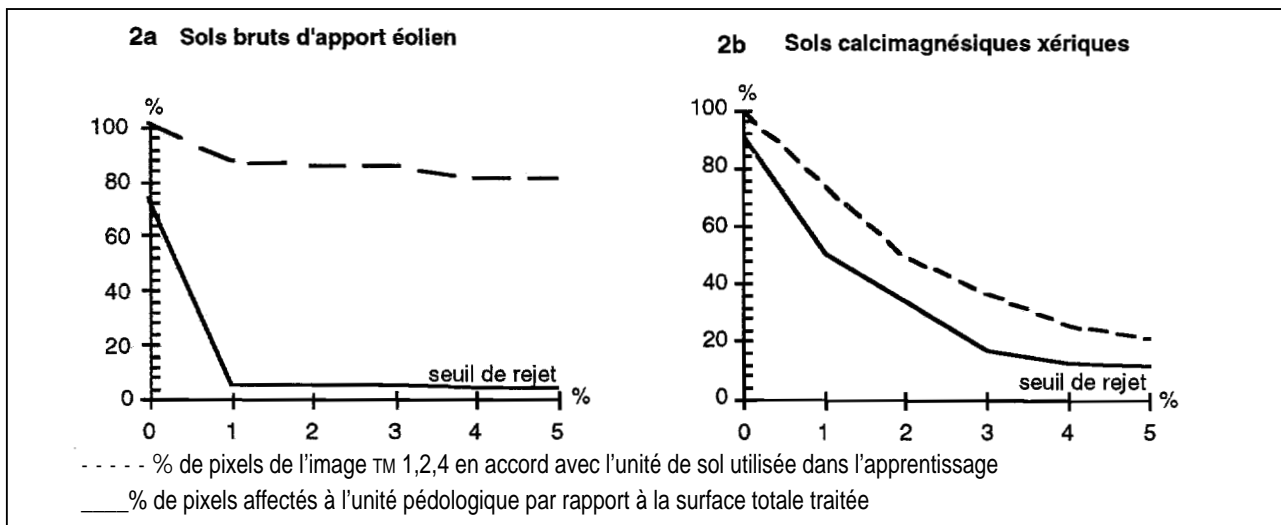


Tableau 2 - Évaluation des classifications supervisées en groupes pédologiques exprimée en pourcentage de pixels bien classés

Table 2 - Valuation of supervised classifications in pedological groups (% well classified pixels)

Groupes pédologiques	TM123	TM234	TM135	TM457
1 - Sols minéraux bruts, non climatiques d'apport éolien	68	79	78	90
2 - Sols minéraux bruts, non climatiques d'apport alluvial	26	31	78	34
3 - Sols minéraux bruts, non climatiques d'érosion	56	66	63	57
4 - Sols peu évolués non climatiques d'apport alluvial, local. éolien	27	24	36	41
5 - Vertisols à drainage externe nul ou réduit, à struct. anguleuse	80	72	72	62
6 - Sols calcimagnésiques carbonatés, bruns calcaires	44	55	48	37
7 - Sols calcimagnésiques gypseux à encroûtement gypseux	22	38	34	21
8 - Sols calcimagnésiques carbonatés, rendzines	74	74	74	72
9 - Sols isohumiques, à pédo-climat frais, siérozems	22	00	20	0
10 - Sols hydromorphes, peu humifères à redistrib. de calc. et de gypse	10	37	16	0
11 - Sols hydromorphes peu humifères à gley	3	0	15	3
12 - Sols halomorphes, à structure non dégradée, salins	13	16	16	0
13 - Sols halomorphes à structure dégradée, salés à alcalis	26	29	31	13

Comme certaines associations de canaux se sont révélées plus discriminantes pour des groupes de sols particuliers dont elles facilitent sensiblement l'extraction, plusieurs essais complémentaires ont été effectués en combinant notamment des néo-canaux (indices de brillance, ACP, combinaisons arithmétiques diverses). Ils ont montré qu'il est possible d'optimiser les

résultats, notamment en atténuant l'effet végétation ; mais globalement, les sols difficiles à classer le restent, quelle que soit la combinaison de canaux ou de néo-canaux utilisée.

Il semble donc que la classification supervisée ne permet de détecter dans des conditions acceptables, qu'un nombre limité de groupes pédologiques.

Au niveau du sous-groupe pédologique

Cette subdivision concerne seize sous-groupes pédologiques (tableau 3). Elle permet de mieux identifier les siérozems modaux et améliore la classification des sols peu évolués d'apport alluvial et des sols halomorphes salins. Par contre les rendzines et les vertisols, qui étaient relativement bien classés au niveau du groupe pédologique, sont plus dispersés. Il apparaît, en outre, que l'introduction de nouvelles unités dans l'apprentissage, en modifiant la distribution statistique des codes numériques, provoque la dispersion des unités pour lesquelles il n'y a pas eu de subdivision en plusieurs sous-groupes.

Les renseignements complémentaires de la carte de Pouget (indiqués par les pastilles et symboles) sur les roches, les accidents de surface, la profondeur de la croûte, la salure, etc., révèlent des paramètres communs aux pixels mal classés. En examinant systématiquement les principales unités de sols, on constate que des éléments communs à des sous-groupes de sols différents perturbent la classification supervisée. C'est le cas de la croûte calcaire superficielle, qui induit des confu-

sions dans la détection des sols calcimagnésiques bruns calcaires xériques, des siérozems modaux et des sols peu évolués d'apport alluvial (tableau 4).

De même, c'est la clarté des sols battants, salins ou hydromorphes, qui apparaît comme le principal facteur de confusion pour les sous groupes suivants :

- vertisols halomorphes à drainage externe réduit,
- sols hydromorphes peu humifères à encroûtement gypseux,
- sols hydromorphes peu humifères à gley salés,
- sols halomorphes à structure non dégradée et encroûtement gypseux de nappe,
- sols halomorphes à structure dégradée, salés à alcalis.

Certaines unités pédologiques, comme les sols peu évolués qui sont très hétérogènes sur le terrain, présentent des confusions au niveau des groupes et des sous-groupes mais sont discernables sur l'image au niveau de la famille ou de la série. D'autres sont mieux reconnus dans les niveaux les plus élevés de la classification pédologique ; c'est le cas des sols bruns calcaires xériques, souvent confondus avec les rendzines modales qui appartiennent à la même sous-classe (planche 1b).

Tableau 3 - Évaluation des classifications en sous-groupes pédologiques exprimée en pourcentage de pixels bien classés
Table 3 - Valuation of classifications in pedological sub-groups (%well classified pixels)

Groupes pédologiques	Sous-groupes	TM123	TM234	TM135	TM457
1- minéraux bruts d'érosion	regosols	52	62	68	32
2- minéraux bruts d'apport alluvial	modaux	20	17	17	23
3- minéraux bruts d'apport éolien	modaux	79	79	63	89
4- peu évolués d'apport alluvial	modaux	20	39	38	37
5- peu évolués d'apport alluvial	halomorphes	58	57	57	49
6- vertisols à drainage externe réduit	halomorphes	63	52	52	59
7- calcimagnésiques carbonatés, rendzines	modaux	26	22	32	54
8- calcimagn. carbonatés bruns calcaires	modaux	35	38	41	28
9- calcimagn. carbonatés bruns calcaires	xériques	41	36	36	17
10- calcimagn. à encroûtement gypseux	modaux	16	29	26	11
11- isohumiques, siérozems	modaux	73	77	75	77
12- isohumiques, siérozems	à encroûtement calcaire	00	13	19	0
13- hydromorphes peu humifères	à gley salés	00	14	23	2
14- hydromorphes peu humifères à redistribution de calcaire et gypse	à encroûtement gypseux	16	19	39	0
15- halomorphes à structure non dégradée, salins	à encroûtement gypseux de nappe	12	23	28	0
16- halomorphes à structure dégradée.	salés à alcalis	23	21	28	10

Tableau 4 - Paramètres communs aux pixels mal classés pour 4 sous-groupes pédologiques

Table 4 - Parameters common to the badly classified pixels for 4 pedological sub-groups

Paramètres :	sable	gypse	croûte calcaire	forêt	battance	texture fine
Sous groupes pédologiques :						
Sols calcimagnés. bruns calc. xériques	x	x	x	x		
Siérozems modaux		x	x			
Sols peu évolués d'apport alluvial			x		x	x
Siérozems à encroûtement calcaire		x		x		

La classification supervisée, appliquée au niveau du sous-groupe pédologique, améliore la reconnaissance de certains sols, mais n'évite pas d'importantes confusions.

Les paramètres influants de l'image

Qu'ils proviennent de classifications supervisées ou non supervisées des données satellitaires, les résultats obtenus sont donc fortement conditionnés par quelques éléments de surface qui prédominent dans l'image. Le sable, le gypse, la croûte calcaire, la pierrosité ; la végétation, la pellicule de battance et la texture fine, sont de puissants facteurs de regroupement dans les classifications. Ils déterminent le comportement spectral des sols indépendamment de leur appartenance à une unité pédologique, et de nombreux auteurs dont : Bendali et El Hamroui (1986) ; Courault (1989), Escadafal (1989), Escadafal et Pouget (1986) ou King (1985) estiment que les aspects de surface qui influencent la réponse spectrale et favorisent ou défavorisent l'identification des sols sont fortement corrélés à la couleur et à la rugosité.

En dehors de ces aspects physiques, il est intéressant d'évaluer l'influence de quelques uns de ces paramètres sur la cartographie. Les sous-groupes pédologiques ont donc été associés en fonction des éléments qu'ils avaient communs, et

à titre d'exemples, nous avons distingué parmi les sols quatre ensembles en fonctions des critères suivants:

- croûte calcaire superficielle, de 0 à 40 cm,
- croûte moins superficielle, de 40 à 100 cm,
- croûte et encroûtement gypseux,
- sans croûte ni encroûtement.

Ces ensembles ont ensuite été utilisés comme parcelles d'apprentissage.

Les résultats obtenus par classification supervisée, et exprimés en pourcentage de pixels bien classés, sont nettement supérieurs à ceux qui dérivent des sous-groupes pédologiques originels (tableau 5).

De même, on obtient selon le traitement, de 65 à 80 % de pixels bien classés, avec les sols à croûte calcaire regroupés, sans prendre en considération la profondeur de la croûte ; ou encore, près de 80 %, dans une expérience similaire conduite avec le sable, hors cordon dunaire, etc.

La présence d'éléments de surface qui prédominent dans l'image et compliquent l'identification des unités pédologiques, révèle par contre des propriétés communes à des unités de sols différentes. Il est donc logique d'utiliser directement ces propriétés pour réaliser des cartes destinées à la gestion des ressources en sol (reboisement, fixation de sables, mise en culture, amélioration des parcours, etc.), plutôt que de poursuivre une

Tableau 5 - Classification en fonction d'identifiants exprimée en pourcentage de pixels bien classés

Table 5 - Classifications according to determining identifiers (% well classified pixels)

Images :	TM 1,2,3	TM 2,3,4	TM 1,3,5
Identifiants :			
Croûte calcaire 0 - 40 cm	59	58	60
Croûte calcaire 40 - 100 cm	63	65	65
Croûte et encroûtement gypseux	66	68	69
Alluvions sans croûte ni encroûtement	67	72	68

démarche strictement pédologique, mais incertaine et surtout lourde en temps et en moyens, pour l'homme de terrain.

CONSÉQUENCE : UTILISATION D'IDENTIFIANTS DE PROPRIÉTÉS ÉDAPHIQUES POUR LA CARTOGRAPHIE DE POTENTIALITÉS AGRONOMIQUES DES SOLS

Principe

La démarche que nous proposons consiste donc à ne plus tendre à inventorier les sols selon les critères pédologiques, mais à partitionner l'espace en fonction d'éléments qui sont à la fois perceptibles sur l'image et corrélés à des propriétés édaphiques intéressantes pour une exploitation définie. Nous nous sommes placé, pour la mettre en pratique, dans un cas concret concernant le territoire de l'expérience. Il s'agit d'un des objectifs actuels confiés au Haut Commissariat Algérien de Développement de la Steppe (H.C.D.S.) : le découpage de la steppe en "unités pastorales". Ce découpage est un préalable au rapprochement des droits de propriété et de jouissance dont l'actuelle séparation empêche toute gestion rationnelle du milieu. En dehors des critères socio-économiques, l'un des éléments clefs de la délimitation de ces unités (1 200 environ) est la qualité des terres. Une carte des potentialités exprimant la valeur agricole ou pastorale du milieu est donc nécessaire.

Dans une phase préliminaire, les éléments de surface perceptibles sur l'image (sable, croûte calcaire), qui étaient fortement corrélés au centre d'intérêt de l'utilisateur local, ont été retenus comme identifiants de zones équi-potentielles.

Après avoir utilisé ces identifiants comme critères de classification de l'image, les résultats ont été exprimés, sous forme cartographique, en termes de potentialités et de contraintes. Ainsi par exemple, dans les sols aptes à la mise en culture, l'identifiant "texture fine à moyenne" traduit une potentialité tandis que des identifiants tels la croûte calcaire superficielle, le sable grossier ou la salinité, apparaissent comme des contraintes. La légende classe enfin les unités qui en résultent selon une hiérarchie de valeurs conforme au thème d'exploitation.

Définition des identifiants

En milieu aride, on peut considérer que les paramètres fondamentaux sont étroitement associés au bilan hydrique des sols (texture, structure, profondeur...). Mais, ces caractères n'étant pas directement visibles sur l'image, le problème général de la relation entre le descripteur perceptible et les caractéristiques édaphiques recherchées se pose.

Dans notre cas particulier, la proportion de roches affleurantes, de pierres, de cailloux, de sable et d'éléments fins en surface, est indicatrice de la réserve en eau et par conséquent de leur aptitude à générer une phytomasse car l'abondance d'éléments grossiers, tous calibres confondus, signifie qu'il y a moins de terre fine, propice à la rétention de l'eau. Les unités morpho-pédologiques caractérisées par l'accumulation offrent une végétation plus vigoureuse et plus dense, ce qui se vérifie également au niveau des micro-reliefs : une plante steppique plus vigoureuse que ses voisines évolue toujours dans une situation favorable au piégeage des éléments fins d'origine hydrique ou éolienne.

Partant de ce type d'analyse, il est possible de réaliser sur l'image une partition en quatre niveaux allant de la roche affleurante au sol à texture fine, en passant par les étendues plus ou moins pierreuses et les étendues plus ou moins sableuses. Chacun de ces niveaux peut lui-même faire l'objet d'un découpage selon des seuils définis en fonction de nos propres observations et d'indications fournies par les hommes de terrain :

- dans l'identifiant "roche affleurante" peuvent ainsi être distinguées les surfaces nues décapées par l'érosion, sans élément fins, et les surfaces où subsistent suffisamment de terre fine pour supporter une végétation (zones à *stippa tenacissima* et *juniperus phoenicea* par exemple),

- la "pierrosité de surface", généralement associée à la présence d'une croûte calcaire (ou gypseuse) superficielle fréquente, varie fortement. Trois seuils (< 20 %, 20-50 % et > 50 %), qui paraissent significativement liés aux changements de la végétation, ont été observés sur le terrain et retenus,

- l'identifiant "sable" est subdivisé en trois degrés d'ensablement : les dunes, les accumulations de sable épais (nebkas, micro-dunes) et le sable superficiel peu épais sous forme de voile éolien ou plus ou moins incorporés dans les premiers centimètres de sols ;

- pour les textures moyennes à fines, non sableuses et non pierreuses, il est apparu inutile d'introduire une distinction selon la nature des éléments (limon, argile). Par contre, ces sols ne pouvaient pas être assimilés dans leur totalité à des sols potentiellement bons. Une partition supplémentaire en fonction de l'imperméabilité (eau stagnante sur certaines dépressions) et de la présence de sels a donc été nécessaire ;

- enfin, en zone forestière, la séparation de la végétation et des sols est apparue délicate sans présenter d'intérêt particulier pour cet inventaire ; étant donné le statut particulier des zones forestières. Une classe d'exclusion, assimilée à la végétation forestière, a donc été rajoutée.

Regroupement des unités édaphiques en classes de potentialités

Douze types d'unités édaphiques ont pu ainsi être identifiés (planche 2) pour répondre à l'objectif poursuivi par

l'H.C.D.S., d'exprimer l'aptitude des sols à générer une phytomasse. Elles sont regroupées sur la carte et dans la légende en quatre classes de potentialités croissantes (les sols pratiquement stériles, les sols à faible potentiel biologique, les sols squelettiques à potentiel moyen, les sols potentiellement plus fertiles) et une cinquième traitant le cas particulier des sols forestiers. Les critères de regroupement sont fondés sur des observations de la végétation, des recommandations recueillies sur le terrain et des travaux déjà établis sur un milieu identique (H.C.D.S., 1989 ; Le Houerou 1975 et Le Houerou, Claudin, Haywood 1975 ; Pouget, 1980 ; Floret, Le Floch, Pontanier, Romane, 1978). Chaque composant de ces classes a été extrait de l'image à travers un identifiant (valable pour le secteur considéré), selon la logique exprimée dans le tableau 6.

Les unités édaphiques ont été extraites en mode supervisé à partir de plusieurs combinaisons d'images. La sélection du

meilleur résultat s'est opérée en fonction de deux critères :

- la matrice de confusions calculée sur les pixels échantillonnés,
- le contrôle de terrain dans le fichier d'observations localisées.

Discussion des résultats

Le tableau 6 révèle que, globalement dans l'exemple étudié, les identifiants choisis se sont avérés opérants et que la plupart des unités de sol ont été mieux individualisées que dans les classifications supervisées ou non supervisées d'entités pédologiques. Le niveau d'identification se situe entre 70 et 100 %, à l'exception des sols dominés par la roche affleurante des djebels et des sols peu profonds à forte pierrosité de surface, pour lesquels les différents traitements testés n'ont pas dépassé 59 % de reconnaissance.

Comme pour les classifications supervisées et non supervisées, l'exploitation de l'enquête de terrain permet, dans l'approche par identifiants, de retrouver une logique dans l'af-

Tableau 6 - Évaluation de la classification des sols en fonction de leur potentiel biologique (%) de pixels bien classés

Table 6 - Evaluation of the soil classification according to their biological potential (% well classified pixels)

Unités Pédologiques :	identifiants utilisés :	TM 1,2,3	TM 2,3,4	TM 1,3,5	SPOT
1 - Potentiel très faible :					
1.1 dépressions hyper-salées	salinité	99	99	99	94
1.2 texture fine et mauvais drainage	humidité	73	84	89	70
1.3 sable dunaire	dunes	98	84	97	100
1.4 roche affleurante	roche + pierrosité	62	72	71	66
2 - Potentiel faible :					
2.1 roche dure compacte en altitude	végétation + roche	54	43	46	59
2.2 pierrosité > 50 % en surface	pierrosité	64	45	75	65
2.3 sable éolien épais non dunaire	sable + couleur	84	75	69	91
3 - Potentiel moyen :					
3.1 pierrosité 20 - 50 %	pierrosité	41	38	58	45
3.2 sable en surface + pierrosité variable	sable + pierrosité + couleur	79	70	88	59
4 - Potentiel élevé :					
4.1 pierrosité < 20 %	pierrosité + texture	70	84	80	72
4.2 profonds pierrosité très faible	sable + texture fine	78	76	87	7
5 - Cas particulier :					
sols humifères forestiers	végétation	92	95	85	94

fectation des pixels mal classés. Ils semblent principalement liés à la présence simultanée de plusieurs identifiants dans une même unité. Ainsi des sols de pierrosité moyenne sont attribués à la classe de pierrosité plus faible s'ils présentent une pellicule de battance, et à la classe de pierrosité plus forte s'ils sont couverts par une végétation chamaephyte dense.

Inversement, elle a fait ressortir qu'il existe des identifiants inutiles sur le plan agronomique mais qui marquent très fortement l'image :

- La couleur des sables rubéfiés des unités géomorphologiques du quaternaire continental n'a pas été utilisée comme identifiant de potentialité des sols. Elle est cependant, sur l'image, un facteur puissant de regroupement, supérieur à la pierrosité moyenne et faible. Pour en tenir compte, il a fallu procéder à une partition en fonction de la pierrosité au sein d'une grande unité "sables rouges", toutes autres catégories de sols confondues.

- De même, en présence de limons secs, lorsque la pierrosité est faible à nulle, il semble que c'est la clarté des sols qui est prise en considération. Ainsi certains affleurements de roches calcaires (ex : Djebel Guédid) sont assimilés à des sols limoneux battants des dayas, ou à des glacis d'accumulation limoneux.

Rappelons que la végétation de certains reboisements masque les autres identifiants, sauf s'il existe une relation directe entre le sol et le reboisement.

En pratique, pour parvenir à la carte des potentialités édaphiques de la planche 2, les problèmes de conflits entre identifiants significatifs et identifiants parasites ont pu être assez facilement surmontés, par masquages successifs et croisements de classifications.

SYNTHÈSE : COMPLÉMENTARITÉ DES DIFFÉRENTES MÉTHODES DE TRAITEMENT DE L'IMAGE ET DE L'OBSERVATION SUR LE TERRAIN

La cartographie avec des identifiants donne donc de meilleurs résultats que les autres méthodes d'exploitation des données de télédétection. Il est important de noter dans l'exemple étudié qu'elle a permis en outre de palier à l'impossibilité matérielle de réaliser une lourde campagne de mesures radiométriques sur le terrain et d'analyses en laboratoires, qui auraient été indispensables autrement.

Mais il faut noter également qu'elle nécessite l'utilisation des classifications supervisées et non supervisées, tant pour dresser l'inventaire des paramètres de surface influant sur l'image (les identifiants n'ont pu être définis que grâce à des classifications), que pour évaluer les résultats obtenus. La superposition de la carte des unités édaphiques à la carte des sols ou à la classification supervisée pédologique d'une part, à

la classification (non supervisée) en unités de paysages d'autre part, apporte des éléments d'appréciation qui s'appliquent sur la totalité du territoire traité.

La logique d'évaluation des résultats, qui consiste à superposer la carte pédologique au traitement pour mettre en évidence les points d'accords et de désaccords afin d'obtenir à la fois une évaluation chiffrée et une représentation spatiale des résultats (Naert 1994), est complétée ici par la relativisation des coïncidences et la matérialisation dans l'espace des correspondances logiques, plausibles ou douteuses. Le tableau 7 donne un exemple de grilles de correspondances simples qui peuvent être établies entre les trois modes de traitement des données, et qui facilitent l'organisation de l'indispensable contrôle in situ.

Cette démarche conduit à ne pas rejeter en bloc les situations de désaccord. La planche 1 en donne un exemple présentant deux situations extrêmes du travail de contrôle : celle de l'unité homogène et celle de l'unité complexe (planche 1a). Le croisement des classifications supervisées avec les unités édaphiques (planche 1b) permet de localiser les confusions et d'en évaluer la gravité : la présence au sein de l'unité calcimagnésique xérique de sols peu évolués d'apport alluvial modaux est inexplicable, alors que celle des siérozems ou des rendzines peut se justifier par des propriétés de surface comparables (croûtes calcaires, blocs,...).

Dans la mesure où ces sols d'apport alluvial sont assimilables à des sols fertiles (>70cm) identifiés sur la carte des unités édaphiques (planche 1d), mais incompatibles avec l'unité de paysage "formes polygéniques à matériaux très grossiers" (planche 1c), une explication sur le terrain s'impose ; elle a révélé qu'il s'agissait de colluvions intercollinaires.

Le même raisonnement appliqué à la totalité du site de référence, pour chaque unité cartographique, conforte l'intérêt général de cette classification en unités édaphiques, mais il permet aussi de mettre en évidence et de corriger des erreurs : les affleurements calcaires de la face sud de Djebel Testara, par exemple, étaient confondus avec des sols limoneux profonds des dayas, probablement à cause de leur clarté,...

La cartographie d'identifiants de propriétés édaphiques nécessite donc l'utilisation des autres méthodes de traitement et de nombreuses références au terrain. Elle est donc d'autant plus efficace que le traitement des images est effectué de façon directe et interactive, sur le terrain.

Tableau 7 - Correspondances des unités issues des différents traitements (grille valable pour le site du Djebel Oust)

Table 7 - Correspondances between edaphic and other units (grid worth for the Djebel Oust site)

Unités Édaphiques						
	Sols très dégradés	Sols dégradés	Sols dégradés	Sols peu profonds	Sols plus profonds	Sols fores-
tiers	nus sur. roche calc gréuseux décapés par l'érosion	des djebels à matorral	pierrosité > 50 %	caillouteux pierrosité 20-50 %	texture moyenne à fine	
Unités pédologiques						
Sols peu évolués d'apport alluvial	-	-	-	0	+	-
Rendzines modales	-	0	0	0	-	+
Calcimagnésiques xériques	-	+	+	+	+	0
Siérozems	-	0	+	+	+	0
Minéraux bruts d'érosion	+	+	+	0	0	+
Unités de paysages						
Glacis anciens à alfa	+	+	+	0	-	-
Formes polygéniques pierreuses	+	+	+	0	-	-
Djebels rocheux à matorral	0	+	+	0	-	0

Coïncidence :

+ : logique

0 : possible

- : douteuse

CONCLUSION

Cette expérience, menée sur le site de référence algérien de Djelfa, confirme donc que, même dans les régions pré-désertiques, peu perturbées par le tapis végétal, les méthodes habituelles de télé-détection appliquées à la cartographie pédologique donnent des résultats qui diffèrent selon les sols.

Globalement, pour obtenir des résultats immédiats, le mode non supervisé est surtout intéressant pour la reconnaissance d'unités de paysage. Son efficacité est liée à une connaissance minimale du terrain d'autant plus importante que l'unité de paysage concernée est complexe, à l'échelle considérée.

Le mode supervisé à partir de références pédologiques révèle une forte discordance entre la logique de la classification d'images et celle de la classification pédologique. Les corrélations éventuelles se font donc au cas par cas, selon les sols et indépendamment de leur niveau respectif dans les deux classifications. Même si l'on peut considérer que les résultats obtenus dans cette expérience peuvent être améliorés par une meilleure exploitation de la résolution

radiométrique et des signatures spectrales ou par une plus grande précision des échantillons, il demeure que c'est, selon la situation, le groupe, le sous-groupe ou un niveau plus fin qui est le mieux discriminé.

La confrontation au terrain des résultats de différents traitements obtenus à partir des images disponibles a montré l'existence de paramètres de surface très influents sur la composition du signal radiométrique, paramètres généralement corrélés à des propriétés édaphiques intéressant les gestionnaires des ressources naturelles. Utilisés comme identifiants, dans des classifications supervisées, ces paramètres sont efficaces pour réaliser des zonages directs de l'espace, qui exigeraient par une approche traditionnelle d'être composés à partir d'un certain nombre de cartes factorielles coûteuses et longues à obtenir.

Réintégrée dans le référentiel d'origine, cette interprétation cartographique permet également de répondre à des questions ponctuelles que se pose le gestionnaire à un

8 - Il a été possible, par exemple, d'évaluer avec les ingénieurs de l'HCDS, à 14 000 ha pour 1989, la superficie des cultures céréalières localisées sur les sols squelettiques très exposés à l'érosion

moment déterminé⁸.

La méthode appliquée ici au cas de cartes de potentialités, établies selon des normes correspondant à des besoins du Haut Commissariat Algérien de Développement de la Steppe pour la gestion des espaces steppiques dans la région de Djelfa, est applicable à d'autres zones. Elle est également envisageable, par exemple, pour donner une première réponse à des problèmes urgents comme les cartes de "sensibilité à la désertification" ou pour la prospection de sites agricoles en zone désertique⁹; mais cela suppose une nouvelle définition des normes de potentialités en fonction du thème et du lieu.

Elle n'identifie cependant pas toutes les classes qui seraient nécessaires pour un inventaire exhaustif des potentialités agromonomiques.

Pour répondre plus complètement ou plus précisément à des besoins moins urgents, l'extraction d'identifiants de propriétés édaphiques peut être considéré comme une ébauche cartographique qu'il est possible d'affiner et d'améliorer en modulant notamment le rôle des identifiants en fonction des conditions locales.

Ainsi, pour caractériser, dans le milieu steppique la productivité de sols, qui, à réserve utile équivalente, varie en fonction des gradients climatiques sensibles, l'altitude est un paramètre important, de même que les conditions de circulation de l'eau en surface et en profondeur (pente, rugosité, perméabilité). A ce stade, il devient nécessaire de compléter le référentiel radiométrique initial :

- soit en utilisant, parmi les paramètres de partition du milieu, des données provenant de l'image, indépendantes du sol (dérivées d'un modèle numérique de terrain par exemple : pente, exposition, altitude, forme,...) ou des données inexploitées du référentiel (dynamique temporelle ou spatiale du signal,...),

- soit en introduisant des données cartographiques exogènes non perceptibles directement par l'image et obtenues séparément (la profondeur du sol par exemple).

A longue échéance enfin, dans le cadre d'une exploitation plus universelle, sur un domaine plus vaste ou pour un inventaire à caractère systématique (carte pédologique de l'Algérie par exemple), l'approche précédente offre au pédologue un outil de terrain susceptible d'être complété selon des critères pédologiques.

En produisant une ébauche cartographique qui tient à la fois compte du milieu et de la composition de l'image, cette approche facilite notamment l'introduction dans la légende de paramètres sur l'utilisation du sol et sur son environnement, paramètres utiles pour une réflexion approfondie sur la classification des sols en régions arides.

9 - Projet algérien en cours dont l'Agence Nationale Algérienne des Ressources Hydriques nous a exprimé l'intérêt.

BIBLIOGRAPHIE

- Bendali F., El Hamroui A., 1986 - Caractéristiques physico-chimiques des sols de déflation et d'accumulation. Séminaire IRAT, Tunis 24-29 novembre.
- Courault D., 1989 - Étude de la dégradation des états de surface du sol par télédétection. Revue Sols n°17 INA Paris Grignon.
- Escadafal R., 1989 - Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection. Applications : exemple de la région de Tataouine (Tunisie). Thèse, ORSTOM, Paris.
- Escadafal R., Pouget M., 1986 - Luminance spectrale et caractères de la surface des sols en région méditerranéenne (Sud Tunisie). ITC journal, n°1 p. 19-23.
- Floret C., Le Floch E., Pontanier R., Romane F., 1978 - Modèle écologique régional en vue de la planification et de l'aménagement agro-pastoral, application à la région de Zougrata. Ministère de l'Agriculture, Tunisie/PNUD.
- Foin P., 1987 - Cartographie topographique et thématique. Paradigme, Caen
- Girard M.C. et Girard C.M., 1989 - Télédétection appliquée -Zones tempérées et intertropicales. Masson, Paris.
- Haut Commissariat Au Développement de la Steppe (H.C.D.S.), 1989 - Étude technique de l'unité pastorale de Deldoul. Doc interne, 25 p, 7 cartes H.C.D.S. Djelfa (Algérie).
- King C., 1985 - Étude des sols et des formations superficielles par télédétection. Thèse, INA, Paris Grignon.
- Le Houerou H.N., 1975 - Problèmes et potentialités des terres arides de l'Afrique du Nord. Options Méditerranéennes n°26, p. 17-36.
- Le Houerou H. N., Claudin J., et Haywood M., 1975 - Étude phytoécologique du Hodna. FAO, UNIP/SF ALG. 9.
- Le Houerou H.N., Claudin J. et Pouget M., 1977 - Étude bioclimatique des steppes algériennes (cartes à 1/1.000.000). Bull. Soc. Hist. Nat d'Afr. du N. ; n° 68.
- Naert B., 1992 - Concept de référentiel cartographique - télédétection dynamique du sol et de la végétation en milieu aride - Application à Errachidia (Maroc). VIII° session de l'Université Euro-Arabe Itinérante Ghardaïa (Algérie).
- Naert B., 1992 - Le concept de référentiel cartographique, Méthodologie (Millau-France) et application (Errachidia-Maroc). Rapport de synthèse contrat d'étude CCE-GUTLAR N°946/88/65. Montpellier.
- Naert B., 1994 - Cartographie des sols par télédétection : une méthode adaptée aux milieux méditerranéens et arides. Actes du Symposium de l'Association Internationale de Cartographie. Tunis Bull. C F C142-143 p.193-205
- Naert B., 1995 - Cartographie, télédétection, référentiel, pédologie et changement d'échelle. Bulletin de la Société française de Photogrammétrie et de télédétection N° 140 p 23-25
- Naert B., 1995 - Le Référentiel, un outil pour concevoir et évaluer sur le terrain les modèles cartographiques. 1^{er} Colloque International AAAF Imagerie Scientifique et traitement d'images Cannes 4-6 avril 1995
- Pouget M., 1971 - Étude agro-pédologique du bassin du Zahrez Gharbi (feuille 1/100 000 Rocher de Sel). Secrétariat d'Etat à l'Hydraulique. Alger.
- Pouget M., 1977 - Cartographie des zones arides, aptitudes du milieu à la mise en valeur : région, de Messaad Ain El Ibel. DEMRH/ORSTOM.
- Pouget M., 1980 - Les relations sol-végétation dans les Steppes Sud - Algéroises. O.R.S.T.O.M., Bondy.