

CARTOGRAPHIE DES SOLS AIDÉE PAR TÉLÉDÉTECTION UNE MÉTHODE ADAPTÉE AUX MILIEUX MÉDITERRANÉENS ET ARIDES

Par B. NAERT - Institut National de la Recherche Agronomique - (Montpellier - France)

RÉSUMÉ

L'afflux de sources d'information et l'évolution rapide des moyens de les exploiter conduit à une réflexion globale sur les méthodes de prospection en cartographie des sols. La synthèse des travaux réalisés sur ce thème depuis 1972 dans la cellule de télédétection de l'INRA à Montpellier et plus particulièrement depuis 1990 avec le projet CCE-GUTLAR sur la télédétection de la dynamique de la désertification au nord du Sahara, fait ressortir que la délimitation de l'unité élémentaire et la caractérisation de ses hétérogénéités internes peuvent être sensiblement améliorées sur le terrain, par l'exploitation directe et le croisement des données disponibles.

La cartographie des sols est un besoin de plus en plus ressenti sur le pourtour de la Méditerranée, tant pour contribuer à une meilleure gestion des transferts de population et de la concentration d'activités qui en résultent que pour rationaliser la lutte contre la désertification des zones défavorisées. Avec l'essor actuel de la télédétection, la cartographie thématique subit un renouveau dans ses techniques d'investigation. Parallèlement, le mode d'expression des résultats change avec le développement de l'assistance par ordinateur, la capacité d'exploiter les données de nature ou d'origine variées s'étend considérablement avec l'accessibilité croissante aux banques d'informations géographiques...

Il est donc intéressant d'évaluer l'impact de cette évolution technique sur le thème complexe de la cartographie des sols, parce qu'elle est récente et inachevée, et que des incidences immédiates, sur le plan de l'économie des moyens ou de l'amélioration de la qualité du résultat, sont attendues de l'évolution des techniques. Mais il est surtout intéressant de considérer l'apport de la technologie sur l'évolution des concepts cartographiques ou thématiques qui ne sont pas encore fixés: le sol en effet, est diversement perçu par ceux qu'il intéresse, et sa cartographie rend compte selon le cas: d'un certain nombre de propriétés, d'un état dans un processus pédogénétique connu et répertorié, ou d'un stade dans un fonctionnement logique lié à la conjonction de facteurs de l'environnement.

◆ ACQUIS - MÉTHODOLOGIE

I LA CARTOGRAPHIE DES SOLS

Parmi les cartes pédologiques se distinguent: celles qui prétendent dresser l'inventaire systématique des propriétés des sols à l'échelle nationale ou internationale, indépendamment d'un intérêt d'exploitation immédiat, et celles qui ont pour objectif d'effectuer, sur la base de critères pédologiques, un zonage utilitaire s'appliquant à un territoire généralement plus restreint.

Si la dénomination de «carte de sols» et les techniques de découpage de l'espace en unités cartographiques sont voisines, la signification et la représentation finale des cartes ne sont pas identiques:

- la définition des propriétés du contenu de l'unité dans la légende et la notice n'obéit pas à une règle générale: les classifications pédologiques diffèrent selon les pays et selon l'extension du territoire auxquels elle prétendent s'appliquer. Les critères de discrimination des unités cartographiques varient en fonction de paramètres techniques (concepts pédologiques, échelle,...), ou locaux (contexte économique, pression démographique, technologie d'exploitation... par exemple) etc...

- les cartes se différencient également, mais pour des raisons techniques, par la façon de tracer les limites: les méthodes d'inventaires basées sur un quadrillage systématique de profils ou de sondages, et une intrapolation (fig. 2a), s'avèrent trop lentes et généralement bien trop onéreuses pour répondre efficacement aux besoins immédiats; et en particulier à ceux des régions jugées peu productives. Aussi, l'évolution des techniques de cartographie tend: soit à réduire le nombre de sondages (sous-échantillonnage justifié par l'exploitation de transects ou l'utilisation d'identifiants), soit à substituer un raisonnement logique à l'observation de terrain. Dans ce dernier cas, il s'agit d'établir des relations entre le sol et son environnement (fig. 2b) et de développer des «modèles» de l'espace. Ces modèles, en expliquant le fonctionnement et les propriétés des sols, permettent d'extrapoler «au mieux» un minimum

d'observations effectuées sur le terrain. Ils utilisent des données cartographiques disponibles dans d'autres disciplines que la pédologie ou obtenues par d'autres voies que la prospection systématique.

I LA TÉLÉDÉTECTION

Les premières recherches faites en France pour introduire la télédétection comme outil dans la carte pédologique ont trouvé dans cette technique, une source d'information révolutionnaire. Elle permettait en effet, pour un faible coût, de faciliter l'«observation» et d'alimenter en données extrêmement denses et répétitives, sans être perturbantes pour le milieu, un mode de prospection systématique par sondage qui ne paraissait plus réaliste par les approches traditionnelles (fig. 3a). Elle permettait également de faciliter le «raisonnement» en fournissant, pour constituer les modèles pédologiques du milieu, des informations facilement déductibles: relief, détection des changements, inertie thermique,...

Plus précisément, les tentatives d'exploitation qui ont été effectuées au laboratoire de 1972 à 1985, sur les données accessibles, ont permis de conclure:

- qu'il est possible d'exploiter directement des images brutes ou améliorées (ACP, changement d'axes, amélioration de dynamique,...) dans une approche traditionnelle en cartographie pédologique par photo-interprétation avant et pendant la prospection.

- qu'il est intéressant de produire des images dérivés (MNT, indices de végétation, images classées...) susceptibles d'aider le prospecteur à réaliser sa carte. Les ajustements nécessaires pour que les traitements soient efficaces se font au prix d'itérations entre le terrain et le laboratoire qui sont d'autant moins nombreuses que les relations entre les propriétés du sol et son environnement naturel sont fortes, qu'elles se traduisent sur des «identifiants» de surface, comme la végétation, et que ceux-ci sont «couvrants», c'est à dire qu'ils occupent une surface relative dominante par rapport aux éléments non caractéristiques («bruits»).

- que si cette technique peut permettre d'améliorer la qualité des levés et d'accélérer la prospection de terrain, son application trop exclusive conduit: soit à établir des cartes de terroirs (éco-morpho-pédo-génélogiques) dans lesquelles les caractères purement pédologiques s'estompent par rapport à ceux du milieu environnant, soit au contraire à isoler le sol de son environnement pour en modéliser quelques propriétés dans des situations exceptionnelles, difficilement extrapolables.

- et qu'en tout état de causes, la télédétection reste limitée en pédologie à l'utilisation d'informations liées, directement ou indirectement, au comportement spectral des objets perceptibles en surface, à leur évolution dans le temps et à leurs inter-relations dans l'espace.

II LES SYSTÈMES D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE

Les multiples possibilités de perception du sol condui-

sent à multiplier, sur un même site, des «cartes pédologiques» établies à des échelles ou selon des critères d'exploitation différents. La lourdeur des travaux de prospection et la complexité même de l'objet cartographié conduisent le pédologue cartographe à rechercher, dans le milieu extérieur, des objets «identifiants» qui peuvent être associés à des mécanismes ou à des caractéristiques des sols: plante représentative, position topographique particulière, affleurement,... et à faire évoluer la notion de sol vers une perception dynamique pour pouvoir modéliser l'espace en fonction de facteurs observables de la pédogénèse. Il est conduit dans ce cas à effectuer des opérations qui font double emploi avec des prospections réalisées pour d'autres thèmes que le sol.

Aussi, l'approche par stratification de cartes (fig. 3b) s'impose depuis la fin des années 70, en particulier en France, aux Etats Unis et au Canada où elle s'y est généralisée avec le développement des «Systèmes d'Information Géographiques» qui sont maintenant des outils accessibles partout. Avec cette logique de gestion et le développement récent des techniques informatiques, la cartographie de terrain peut s'appuyer sur l'exploitation simultanée, par des procédés automatisés, de cartes et de données complémentaires plus ou moins liées aux facteurs de la pédogénèse.

A noter cependant, que les logiques de gestion de l'information qui se côtoient dans les S.I.G. ne sont pas neutres: la logique vectorielle favorise le tracé du contour de l'unité cartographique au détriment des nuances internes du contenu, alors que la logique matricielle rend compte de l'hétérogénéité interne de l'unité dans un contour dont la précision reste liée à la forme et à la dimension du pixel.

III LE RÉFÉRENTIEL

Ce concept résulte de la conjonction:

- d'un constat d'ordre scientifique: les cartes qui sont établies par traitement d'images ou par prospection traditionnelle, sont entachées d'erreurs importantes (30 à 40%) qu'il importe de réduire. Les causes de ces erreurs étant différentes, la confrontation des résultats et l'utilisation à bon escient de l'une et/ou de l'autre des techniques est une hypothèse de travail envisageable pour y parvenir. L'étude des variations de cette marge d'erreur en fonction des différentes approches et des conditions d'utilisation des techniques correspondantes devrait permettre de définir ou d'améliorer les règles d'exploitation,

- du besoin technique de réaliser simultanément une cartographie sur des bases «pédogénétiques» et le découpage de l'espace en zones répondant à des critères d'exploitation des sols,

Sa mise en œuvre a bénéficié d'une circonstance exceptionnelle: le Projet GCE-GUTLAR sur la «télédétection de la dynamique de la désertification au Nord du Sahara». Il a permis de collationner des données de télédétection et de cartographie traditionnelle sur quelques sites privilégiés; puis d'engager, de façon complémentaire et comparative, en collaboration

FIG 1: LE SOL

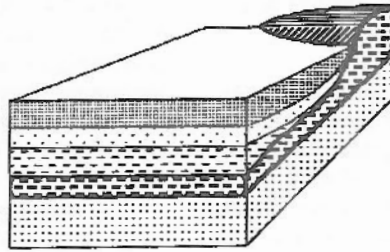
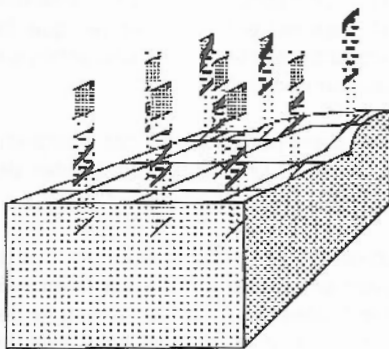
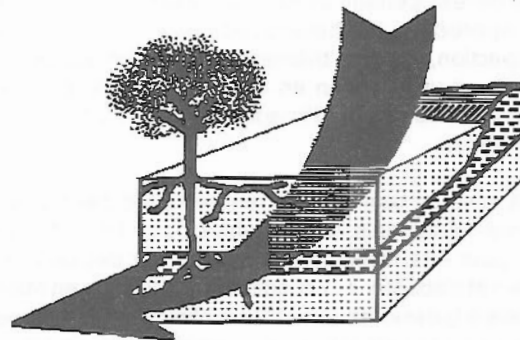


FIG 2: SA CARTOGRAPHIE CONVENTIONNELLE

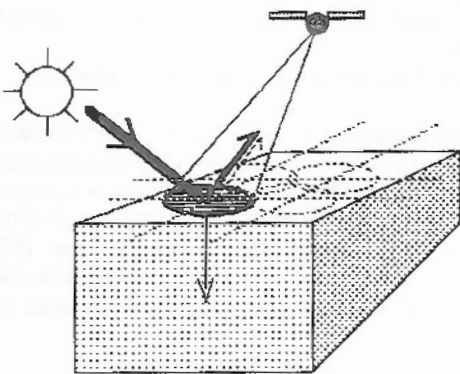


a: PAR OBSERVATION

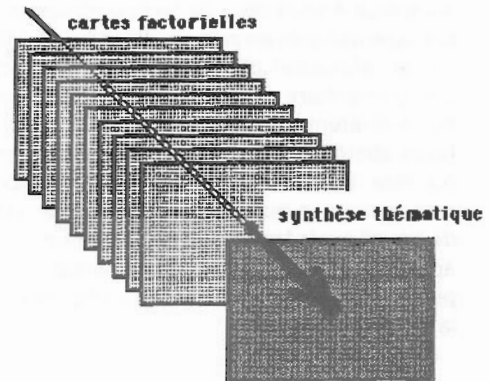


b: PAR MODELISATION

FIG 3: LA CARTOGRAPHIE AUTOMATIQUE

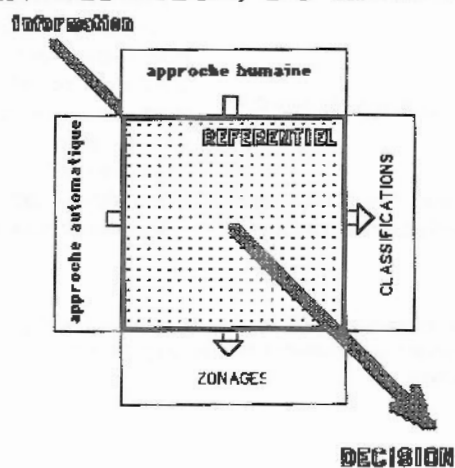


a: PAR TELEDETECTION



b: PAR SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE

FIG 4: LE CONCEPT (INTEGRATEUR) DU REFERENTIEL



avec des partenaires ayant suivi des itinéraires professionnels fondamentalement différents, des travaux d'investigation à ERRACHIDIA au Maroc, DJELFA en Algérie, et MILLAU en France.

Au sein de ce projet, le concept de référentiel (fig. 4) a donc été élaboré pour confronter et exploiter, sans a priori, les différentes approches cartographiques qu'il est possible de réaliser en un lieu. L'objectif était, dans le cadre de problèmes liés à la surveillance de la désertification, de sélectionner en fonction de l'application recherchée ou des conditions particulières de milieu, la technique ou la combinaison de techniques qui s'avère la plus efficiente pour y répondre.

Le développement du concept, destiné à confronter les approches automatiques aux techniques de prospection, sur des thèmes d'application variés, est basée sur une gestion en SIG matriciel: de données localisées, de cartes, d'images ou de produits dérivés de MNT.

Sa mise en œuvre a été réalisée avec des moyens rudimentaires, mais transportables, de traitement d'images, pour être facilement transférés sur des outils de terrain et s'adapter aux conditions d'utilisation en milieu soumis à la désertification. Les techniques nécessaires pour y parvenir ont été mises au point et expérimentées sur la feuille 1/100.000 de MILLAU en France puis appliquées au Maroc à ERRACHIDIA et en Algérie à DJELFA.

Nous nous proposons de relater ici les conclusions actuelles des travaux portant sur l'exploitation d'un des thèmes envisagés: celui de la cartographie des sols. Il a été étudié sous deux aspects particuliers: l'inventaire primaire des sols en zone pédologiquement inconnue - sur le référentiel d'ERRACHIDIA- et la cartographie complémentaire de secteurs partiellement prospectés - sur le référentiel de DJELFA-.

Nous aborderons également les conséquences qui ont pu être tirées de ces travaux pour proposer au prospecteur un outil destiné à améliorer ses conditions de travail sur le terrain, en exploitant simultanément les approches traditionnelles ou automatiques et en empruntant indifféremment les voies de l'observation et de la modélisation.

◆ INVENTAIRE INITIAL DANS DES ZONES PÉDOLOGIQUEMENT INCONNUES

■ LA CONFRONTATION D'ÉBAUCHES CARTOGRAPHIQUES

Dans une première expérience, destinée à montrer qu'un minimum d'informations étaient facilement acces-

sibles dans les régions peu ou pas cartographiées, l'ensemble de l'image SPOT 38-286 autour d'ERRACHIDIA a été choisie comme zone de référence. Un certain nombre de cartes -dont trois pédologiques- y ont été dressées. Elles ont été levées indépendamment les unes des autres et sans utiliser les images satellites, afin qu'elles puissent servir de référence dans l'évaluation des potentialités de la télédétection.

La comparaison de ces cartes, levées¹ avec des méthodes conventionnelles mais à des échelles différentes par H. ABROU (5)² et M. NOURI (6), ou à la même échelle mais selon des approches totalement différentes par M. NOURI (6) et K. AIT ALHAYANE (44) confirme bien que la perception des sols est différente selon l'échelle et l'approche concernée, et que les différences portent autant sur le contour des unités que sur la définition de leur contenu.

La superposition, deux par deux, de ces interprétations démontre (Carte 1) l'intérêt de confronter des documents traitant d'un même thème pour:

- détecter les accords et s'assurer, par exemple, que les critères d'évaluation du sol par l'utilisateur coïncident avec ceux du planificateur ou préciser la nature des propriétés agronomiques utiles et leurs liens avec les processus pédogénétiques....

- mais surtout mettre en évidence les désaccords afin:
 - d'identifier les secteurs où le tracer des limites doit être remis en cause,
 - associer des interprétations différentes pour permettre une meilleure définition du contenu des unités cartographiques, donc un agrandissement de l'échelle de la carte
 - et localiser les éventuelles erreurs d'interprétation.

Sur un plan pratique, l'usage le plus rudimentaire du concept de référentiel: croisement par superposition d'une interprétation réduite à ses contours (renseignés par un code alpha-numérique), sur une autre, présentée sous forme conventionnelle de carte en couleur (60), s'est avéré être un outil de travail efficace pour faciliter la communication entre les cartographes et avec les utilisateurs.

■ LA PHOTO-INTERPRÉTATION D'IMAGES SATELLITAIRES

Premières observations: L'accès ultérieur, aux documents de télédétection (13 à 43) a provoqué chez les trois expérimentateurs impliqués, l'expression immédiate d'un regret: celui de ne pas avoir disposé des images pour leurs travaux d'inventaire initial. Ils prouvaient ainsi, si besoin en était, l'intérêt des «visualisations» d'images satellitaires comme support planimétrique pour une cartographie traditionnelle.

L'analyse comparée plus approfondie de leurs résultats

1 - puis traduites à la même échelle de représentation (1/100.000), numérisées et gérées en SIG matriciel

2 - les chiffres entre parenthèses renvoient aux numéros des documents publiés dans le référentiel d'ERRACHIDIA qui a été présenté par Poster au séminaire de TUNIS

aux différentes images du référentiel permet de constater que si bon nombre des limites dressées «péniblement» sur le terrain ou au laboratoire apparaissent immédiatement sur les visualisations des documents, toutes les limites ne sont pas représentées et certaines unités ne sont identifiées qu'en partie. Pour une unité formellement reconnue dans la carte et sur l'image, les contours sont parfois très différents.

La perception des unités cartographiques par télédétection varie selon l'image ou le traitement concerné et elle diffère selon l'observateur sur le terrain.

En fait et au même titre que les cartes réalisées selon des normes différentes, les interprétations d'images, qui incluent des informations partielles sur les sols et des «bruits» non pédologiques, sont susceptibles d'apporter des éléments intéressants pour la caractérisation des sols; sans toutefois pouvoir se substituer à la prospection classique. Elles sont utilisables dans une confrontation avec des cartes, ou des ébauches cartographiques, selon une méthode de représentation comparable à la précédente (cartes 2 et 3).

La confrontation systématique, de la vision particulière de chacun des participants à l'ensemble de la collection d'images SPOT et de ses dérivés³, a donc pris une part importante de l'expérience. Elle s'est déroulée en deux phases:

Analyse visuelle systématique: Dans un premier temps, chaque auteur de carte a étudié la superposition, à l'échelle du 1/100.000 et 1/250.000, de son interprétation reportée sur un calque, avec les visualisations sur papier des images les plus classiques (canaux élémentaires, images composites RVB, indices de végétation, indice de brillance, Analyses en Composantes Principales,...) saisies à plusieurs époques. Puis, la comparaison a été étendue à des documents dérivés portant sur la détection de changements (période sèche / période humide à trois ans d'intervalle), sur le pouvoir de résolution, sur la topographie (altitude, orientation, pente, forme,...) et sur la combinaison de ces informations dans quelques «modèles» rudimentaires destinés à privilégier les thèmes de la végétation et du sol.

Tous les participants s'accordent pour constater que les images composites apportent, sur l'ensemble des unités, un maximum d'informations:

- Les images multispectrales après amélioration de la dynamique sont une source d'informations à la fois riche et facile à obtenir pour préparer et aider une cartographie conventionnelle tant pour la prospection de terrain et l'enquête auprès des populations, que pour faciliter la synthèse finale.

- Les modèles composés de l'association de plusieurs types de données peuvent être plus riches d'informations que les images multispectrales, mais leur efficacité dépend du choix des données qui les composent et de leur mode d'association. Les choix les plus performants dépendent de l'échelle, de la nature de l'unité cartographique concernée et de l'expérience de l'interprète. Leur intérêt varie d'une unité de paysage à une autre.

Les documents élémentaires ou dérivés (et en particulier la topographie) ne sont cependant pas sans intérêt. Ils permettent, en particulier pour un travail à grande échelle, d'identifier ou de subdiviser certaines unités mal définies par les documents composites. Cette logique analytique de l'interprétation des images conduit à approfondir plus particulièrement la notion d'«identifiant» du sol et à cartographier les facteurs de la pédogénèse à défaut des sols eux mêmes. Une photo-interprétation systématique de plusieurs documents, suivie par une confrontation des résultats au terrain, sur deux types d'identifiants a permis:

- d'observer, sur les données topographiques obtenues par simulations à différents pouvoirs de résolution (K. AIT-ALHAYANE 1990 et 1993), que les normes d'interprétation devaient varier selon les unités morphologiques, pour obtenir une carte plus expressive sur le terrain ,

- et, de vérifier (exemple du tableau: 1) sur la végétation pérenne (M. NOURI 1993) que:

- les différents documents analysés donnent une information d'intérêt variable selon les unités considérées de la carte,

- leur intérêt est d'autant plus général que le document est synthétique,

- l'imagerie résultant de modèles composites présente un intérêt qui varie beaucoup en fonction des images qui les constituent.

Essais de quantification: Ces observations ont pu être confirmées et détaillées par K. AIT ALHAYANE, qui a appliqué une procédure de notation (Fig: 5) pour évaluer, image par image, dans chaque grande unité morphologique, le niveau d'identification de chacune des unités de la carte. Cette approche, destinée à rendre objective l'évaluation d'une procédure fondamentalement subjective: la photo-interprétation, s'est avérée être un moyen relativement efficace pour sélectionner les images élémentaires des modèles thématiques. Elle a fait apparaître le besoin d'une technique d'évaluation plus fine des différentes images pour choisir les composants de modèles «pédologiques».

Avec la superposition «informatique» des cartes numérisées sur les différentes «images» disponibles, il devenait possible d'apprécier de façon à la fois «visuelle» (pour le terrain) et «quantitative» (mesures de surfaces et caractéristiques des pixels intéressants) des relations qui existent entre les interprétations des cartographes et les données de télédétection. Il était donc possible d'optimiser les modèles.

Pour une approche visuelle sur le terrain, la représentation sur un même support de la superposition des contours des cartes à l'image (carte 3), s'est montrée largement plus efficace, que la superposition de calques pour se repérer, mais surtout pour compter et localiser avec précision les pixels en accord ou en désaccord avec la carte (carte 2).

En conclusion de cette première phase de l'étude, il apparaît que, la télédétection ne se substitue pas à la prospection de terrain. Cependant, dans un milieu dé-

3 - corrigées géométriquement et radiométriquement pour être comparables aux cartes et entre elles

muni de carte des sols, un atlas d'images satellitaires et de produits dérivés bien choisis, exploités en référentiel, est une source d'informations à la fois intéressante et facile à obtenir. Il permet, à partir de facteurs de la pédogénèse directement perceptibles comme la topographie, ou d'identifiants assez proches: couleur, changements saisonniers,... ou de données traitées (Indices, ACP, classifications non supervisées,...) d'obtenir n'importe où, des documents utiles pour interpréter le milieu et en faciliter sa cartographie

Le choix des images et des dérivées les plus intéressantes est facilité par l'introduction dans le référentiel d'ébauches de cartes thématiques. Avec des procédures simples de superposition de documents utilisées avec un outil de repérage par satellite (G.P.S.)⁴, le prospecteur peut facilement disposer d'outils cartographiques particulièrement efficaces pour guider son travail de terrain, l'aider à tracer des limites avec précision ou remettre en cause ses propres interprétations. Pour réaliser une cartographie sur de vastes surfaces, ils peuvent lui permettre d'évaluer l'intérêt d'une image par rapport à un objectif particulier et d'aborder pour un traitement préalable déterminé de données disponibles, la notion de «seuil thématiquement le plus significatif».

◆ COMPLÉMENT CARTOGRAPHIQUE DE ZONES PARTIELLEMENT CONNUES

En cartographie des sols, l'extension à des territoires inconnus d'une cartographie satisfaisante mais n'existant que sur un territoire limité est souvent nécessaire. Ainsi, au nord de DJELFA, il existe sur une partie seulement du site expérimental algérien, une carte pédologique⁵. L'étude comparative visant, sur des données SPOT du 13 mai 1989 et LANDSAT TM des 18 mai et 22 juillet 1989, à évaluer de façon systématique les potentialités des principaux cheminement classiques du traitement d'images a pu y être engagée. Elle a été menée par N. BOULAHOUAT.

Un référentiel a donc été réalisé avec la carte existante, un réseau de 150 points répartis en transects et observés sur le terrain, les images précédemment citées et une sélection d'images composites dérivées comprenant: une combinaison trichrome, un indice de végétation normalisé et un indice de brillance pour SPOT et les combinaisons trichromes 4-2-1, 5-3-1 et 4-3-2 pour les LANDSAT. Ce référentiel, qui s'étend sur le territoire couvert par la scène SPOT 52-280, a été successivement évalué selon deux logiciels:

■ PAR UNE APPROCHE NON SUPERVISÉE

La classification hiérarchique ascendante, appliquée aux images sélectionnées sur un nombre de classes volontairement limité à 15, montre que:

• quelle que soit l'image, le nombre d'unités identifiées reste pratiquement constant, ainsi que leur forme générale, mais leur extension varie. Les mêmes contenus

d'unités semblent donc avoir été sélectionnés, mais leur importance relative dans la classification -donc leur contour- change.

• Les classes identifient des «unités de paysage» par une sélection qui se fait selon des critères radiométriques et non pas exclusivement pédologiques. Elles traduisent, en fonction de leur importance relative dans l'image, des données visibles aussi variées que la couleur du sol nu, la densité de la végétation, ou l'ombre portée de reliefs. Il importe donc de réorganiser la hiérarchie de la classification obtenue par calcul selon une logique liée à la caractérisation des sols.

Dans l'exemple étudié, N. BOULAHOUAT préconise pour y parvenir de conserver le même nombre de classes mais de les redistribuer dans les unités naturelles présentant un intérêt pédologique majeur. D'autres solutions peuvent être envisagées comme: augmenter le nombre de classes et les regrouper sur le terrain selon des critères pédologiques, ou traiter individuellement chaque unité de paysage, de sol,...

L'évaluation comparée, unité de paysage par unité de paysage, de l'efficacité respective des différentes images par rapport aux références de terrain a montré que: quelle que soit l'image, certaines unités (dépressions salées, dunes, forêts anciennes,...) pouvaient être bien, ou assez bien (accumulations alluviales et colluviales), identifiées. Par contre d'autres unités, comme les formations gypso-salines, ne sont nettement visibles que sur certaines images (ici: TM 1-2-3 de juillet) et particulièrement peu perceptibles sur d'autres (SPOT RVB ou TM 2-3-4 de mai); c'est le contraire pour la végétation, ... Les images s'avèrent être particulièrement peu sélectives pour certaines unités comme les sols limono-sableux profonds des dayas et les zones d'accumulation.

Certaines unités, pourtant très proches, comme le cordon dunaire ou le sable grossier bordant ce cordon sont distinguées sans aucune difficulté. Inversement, les images traitées présentent des confusions, qui ne sont pas aléatoires, entre des unités nettement différentes sur le terrain. Ces confusions portent en général sur un nombre limité d'unités et s'expliquent souvent par la présence d'identifiants communs.

En pratique, les classifications non supervisées peuvent être pour le pédologue un outil de dégrossissage et de cartographie intéressant pour certains sols. Les résultats obtenus par cette technique sont sensiblement améliorés par une connaissance minimale antérieure du terrain et la sélection de classes basée sur la reconnaissance d'identifiants associés à des propriétés pédologiques élémentaires plutôt que sur la caractérisation directe d'unités (trop complexes) de sols.

Si dans les meilleurs des cas, les risques d'erreurs peuvent être circonscrits et limités à des associations de sols assez faciles à établir, il n'en demeure pas moins que les résultats de ces classifications doivent toujours être utilisés avec une certaine prudence et un contrôle systématique sur le terrain.

4 - Global Positioning System

5 - Carte Pédologique du Bassin de Sahrez Gharbi à 1/100.000, feuille du Rocher de Sel M. POUGET (1971)

■ APPROCHE SUPERVISÉE SUR LA BASE DES DONNÉES DE LA CARTE

L'approche supervisée a été abordée sur les combinaisons de canaux 1-2-3, 1-3-5 et 2-3-4 de l'image TM du 22 Juillet 1989 en choisissant les parcelles d'apprentissage parmi les unités de sols de la carte. La méthode de classification de BAYES a été appliquée dans tous les cas avec le même seuil de probabilité (rejet) de 0%. L'évaluation des résultats s'est faite en comptabilisant, par rapport à la carte, les pixels bien classés après traitement.

L'efficacité de la classification varie beaucoup d'un groupe à l'autre: les sols minéraux bruts d'apport éolien, vertisols ou rendzines,... sont bien identifiés (70 à 80% d'accord), d'autres sont particulièrement peu perceptibles ($\leq 15\%$): sols hydromorphes peu humifères à gley, sols halomorphes salins,... aucun groupe de sols n'est correctement classé en zone forestière, etc...

La comparaison des résultats obtenus avec un apprentissage effectué au niveau des groupes et au niveau des sous-groupes, montre que la subdivision de quelques unes des classes précédentes affecte l'ensemble des résultats. L'analyse détaillée des résultats et l'exploitation du fichier de références observées sur le terrain confirment le rôle prédominant de critères de surface bien perçus par le satellite: croûte calcaire superficielle, gypse, sable superficiel, texture, pellicule de battance, efflorescences salines,...

L'efficacité de la classification est nettement améliorée si l'apprentissage porte sur ces paramètres physiologiques de surface: $\geq 95\%$ pour le sable dunaire, 80% pour les sables en général, 65 à 80% pour les croûtes calcaires,...

L'usage de la classification supervisée montre une forte variabilité des résultats en fonction des conditions d'application. Dans la télédétection des sols deux notions sont importantes: celle de la relation entre l'unité cartographiée et l'«identifiant perceptible» et celle de seuils significatifs, comme le seuil de «division optimal» des unités pédologiques, ou le seuil de «rejet admissible» dans les traitements,.... Ils sont dans les deux cas, à déterminer en étroite relation avec le terrain.

En conclusion de son travail sur la reconnaissance d'unités cartographiques dans des zones partiellement connues N. BOULAHOUAT estime plus opportun d'exploiter la complémentarité des différentes techniques plutôt que le développement poussé et exclusif de l'une d'entre elles. Il préconise, en outre, pour l'aménagement des milieux mal connus, une méthode originale de cartographie rapide qui consiste à classer les sols en fonction d'identifiants prééminents qui sont corrélés, à la fois au comportement spectral et aux propriétés édaphiques intéressantes pour l'objectif visé. Sur son site expérimental, la plupart des unités de sols définies avec ce protocole ont été correctement individualisées (tableau: 2).

◆ AIDE A LA DÉCISION SUR LE TERRAIN

Les deux expériences précédentes convergent pour montrer qu'il n'y a pas une méthode générale de cartographie des sols applicable à tous les cas de figures et que le prospecteur est de plus en plus amené à jouer, au cas par cas, un rôle d'arbitre entre plusieurs solutions possibles. Il a donc paru important de définir un outil qui permette d'être aussi objectif que possible dans ces décisions.

Au delà de la production de documents de terrain faisant ressortir les accords et désaccords entre interprétations pour faciliter la prospection (carte 4), il a donc été tenté, avec la logique du référentiel, de mettre à profit l'évolution actuelle des technologies des systèmes d'information géographique et de la télédétection pour aider la décision du prospecteur pédologue face aux deux principales difficultés dégagées par l'étude précédente: le choix des données les plus adaptées à la réalisation de modèles significatifs et la détermination des seuils pédologiquement les plus représentatifs.

La recherche a été menée sur les images du référentiel d'ERRACHIDIA, avec la méthode de classification supervisée de BAYES, pour identifier quelques unités de sols intéressant simultanément plusieurs interprètes. La logique, expérimentée par K. AIT ALHAYANE et automatisée par C. FLOURE, consiste à étudier pour une unité de sol choisie sur la carte en fonction d'une variable, l'évolution des accords et des désaccords entre l'image et la référence cartographique.

Pour un couple image - unité cartographique donné, et les quatre variables qui en découlent (fig 6): accord entre l'unité cartographiée et la classe extraite par traitement d'image, désaccords par appartenance exclusive à la carte, ou à la classe de l'image et enfin rejet (secteurs n'appartenant ni à l'unité cartographique ni à l'image traitée), une étude a été menée en fonction des variations possibles du seuil de probabilité (fig 8). Il en est ressorti que la représentation graphique sur les mêmes axes de l'histogramme cumulé des pixels en accord par rapport à la carte et reconnus sur l'image à l'extérieur de l'unité cartographique (fig 9) permettait de définir quelques paramètres: X_M et Y_M , X_i , et Y_i , D et d aptes à aider le pédologue à choisir rationnellement ses images et ses traitements en fonction de ses propres exigences ($i = 60\%$ par exemple).

Avec ces paramètres, l'étude de quelques cas de figures a permis de constater :

- qu'il était possible de définir l'apport relatif des images: ainsi par exemple, la différence entre les XS3 de la saison sèche et de la saison humide du même cycle végétal s'avère particulièrement intéressante tant pour la reconnaissance des sols que pour l'identification de la végétation annuelle,...

- que plusieurs sources d'informations différentes sont nécessaires pour identifier les unités de sols, mais que les associations optimales varient selon les unités pédologiques, etc...

Elle a permis également de voir qu'il est possible d'évaluer (tableau 3) l'apport du prospecteur dans la démarche et de montrer par exemple qu'une caractérisation plus détaillée sur le terrain n'est pas forcément plus efficace pour une classification supervisée, ou que la caractérisation d'unités «édaphiques» par les pasteurs est dans un certain nombre de cas aussi corrélée à l'image que des unités définies par les pédologues,...

En codant les pixels en fonction du seuil de probabilité et en les traduisant sous forme de cartes (fig 7 et carte 5), il a pu être constitué des «ébauches» cartographiques qui facilitent la détermination des seuils significatifs et permettent d'obtenir des documents préparatoires à la prospection de terrain.

CONCLUSION

Les images des satellites des ressources terrestres (SPOT en particulier) et les produits qui en dérivent (MNT, indices, images composites,...) associés aux informations cartographiques existantes ou en cours de lever, s'avèrent être un outil efficace pour accélérer la prospection, améliorer la précision des contours et compléter l'information (changement d'échelle) en cartographie des sols.

En effet, en associant sur de vastes surface toutes les

données spatialisées disponibles, il est possible pour un faible coût et sous une forme inter-active, de disposer d'un minimum d'informations là où la carte pédologique n'existe pas. La gestion ensuite en référentiel des données cartographiques et des images permet de réaliser des cartes de paramètres de surfaces corrélés à leur qualité édaphique, d'étendre des cartes existantes ou d'en améliorer la précision; d'aider enfin à réaliser la carte, selon les critères traditionnels, quand elle n'existe pas. Le référentiel peut intervenir aussi bien pour l'observation ou la modélisation de l'espace pédologique et sa logique matricielle permet d'étudier plus particulièrement l'hétérogénéité du milieu. Utile à différents stades de la prospection, son rôle peut aller selon les cas, du simple support planimétrique renseigné, à l'ébauche cartographique plus ou moins complète selon les milieux et les objectifs poursuivis.

A l'évidence cependant, la cartographie automatique n'est pas en mesure de se substituer au pédologue car son efficacité varie beaucoup selon les milieux et les sols concernés, les données disponibles et les traitements utilisés. Le rôle du pédologue à l'interface entre l'outil et le terrain demeure donc primordial pour juger de l'efficacité des produits disponibles et des seuils représentatifs. L'usage de procédures d'évaluation, telles que celle que nous avons élaborée devrait pouvoir rendre plus objective et rationnelle sa prise de décision; tant pour l'acquisition des données utiles que pour la détermination des seuils significatifs, qui sont devenus les problèmes d'actualité.

PRINCIPALES CONTRIBUTIONS À CETTE SYNTHÈSE

La synthèse précédente a pu être obtenue grâce au programme CCE - GUTLAR sur le thème de «la surveillance de la dynamique de la désertification au nord du Sahara». Elle n'aurait pas pu être réalisée sans l'aide du CIHEAM (IAMM), de l'OSS, du Pôle Régional de Télédétection de Montpellier et de l'ORMVA du Tafilalet; mais surtout sans la participation des différents collaborateurs au projet, dont les principales contributions sont extraites des travaux suivants:

H. ABROU 1991 Analyse à différentes échelles de la dynamique de l'ensablement d'un système agraire et évaluation des effets des actions de lutte (Tafilalet-Maroc) Master of Science CIHEAM -IAM Montpellier Juin.

K. AIT-ALHAYANE 1990 Rapport de stage sur l'utilisation pratique des Modèles Numériques de terrain. doc. transfert de technologie INRA/GUTLAR Montpellier.

K. AIT-ALHAYANE 1992 Une cartographie des espaces pastoraux de la région d'ERRACHIDIA (Maroc). doc. INRA/GUTLAR Montpellier Avril.

K. AIT-ALHAYANE 1993 Géographie des espaces pastoraux en milieu désertiques. Une approche cartographique exploitant les discours des pasteurs et les données de la télédétection dans le Tafilalet (Maroc). thèse de l'Université Paul Valéry Montpellier Décembre.

N. BOULAHOUAT 1993 Etude méthodologique sur la télédétection des sols en milieu aride - Région de Djelfa (Algérie) Rapport d'étude INRA Montpellier Janvier

B. NAERT 1991 Cartographie des composants des parcours arborés aidée par télédétection- application au Causse du Larzac et à ses environs. 4ème Congrès des terres de parcours IV IRC Montpellier 21-16 Avril

B. NAERT et Al. 1991 Télédétection pratique-stage d'initiation. Résumé des interventions 173 p. INRA GUTLAR Montpellier Janvier ISBN N° 2-7380-0384-2 Nov

B. NAERT 1992 Concept de référentiel cartographique - télédétection dynamique du sol et de la végétation en milieu aride. Application à Errachidia (Maroc) actes de la VIII^e session de l'Université Euro-Arabe Itinérante Ghardaïa (Algérie) 4-10 mai

B. NAERT et Ali. 1992 «Télédétection de la dynamique de la désertification au nord du Sahara (Algérie, Maroc, Tunisie)». Le concept de référentiel cartographique Rapport de synthèse sur l'étude de faisabilité du Contrat d'étude CCE - GUTLAR n° 946/88/65 ed INRA-GUTLAR Montpellier Décembre.

B. NAERT 1993 Le référentiel D'ERRACHIDIA (Maroc) Un outil de cartographie dynamique pour l'analyse et la gestion des milieux arides journées d'ARZEU de l'Observatoire du Sahara et du Sahel 17-19 Janvier

B. NAERT et Ali. 1993 référentiel d'ERRACHIDIA (Maroc) Atlas didactique à 1/250.000 Contrat d'étude CCE - GUTLAR n° 946/88/65 ed INRA-GUTLAR Montpellier ISBN N° 2-7380-0503-9 Juin

B. NAERT et Ali. 1993 référentiel de MILLAU (France) Atlas méthodologique à 1/100.000 Contrat d'étude CCE - GUTLAR n° 946/88/65 ed INRA-GUTLAR Montpellier ISBN N° 2-7380-0504-7 Juin

M. NOURI 1993 Contribution de la télédétection à la cartographie des ressources naturelles des espaces arides et sahariens en vue de leur aménagement intégré. Exemple: Référentiel d'ERRACHIDIA-Maroc travaux effectués dans le cadre du Master of Science IAM Montpellier juillet.

K. TOUNSI 1989 Evaluation des interprétation de télédétection - Etude méthodologique du croisement des données cartographiques et satellitaires sur micro-ordinateur DUT CNEARC EITARC.

K. TOUNSI 1990 Cartographie de la végétation par télédétection Evaluation statistique des résultats (Feuille 1/100000 de MILLAU) Mémoire DESS, Université Paul VALÉRY Montpellier

K. TOUNSI 1991 Cartographie de la végétation ligneuse méditerranéenne Etude comparée par des méthodes statistiques et de terrain de la télédétection et de la photo-interprétation. Mémoire DEA, Université Paul VALÉRY Montpellier Octobre.

II- EXEMPLES D'EVALUATIONS GLOBALES

Tableau 1: COMPARAISON VISUELLE DE DIVERS TRAITEMENTS

Extrait de M. NOURI 1993

+++ bien caractérisé (>65%)
 ++ moyennement caractérisé (40 à 65%)
 + peu caractérisé (15 à 40%)
 mal caractérisé (< 15%)

Traitements: Milieux et groupements:	Indice de Brillance	Indice de Végétation	R V B des canaux XS	Dynamique saisonnnière	Altitude
Jun. phoencea	+	+++	+++	++	-
Alfa tena et Roza. offi.	+	++	++	+	-
Hamada scoporc en mélange	++	++	++	+	-
Hamada seoporc dominant	++	++	+	+	-
Fredola aret. en mélange	+	++	+	+	-
Fredola aret. dominant	+	++	++	+	-
Ziziphus patus en mélange	++	++	+++	+	-
Ziziphus patus dominant	++	++	+++	+	-
Aristida punge en mélange	++	++	++	+	-
Aristida punge dominant	+++	+++	+++	+	-
Randa afri. et sals.	+	++	++	+	-
Phoen. duct et Tamarix	++	+++	+++	+++	-
Sols	+	+	++	+	-
Altitudes	-	-	-	-	+++

Tableau 2: POURCENTAGE D'ACCORD IMAGE/UNITÉS DE SOLS CLASSÉS EN FONCTION DES IDENTIFIANTS PRINCIPAUX ET DE LEUR "QUALITÉ ÉDAPHIQUE"

Extrait de N. BOULAHOUAT 1993

UNITÉS DE SOLS	IDENTIFIANT UTILISÉ	TM123	TM234	TM135
1 Potentiel très faible				
1.1 dépressions hyper-salées	effloresc. salines	99	99	99
1.2 texture fine, mauvais drainage	humidité	73	84	89
1.3 sable dunaire	dunes	98	84	97
1.4 roche dure compacte	roche dure+pierrosité	62	72	71
2 potentiel faible				
2.1 roche dure compacte en altitude	végétation+roche dure	54	43	46
2.2 pierrosité >50 % en surface	pierrosité	64	45	75
2.3 sable éolien épais non dunaire	sable	84	75	69
3 Potentiel moyen				
3.1 pierrosité 20 - 50 %	pierrosité	41	38	58
3.2 sable en surface, pierr.variable	sable	79	70	88
4 potentiel meilleur				
4.1 pierrosité < 20 %	pierrosité	70	84	80
4.2 profonds pierrosité faible	sable	78	76	87
5 cas particulier				
sols humifères forestiers	végétation	92	95	85

III- EVALUATION VISUELLE SYSTEMATIQUE

FIG 5: PROCÉDURE DE NOTATION DES PHOTO-INTERPRÉTATIONS

Extrait de K. AIT-ALHAYANE 1993

a: PRINCIPE DE LA FICHE D'EVALUATION

carte (ex: sols) image (ex: ACP)		Unités morphologiques					indices d'évaluation per classes			
							nb	T	moy	min
Unités de la carte										
Indices d'évaluation per unités morpho.	nb									
	T									
	moy									
	min									
	max									

b: BAREME DE NOTATION:

- 5 - très concordant (limites très nettes);
- 4 - concordant (limites assez bien visibles);
- 3 - moyennement concordant (les limites ne sont pas toutes représentées);
- 2 - peu concordant (les limites peuvent être difficilement devinées);
- 1 - discordant.

c: ET UN EXEMPLE D'EXPLOITATION:

nombre d'unités de sols définies par les pasteurs et reconnues sur quelques images:

Note:	2 2 5	3 3 5	4 4 5	5
RVB 15-6-87	21	17	5	2
RVB 17-4-88	21	18	4	1
RVB 24 6-90	15	10	4	2
RVB 06-4-91	20	19	4	2
RVB 06-4-91D	16	12	3	1
ACP / RVB 91	22	20	1	1
IB 87	11	6	2	1
IB 88	17	11	1	1
IB 90	19	12	3	1
IB 91	21	8	3	1
IB 91D	11	6	2	1
IVN 87	13	8	1	0
IVN 88	12	5	1	0
IVN 90	6	7	2	0
IVN 91	8	7	2	0
UNIT VEG	19	13	3	1
DYNAM SAIS	14	13	13	1
ALTITUDES	12	9	2	0
ALTITUDES CLAS.	9	4	0	0
PENTES	10	9	4	1
EXPOSITIONS	12	7	4	0

FIG 6: PRINCIPE DE LA CONFRONTATION

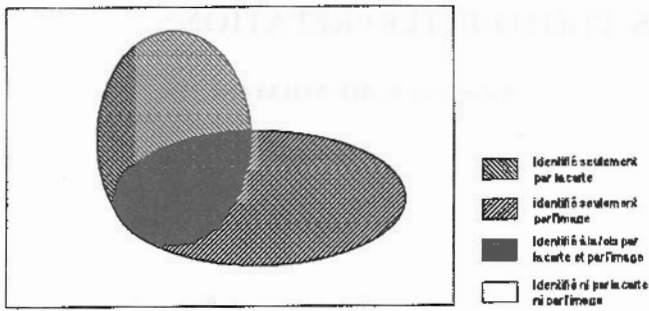


FIG 7: PRINCIPE DU CODAGE DE LA CARTE D'EVALUATION

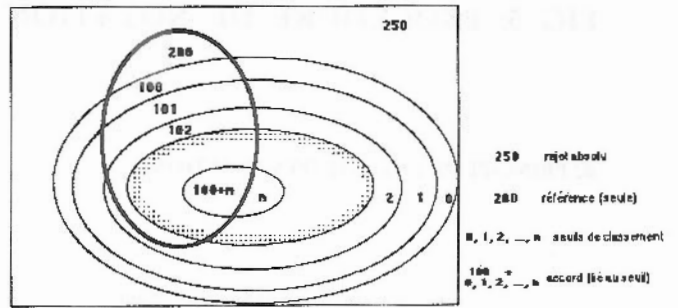


FIG 8: NOTION DE SEUIL ET DE LA REPRESENTATION CARTOGRAPHIQUE

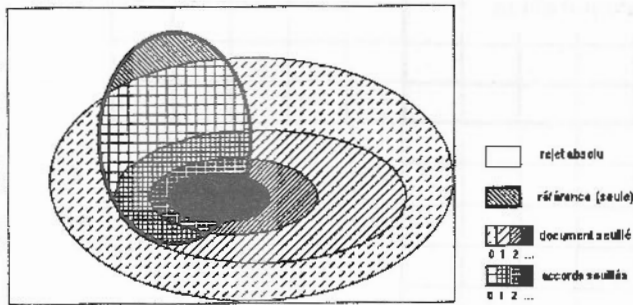


FIG 9: EXPLOITATION GRAPHIQUE

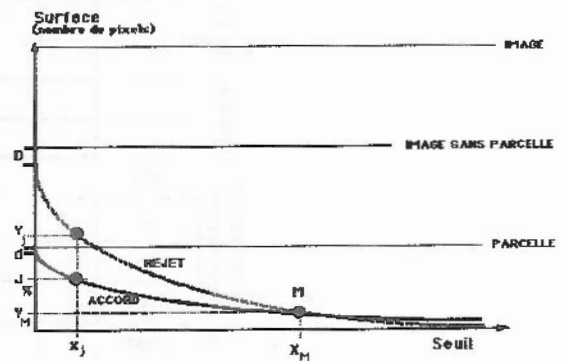


Tableau 3: UN EXEMPLE DE COMPARAISON DE RESULTATS OBTENUS PAR DES EXPERIMENTATEURS DIFFERENTS

Les surfaces Y sont exprimées en pourcentage de l'unité cartographique et D en % de la surface de l'image hors unité cartographique X est la valeur du seuil de probabilité

Unités cartographiques:	D	d	X _M	Y _M	X _{60%}	Y _{60%}	X _{50%}	Y _{50%}
Sols minéraux bruts: Calcaires et dolomies (ABROU)	1,25	0	0,1	97	1,76	16	2,03	14
Régosols (NOURI)	9,68	0	0,17	95	1,84	22	2,06	16
Sols grossiers: Gravières + cailloux (AIT ALHAYANE)	0,22	0	0,48	63	0,6	55	0,8	32
Sables (A)C + Limons sableux ABC (NOURI)	11,81	0	17,17	40	0,84	74	1,03	56
Sables (A)C (NOURI)	13,58	0		0	1,35	318	2,73	220
Limons sableux ABC (NOURI)	19,87	0		0	0,86	98	0,95	77
Sols "fins" (AIT ALHAYANE)	9,07	0	0,78	59	0,75	61	0,95	45
Sols sableux (AIT ALHAYANE)	25,31	0		0	1,06	173	1,23	126
Sols sablo-caillouteux (AIT ALHAYANE)	8,35	0		0	0,71	177	0,81	130
Sols peu évolués: Gréseux et encroûtés (ABROU)	0	0		0	0,51	25	0,6	20
Sols peu évolués: Marno-limoneux encroûtés (ABROU)	0	0		0	0,76	149	0,96	116

V- EVALUATION CARTOGRAPHIQUE

CARTE 1: Confrontation d'interprétations cartographiques (60)

CARTE 2: Comparaison visuelle d'une carte à une image composite (61)

CARTE 3: Comparaison visuelle d'une carte à une interprétation d'image (62)

CARTE 4: Recherche des désaccords (63)

CARTE 5: Détermination du seuil le plus représentatif (64)

appel. les chiffres entre parenthèses renvoient aux numéros des planches complètes publiés dans le référentiel d'ERRACHIDIA qui a été présenté par poster au séminaire de TUNIS et dont ces exemples ont été extraits.

