

MINISTERE DE L'AGRICULTURE

DIRECTION DES RESSOURCES EN EAU ET EN SOL

DIVISION DES SOLS

APPORT DE LA TELEDETECTION SPATIALE A LA CARTOGRAPHIE DES RESSOURCES EN SOLS DE LA REGION DE MEDENINE

(SUD TUNISIEN)

Par : Richard ESCADAFAL, Pédologue à l'O.R.S.T.O.M.
Amor MTIMET, Pédologue Principal à la Division des Sols (D.R.E.S.) Mai 1981

E-S 189

REPUBLIQUE TUNISIENNE
MINISTERE DE L'AGRICULTURE
DIRECTION DES RESSOURCES EN
EAU ET EN SOL

DIVISION DES SOLS

APPORT DE LA TELEDETECTION SPATIALE A LA
CARTOGRAPHIE DES RESSOURCES EN SOLS
DE LA REGION DE MEDENINE

(SUD - TUNISIEN)

E-S 189

Par

Richard ESCADAFAL
Pédologue à l'O.R.S.T.O.M.

Amor MTIMET
Pédologue principal à la Division des Sols
(D.R.E.S.)

MAI 1981

R E S U M E

Ce premier essai d'application de la télédétection à la cartographie des ressources en sols du sud de la Tunisie a montré l'intérêt des agrandissements photographiques transparents combinant les canaux 4, 5 et 7 ("diazos"). Directement superposables sur cartes existantes, ils permettent d'harmoniser les informations éparses et sont indispensables pour les zones non couvertes par les missions aériennes. Les quelques traitements numériques effectués ont révélé la puissance de cette technique sans pour autant aboutir à une carte thématique, la dynamique de l'image étant trop faible et les données de terrain incomplètes et inadaptées.

En effet, nous n'avons pas de données suffisantes sur l'aspect de la surface des sols, dont dépendent fortement les valeurs de réflectance mesurées.

Des propositions sont faites pour développer des techniques de "vérité-terrain" basées sur une méthode originale de description de la surface des sols et pour les utiliser au cours d'une campagne d' "étalonnage".

Mots clés : Télédétection, cartographie des sols au 1/200 000^{ème}, régions arides, Tunisie.

	Pages
RESUME	1
AVANT-PROPOS	3
1 - INTRODUCTION	4
2 - LES DONNEES DE TELEDETECTION DISPONIBLES	6
2-1 Les photographies aériennes	6
2-2 Les données des satellites	8
3 - APPORT DES TRAITEMENTS PHOTOCHEMISTIQUES	9
3-1 Les produits utilisés	9
3-1-1 Les tirages noir et blanc	9
3-1-2 Les compositions colorées	11
3-2 Etude globale de l'image	12
3-3 Etude par zones	14
3-3-1 Observations sur la végétation	15
3-3-2 Elaborations de la carte des unités pédologiques	18
3-4 Télédétection des contraintes agronomiques	22
3-4-1 La pente	22
3-4-2 La nature de l'assise	22
3-4-3 L'épaisseur de la couche meuble	23
3-4-4 La salure	23
3-4-5 La nature et la texture de la couche meuble	23
3-5 Bilan de l'utilisation des traitements photochimiques	24
4 - APPORT DES TRAITEMENTS NUMERIQUES	25
4-1 Caractéristiques de l'enregistrement utilisé	26
4-2 Etude de l'image par canal	26
4-3 Etude des combinaisons de canaux	30
4-3-1 "Signature spatiale" et "serpent"	30
4-3-2 Utilisation de la procédure "Loterie"	32
5 - CONCLUSIONS - PERSPECTIVES	35
BIBLIOGRAPHIE	38

A V A N T - P R O P O S

Ce rapport présente les premiers résultats d'une collaboration entreprise avec le Bureau de Télédétection de l'ORSTOM (Bondy, France) en mars 1980 à l'occasion du stage de R. ESCADAFAL, poursuivie par correspondance avec M. POUGET et renforcée cette année grâce au stage effectué par A. NTIMET.

Cette collaboration a pour objectif de tester les possibilités d'utilisation des techniques de télédétection pour la cartographie des ressources en sols du sud de la Tunisie (Convention DRES-ORSTOM, action de type B).

Nous présentons ici les résultats des essais d'application des traitements photochimiques et numériques à la cartographie au 1/200 000^{ème} de la région de Médenine, et les conclusions et perspectives qui en découlent pour les développements futurs des programmes de cartographie du Sud Tunisien.

1 - INTRODUCTION

L'objectif de ce programme est de tester l'apport de la télédétection sous la forme de différents types de documents radiométriques disponibles (agrandissements photographiques, traitements numériques) à la réalisation des cartes pédologiques du sud de la Tunisie en prenant l'exemple de la carte de ressources en sols dans la région de Médenine.

Les cartes de ressources en sols au 1/200 000^{ème} sont des cartes de synthèse dont l'établissement est en cours sur l'ensemble du territoire tunisien. En effet, les nombreuses études pédologiques existantes ont été réalisées à des échelles et des dates très variées et par différents auteurs ; leur légende n'est donc pas homogène et ces cartes sont difficiles à exploiter par un non pédologue.

Les cartes de ressources en sols sont constituées à partir de ces documents et présentent un classement des aptitudes des sols au niveau régional, utilisant des critères agronomiques simples. Elles peuvent ainsi être aisément utilisées pour la planification.

Dans le cas du sud du pays, l'aridité du climat est le facteur limitant principal (la pluviosité est comprise entre 120 et 200 mm), et on distingue simplement trois grands types d'utilisation agricole des sols :

- les cultures irriguées
- les cultures pluviales
- les parcours

L'aptitude de chacune des unités de sol à ces différentes utilisations est déterminée en considérant les critères suivants : pente, salure, nature, texture et épaisseur de la couche meuble en surface et nature de l'assise (obstacle aux racines).

De plus, vu l'importance actuelle des risques de dégradation du milieu (désertification), la sensibilité des sols à l'érosion est également prise en compte. Elle dépend principalement de la pente pour ce qui est de l'érosion hydrique et de la texture de l'horizon de surface dans le cas de l'érosion éolienne.

Les cartes de ressources en sols de la Tunisie méridionale présentent donc les cinq classes suivantes :

- sols irrigables
- sols cultivables en sec sensibles à l'érosion
- sols cultivables en sec peu sensibles
- sols de parcours sensibles à l'érosion
- sols de parcours peu sensibles à l'érosion

Pour chaque classe, le numéro et les caractères agronomiques des différentes unités pédologiques apparaissent sur la carte. L'unité pédologique constitue en effet la donnée de base qui a été extraite des cartes existantes, et interprétée.

En ce qui concerne la carte de Médenine, nous avons bien sûr utilisé le même principe, mais, en pratique, les cartes pédologiques existantes sont peu nombreuses. Seule la moitié environ de la feuille avait été prospectée préalablement ; aussi avons nous dû faire une prospection complémentaire pour pouvoir établir la carte des unités pédologiques dont a été déduite celle des ressources en sols.

2- LES DONNEES DE TELEDETECTION DISPONIBLES

Le terme "télédétection" englobe toutes les techniques aérospatiales et spatiales d'observation de la terre ; pour la région étudiée, nous disposons de données provenant des deux types les plus répandus : d'une part les photographies aériennes, d'autre part les images provenant des satellites LANDSAT.

2-1 Les photographies aériennes

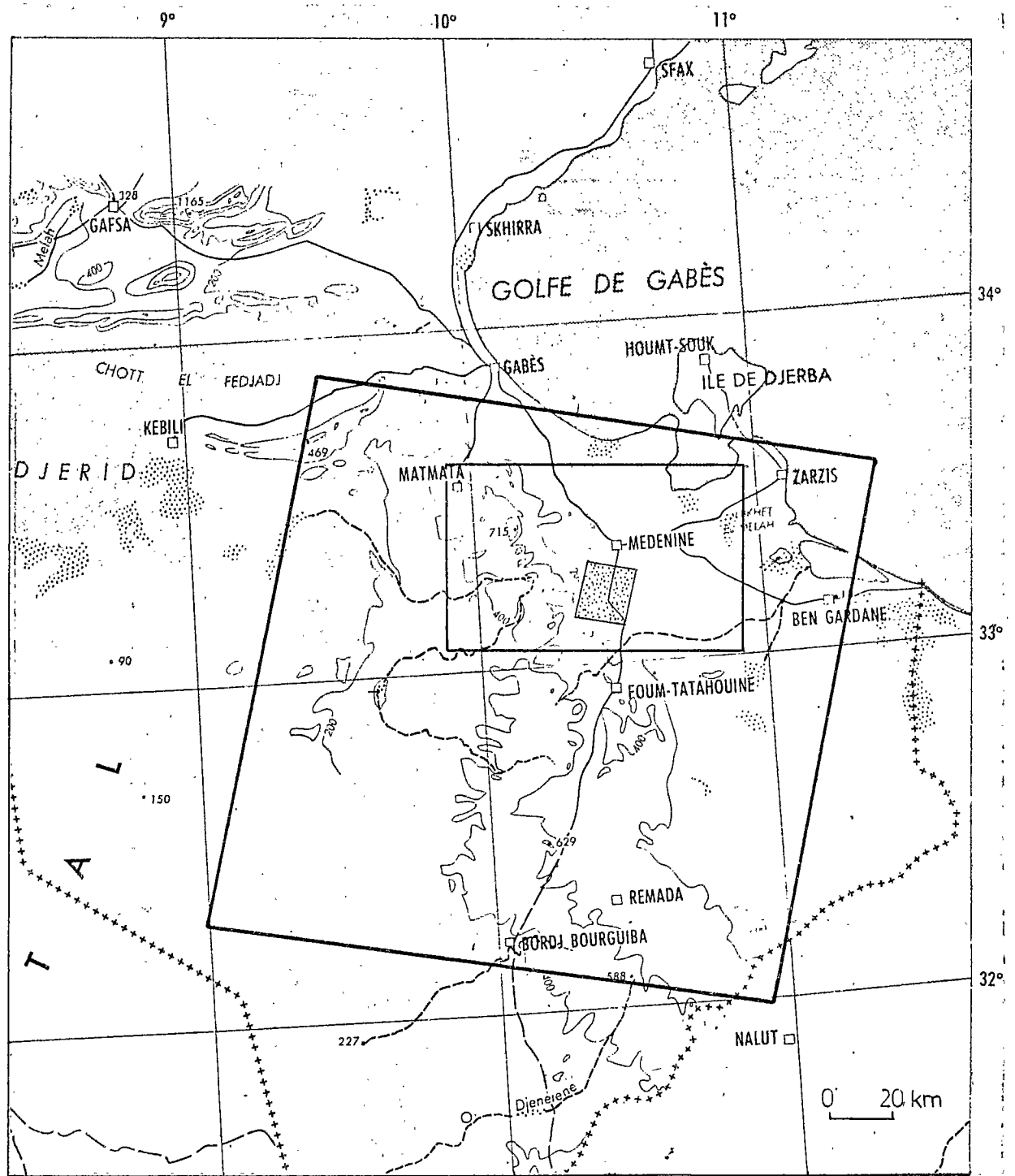
La région de Médenine est couverte en partie seulement par les missions aériennes de 1967 (réf. 168 TU 67) et de 1974 (réf. UAG 412), les clichés de cette dernière étant de qualité nettement supérieure.

Ces clichés nous ont été particulièrement utiles pour trois points essentiels :

a) Les cartes topographiques dont nous disposons datent de 1901 et sont à l'échelle du 1/100 000^{ème} ; elles sont donc bien insuffisantes pour le repérage sur le terrain. Sur les photographies, même les pistes les plus modestes apparaissent nettement, notamment les pistes construites dans les années 1960 pour les besoins de la prospection pétrolière et abandonnées depuis. Elles ont l'avantage d'offrir un carroyage régulier du terrain, mais l'inconvénient d'être localement envahies par le sable. L'organisation des tournées de prospection a donc été grandement facilitée par l'étude des pistes et de leur praticabilité d'après les photographies aériennes.

b) En suivant les techniques classiques de photo-interprétation, nous avons obtenu un grand nombre de renseignements sur les formes de relief, sur la végétation et indirectement sur les sols. Nous ne développerons pas ici les résultats de ce type de travail très courant en cartographie pédologique.

c) La comparaison entre les photos aériennes et les documents obtenus à partir des traitements des données LANDSAT a permis dans bien des cas d'étalonner directement ces dernières grâce à notre connaissance des milieux étudiés.





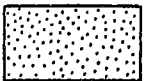
-  Zone couverte par la scène LANDSAT de trace 205 et rang 37
-  Coupure de Medenine au 1/200.000 (zone à cartographier)
-  Région de Bir Lahmar couverte par le traçage de la fig.n°5

Fig. 1 - Plan de situation

2-2 Les données des satellites

Seules les données en provenance des satellites LANDSAT sont exploitables en vue de la cartographie thématique au 1/200 000^{ème}. Les caractéristiques générales de ces satellites et de leurs capteurs sont décrites dans de nombreuses publications (voir bibliographie). Nous insisterons sur les caractères propres aux enregistrements concernant la région de Médenine.

Les images successives prises à partir de LANDSAT sont repérées suivant le numéro d'orbite, ou trace, et le rang ; la scène de Médenine a les coordonnées suivantes : trace 205, rang 37 (cf. fig. 1). Depuis le lancement du premier satellite LANDSAT en 1975, cette scène a été enregistrée régulièrement tous les 18 jours.

On dispose donc en théorie d'un nombre très grand d'enregistrements. En pratique, les conditions atmosphériques sont rarement optimales : en hiver le ciel est souvent couvert, au printemps ou en été les vents sont fréquents et l'air est souvent chargé de poussière. Ainsi, il n'y a que quelques dizaines d'images exploitables, ce qui est déjà considérable.

Les enregistrements sont faits par des procédés de digitalisation de l'image ; ils se présentent donc sous forme de bandes magnétiques que l'utilisateur peut obtenir auprès des services des stations de réception de la NASA.

L'exploitation de ces bandes nécessite donc des moyens informatiques. Mais on peut également disposer de négatifs photographiques, constitués à partir des bandes par des procédés électroniques ; leur utilisation est plus facile car elle ne requiert qu'un simple laboratoire photographique.

Ce sont d'ailleurs ces documents qui sont le plus répandus, et le laboratoire de télédétection de la Division des Sols à Tunis dispose d'une collection de négatifs de scènes de la Tunisie (cf. HAMZA, 1979). Le bureau de télédétection de l'ORSTOM possède pour sa part un ensemble de clichés et de bandes concernant les différents pays où des opérations sont en cours (cf. ESCADAFAL, 1980).

* Les enregistrements utilisés

Parmi les enregistrements disponibles, nous en avons retenu deux réunissant des caractéristiques intéressantes, notamment l'absence totale de nuages. Ils ont été faits tous les deux en automne, période favorable du point de vue de la transparence atmosphérique, mais aussi du fait que la végétation est peu développée et que le satellite observe directement la surface du sol.

Le premier, daté du 12 novembre 1972, suit une période sèche alors que le second, daté du 26 décembre 1975, suit un épisode pluvieux très important (cf. fig. 2). Ces deux images nous donnent donc la réflectance du sol à l'état sec et à l'état humide.

Les données de base obtenues auprès de la NASA sont composées des quatre négatifs au 1/1 000 000^{ème} (un par canal) pour chaque image plus une bande magnétique pour l'image de 1975, à partir desquels différents documents photographiques et numériques ont été produits par le bureau de télédétection de Bondy.

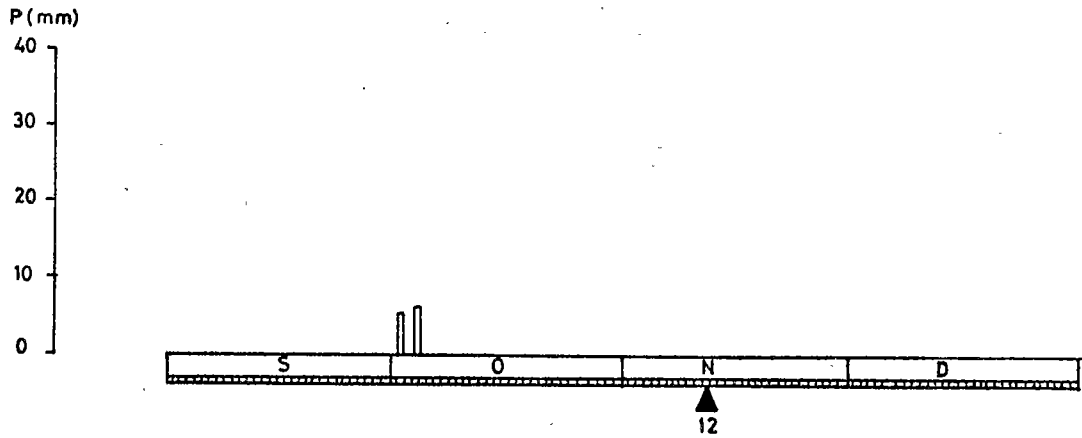
3 - APPORT DES TRAITEMENTS PHOTOCHEMISTIQUES

L'utilisation des négatifs standards constitue la première étape de l'exploitation des données de télédétection ; en effet, par les différentes techniques de tirage et d'agrandissement, on peut obtenir rapidement des documents de coût modeste dont on peut tirer des informations intéressantes en utilisant des méthodes de photo-interprétation classiques.

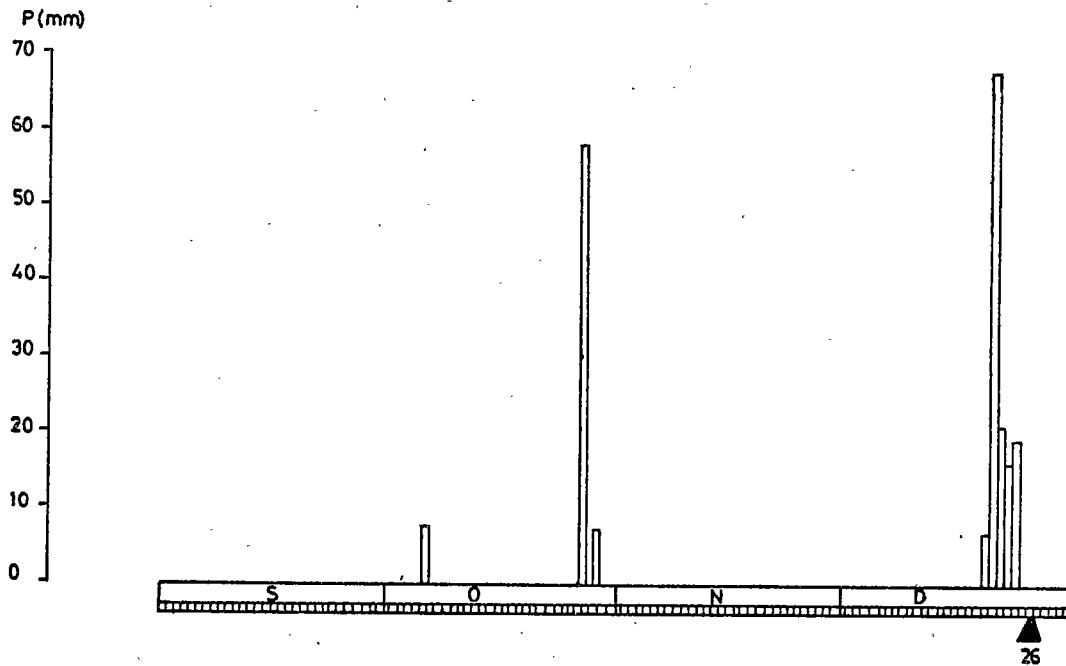
3-1 Les produits utilisés

3-1-1 Les tirages noir et blanc

A partir des négatifs noir et blanc au 1/1 000 000^{ème} un premier tirage positif par contact, donc à la même échelle, permet d'avoir une vue d'ensemble de la scène et de sélectionner la partie de l'image que l'on souhaite agrandir.



Année 1972



Année 1975

Fig. 2 - Précipitations enregistrées à Médenine pendant les périodes précédant les dates des enregistrements des données Landsat utilisées (▲) [source D.R.E. Gabès]

Les agrandissements peuvent être faits sur deux types de supports différents. Les films transparents ont l'avantage de présenter une gamme de gris plus étendue et de pouvoir être utilisés sur une table lumineuse. Les tirages sur papier sont plus résistants et consultables à tout moment, sur le terrain par exemple.

Nous avons utilisé des agrandissements au $1/200\ 000^{\text{ème}}$ des canaux 5, 6 et 7 sur papier et sur film ; ces derniers ont servi à la fabrication des images diazoïques formant les compositions colorées.

3-1-2 Les compositions colorées

Les tirages noir et blanc ne permettent de visualiser qu'un seul canal à la fois, l'utilisation de la couleur permet de combiner les canaux entre eux. On utilise pour cela la synthèse soustractive des couleurs en affectant à chaque canal une couleur complémentaire ; on ne peut donc combiner au plus que trois canaux. A partir de trois films positifs des canaux 4, 5 et 7, un tirage est effectué sur trois films monochromes (films inversibles diazoïques, ou "diazos"). Le choix des couleurs est le suivant :

4	positif jaune
5	positif magenta
7	positif cyan

La superposition de ces trois films positifs colorés donne une image transparente en fausses couleurs, à l'échelle des positifs noir et blanc de départ. Ces compositions colorées ne peuvent donc être étudiées que sur une table lumineuse et sont peu maniables.

Pour chaque image, nous en avons utilisé deux types :

- une vue d'ensemble de la scène au $1/500\ 000^{\text{ème}}$
- une vue partielle à l'échelle du $1/200\ 000^{\text{ème}}$ couvrant la zone à cartographier.

Ces documents ont le très grand avantage d'être exactement à l'échelle de travail et donc de pouvoir être superposés à d'autres documents existants, notamment aux cartes géologiques et surtout aux cartes topographiques ; comme nous le verrons, nous avons largement utilisé cette possibilité.

3-2 Etude globale de l'image

Elle est basée sur une étude, au niveau régional, des éléments du paysage directement identifiables sur l'image. La diazo au 1/500 000^{ème} du 12 novembre 1972 en révèle assez bien les grands traits ; les contrastes y sont élevés et sa netteté est encore acceptable à cette échelle ; nous en avons étudié la partie correspondant à la coupure de Médénine au 1/200 000^{ème} (cf. fig. 1).

La chaîne des Matmata, à l'ouest, apparaît très nettement avec sa succession de corniches. Cet ensemble à tendance tabulaire présente un pendage faible et régulier vers l'ouest, où il forme le Dahar ("dos", en arabe) qui s'enfonce sous les sables du Grand Erg. Il est constitué de formations secondaires dans lesquelles alternent des bancs de roches tendres (grès, marnes et calcaires marneux) et de roches dures (calcaires dolomitiques et conglomérats). Le banc le plus remarquable est formé de dolomies massives, c'est la "corniche turonienne" bien visible sur l'image. Elle constitue une ligne de partage des eaux :

- à l'ouest, un ensemble de grands oueds larges ensablés, se détachant nettement sur le fond sombre de l'image, forme un réseau hydrographique conforme entraînant les eaux à travers le Dahar vers le Grand Erg.
- à l'est, un réseau subséquent a entaillé ce massif perpendiculairement à son axe, créant ainsi des vallées qui débouchent dans la plaine.

Ce massif domine la plaine par une cuesta de direction NW-SE très élevée au nord et beaucoup plus modeste au sud, ce qui se traduit bien dans le modelé de dissection visible sur l'image. La région de Matmata apparaît nettement plus foncée en 1975, ceci est à rapprocher du fait que les épandages de limons y sont très abondants.

Parmi les autres massifs, on remarque le djebel Tebaga dont l'axe est orienté très différemment (WSW-ENE) ; il s'agit d'une "ride" d'âge permien. Au sud, on distingue la partie septentrionale des massifs du Rehach, trias carbonaté et gréseux, séparé des formations gypseuses du trias par un couloir apparaissant comme une zone d'effondrement.

Le piémont qui longe la cuesta des Matmata se distingue nettement par sa couleur plus rougeâtre et plus claire ; il se trouve vers le prolongement du "couloir" évoqué précédemment. Cette zone correspond à des dépôts limoneux récents localement encombrés de cailloux et de blocs colluviomnés depuis la cuesta.

Le plateau de Médenine, plus à l'est, se divise en plusieurs zones. Cet ensemble est caractérisé par la présence d'une épaisse croûte calcaire attribuée au villafranchien, mais l'image laisse nettement apparaître une partie plus foncée au nord, où la croûte est sub-affleurante et un ensemble à dominante nettement plus claire et plus jaunâtre vers le sud, correspondant au domaine des steppes sableuses. Entre ces deux parties, une importante tache foncée correspond à la zone d'alluvionnement de l'oued el Khil où les sables sont fixés par Aristida pungens (cf. 3-3-1). D'une façon générale, les oueds descendant des Matmata et coulant vers la mer ont tendance à alluvionner au contact de ce plateau, puis à recreuser leur lit plus à l'aval.

Au sud, la région de l'oued Fessi se distingue bien sur l'image où apparaît la grande plaine alluviale que celui-ci a formée au niveau de Kirchaou et plus en aval, entre les steppes sableuses et les glacis de piémont du djebel Rehach.

Enfin, la zone littorale paraît plus complexe sur l'image : affleurement du substratum miopliocène gypseux, recouvrements éoliens et dépressions salées y alternent, avec localement des surfaces à croûte calcaire. Cette complexité est due à l'existence d'un réseau de failles orientées NW-SE révélées par les études géologiques et hydrogéologiques (ROUATBI, 1967 ; UNESCO, 1970). Un réseau de failles secondaires transverses, moins bien connu, s'y superpose formant des compartiments dont certains sont soulevés relativement aux autres.

D'une façon générale, on peut distinguer sur l'ensemble de l'image un certain nombre d'alignements remarquables dont la direction est comparable à celle des failles connues et qui laissent supposer l'existence de phénomènes tectoniques récents, car ils affectent des formations d'âge quaternaire. Ainsi la zone de piémont paraît correspondre à un effondrement comblé par des matériaux quaternaires récents, par rapport au plateau de Médenine plus ancien où les oueds ont tendance à s'encaisser ; il en est de même pour la plaine alluviale de l'oued Fessi.

D'autres observations mériteraient une étude géomorphologique et tectonique plus fine, mais à ce stade de l'interprétation nous avons déjà une compréhension suffisante du paysage pour passer à son analyse par zonage suivant les thèmes "végétation" et "sols".

3-3 Etude par zonage

L'étude globale nous a montré les limites des possibilités d'identification directe d'objets connus sur les images LANDSAT. Les objets qui nous intéressent, la végétation et les sols, ne peuvent être identifiés qu'indirectement d'après leurs propriétés spectrales. Sur les compositions colorées étudiées, les variations de réflectance se traduisent par des différences dans les nuances de couleurs pour peu qu'elles soient assez importantes.

Nous avons utilisé l'agrandissement au 1/200 000^{ème} de l'image du 26 décembre 1975 qui laisse apparaître plus de détails ; l'image du 12 novembre 1972 paraît plus floue à cette échelle, probablement à cause d'une atmosphère plus chargée en poussières (période sèche).

Le travail d'interprétation consiste à délimiter des zones caractérisées par leur couleur et leur teinte, leur structure et leur homogénéité, appelées zones isophènes, et essayer d'identifier les objets auxquels elles correspondent. Pour cela, nous avons procédé à des "étalonnages" en vérifiant soit sur des cartes thématiques lorsqu'elles existaient, soit sur le terrain, directement en allant faire les observations sur place, ou indirectement en interprétant les photographies aériennes (cf. 2-1-c).

Le résultat de ce travail apparaît sur le tableau 1, récapitulant les caractères des différentes unités isophènes et leur interprétation que nous allons aborder maintenant.

3-3-1 Observations sur la végétation

Plusieurs années d'étude en stations expérimentales menées dans la région de Gabès ont montré que, en novembre et décembre, la végétation spontanée ou cultivée se trouve au début de la période de croissance (FLORET et PONTANIER, 1978). Le recouvrement des plantes annuelles et des cultures n'excède pas 10 % et la réflectance mesurée sur ces zones est due essentiellement aux caractères de la surface du sol (LONG et al., 1978), ce qui revient à dire que la végétation annuelle n'est pas détectable.

Les plantes pérennes peuvent par contre atteindre un recouvrement de près de 30 % dans les parcours en bon état sur sols sableux. L'influence de la végétation sur la réflectance de ces parcours peut alors être sensible ; cependant, ce n'est que lorsque la végétation verte dépasse 40 % de recouvrement que son influence est prépondérante (GIRARD, 1976). Dans tous les cas, cela se traduit par une diminution de la réflectance plus ou moins forte suivant les canaux. Ainsi, la végétation photosynthétiquement active absorbe fortement le proche infrarouge, la diminution de réflectance est alors surtout sensible dans le canal 7.

D'après ces remarques, seuls les peuplements de plantes pérennes suffisamment denses peuvent apparaître sur les images étudiées qui ont été enregistrées aux mois de novembre et décembre. En effet, d'après le tableau 1, nous avons pu distinguer :

- les parcours en bon état (unité 6), peuplements de Rhanthérium suaveolens sur sols sableux dont la couleur foncée paraît être due au taux de recouvrement important

- les zones halomorphes (zones 2, 3 et 4), dont la faible réflectance semble provenir des végétaux halophytes, de couleur vert foncé et en peuplement assez dense, le sol est également foncé

Unités isophènes			Situation topographique	Géomorphologie	Végétation et occupation du sol	Interprétation pédologique		
N°	Couleur	Structure				Types de sols	N° d'unité	
1	noir	homogène	mer et surfaces d'eau libre sebkhras inondés			sols salés	25	
1bis	noir	en taches allongées	pentcs des reliefs	versants	zone d'ombre		1,3 10	
2	violet foncé	assez homogène	bordure	de sebkhra	plantes halophytes	sols salins	24	
3	rouge violacé foncé	assez homogène	frange côtière	plage récente	plantes	sols salés	25	
4	brun très foncé	en taches irrégulières	dépressions	zones endoréiques	peuplements denses de plantes halophytes	sols salins	24	
4bis	brun très foncé	en taches compactes	plaine	zone d'accumulation de sable	peuplement d'Aristida pungens	sols sableux assez profonds	11	
		en ligne	bandes "forestières" étroites			très profonds	14	
5	rouge brunâtre	en taches denses	massif des Matmata	cuvettes comblées	cultures en jessours	sols limoneux érodés en bad-lands	10	
6	brun rouge foncé	faiblement hétérogène	plaine	glacis	steppe à Rhantherium suaveolens	siérozems sableux	22	
7	brun rouge	assez homogène	piémont et vallées	colluvions	parcours et cultures en jessours	sols caillouteux	3 9	
8	brun orangé	à taches arborescentes	massif des Matmata	relief tabulaire disséqué	parcours	lithosols	1 2	
9	brun foncé	grandes taches parcourues de dendrites	plaine	glacis, incisé par les oueds	parcours dégradé	sols à croûte calcaire "saumon" (sub)affleurante	2	
		assez homogène	piémont (localement)				4	
10	rouge grisâtre	assez homogène	reliefs	affleurement de roche gypseuse	parcours et cultures	sols à croûte ou encroûtement gypseux	4'	
			plaine côtière	glacis			16 17	
11	gris rougeâtre	localement striés NO-SE	vallée de l'oued Fessi	plaine alluviale	cultures épisodiques	sols alluviaux profonds	14	
12	gris jaunâtre	tacheté de brun très foncé	bordure d'oued	terrasse	parcours et cultures	sols profonds sols faiblement salins	20 15	
13	jaune brunâtre	faiblement hétérogène	plaine	glacis	parcours en état moyen	sols sableux sur croûte calcaire	12 21	
14	jaune brunâtre clair	à stries SO-NE	plaine	glacis	parcours dégradé	sols à voile éolien mobile	12 12', 8'	
15	jaune clair	en taches irrégulières anastomosées	plaine	glacis	parcours très dégradé	sable mobile sur sols variés	5' 7, 8	
16	jaune très clair	en taches à bord diffus	plaine	champs de dunes	végétation presque nulle	sols peu évolués sableux	5	
17	gris très clair	en taches allongées	pentcs des reliefs	versants fortement éclairés			1,3 10	
18	blanc	une tache à bord diffus	nuage					

TABLEAU N° 1 - RESULTATS DU ZONAGE DE L'IMAGE DU 26/12/75

CLASSEMENT DES UNITES PEDOLOGIQUES (Tableau 2)

CLASSE et SOUS-CLASSE	GROUPE	SOUS-GROUPE	FAMILLE	N° unité	
SOLS MINERAUX BRUTS NON CLIMATIQUES	D'ÉROSION	LITHOSOLS	Calcaires, calcaires dolomitiques et grès	1	
			Croûte calcaire dure (reg en surface)	2	
		REGOSOLS	Colluvions grossières (versants abrupts)	3	
			Croûte calcaire démantelée	4	
			Croûte gypso-calcaire démantelée	4'	
	D'APPORT	EOLIENS	Dunes, vives	5	
			Sables mobiles sur affl. calc. ou croûte calc.	5'	
		ALLUVIAUX	Alluvions grossières	6	
			Alluvions sablo-caillouteuses	7	
SOLS PEU EVOLUES NON CLIMATIQUES	D'ÉROSION	REGOSOLIOUES	Voile éolien sur croûte calcaire démantelée	8	
			Colluvions fines sur glacis de versant encroûté	9	
			Limons à nodules calcaires érodé en bad-fonds	10	
	D'APPORT EOLIEN	MODAUX	Dépot éoliens épais fixe (niebkas). localement sur croûte calcaire ou gypso-calcaire	11	
			Voile éolien continu sur croûte calcaire	12	
			Voile éolien continu sur croûte gypseuse	12'	
	D'APPORT ALLUVIAL	MODAUX	Alluvions s/sl (oueds larges, jessours)	13	
			Alluvions S/SA profondes des zones d'épandage	14	
		A CARACTERE DE SALINITE		Alluvions S/SL à recouvrement éolien à fixe	15
SOLS CALCOMAGNESIMORPHES GYPSEUX	A ACCUMULATION LOCALISEE	A CROÛTE	Croûte gypseuse épaisse sur affleurements de roches gypseuses	16	
		A ENCROUTEMENT	Encroûtement gypseux épais	17	
			Sables gypseux	18	
SOLS ISOHUMIQUES COMPLEXE SATURÉ (subtropicaux)	BRUN STEPPIQUE	TYPIQUE (tronquée)	Limons à nodules calcaires, parfois encroûtés	19	
	SIEROZEMS (Clairs)	MODAUX	Sables épais	20	
			Sables fins sur limons à nodules calcaires	21	
			Sables sur croûte calcaire	22	
			Sables gypseux	23	
			Sables gypseux sur encroûtement gypseux	23'	
SOLS HALOMORPHES	A STRUCTURE NON DEGRADÉE	SALINS	Sables calcaires sur sables gypseux	24	
	A STRUCTURE DEGRADÉE	SOLS SALES A ALCALIS	Sables limoneux (sabkas)	25	

- les bandes forestières (zone 4 bis), reboisements installés le long des axes routiers, notamment pour en protéger certaines parties menacées d'ensablement

- les peuplements de "sbot" (Aristida pungens), grande graminée qui, par fixation des sables, (zone 4 bis), forme des champs de nebkas ou de rebdous dont la hauteur est de 1 à 2 m et l'espacement de 5 à 10 m en moyenne.

Dans ces deux derniers cas, à l'effet du recouvrement du sol par les végétaux, s'ajoute l'effet d'ombrage, dû au feuillage pour les bandes forestières et au "mésorelief" accidenté dans le cas des champs de nebkas. En effet, le soleil se trouve assez bas sur l'horizon (heure d'enregistrement de toutes les images : 9 h 30 locale grâce à l'orbite héliosynchrone du satellite) et les ombres formées par les nebkas représentent un pourcentage élevé de la surface. De même, les bandes forestières qui n'ont que 40 à 60 m de large apparaissent nettement grâce à l'importance de l'ombre portée des arbres. Cette caractéristique a été très utile pour repérer les axes routiers et ainsi recaler les images agrandies sur le fond topographique.

Les observations sur la végétation se limitent donc à la détermination des peuplements denses. D'après la couleur, on peut distinguer les steppes à Rhantherium d'une part, les halophytes, "sbot" et bandes forestières d'autre part. La distinction entre ces derniers se fait d'après la forme des unités isophènes. De ces déterminations de la végétation, on peut déduire des informations sur la texture, la profondeur et la salure des sols qui la portent ; malheureusement cela ne représente qu'un faible pourcentage des sols à cartographier.

3-3-2 Elaboration de la carte des unités pédologiques

Nous avons vu que la carte des ressources en sols est basée sur l'interprétation, en termes agronomiques, d'une carte de synthèse des unités pédologiques. L'élaboration de cette dernière est donc une étape essentielle.

Nous disposons pour cela de plusieurs types de documents :

- les cartes existantes
- les observations originales que nous avons faites sur les zones non prospectées
- les documents de télédétection, notamment la composition colorée au 1/200 000^{ème} de l'image du 26 décembre 1975 (diaz).

Le premier travail a consisté à ramener tous les documents à l'échelle du 1/200 000^{ème} qui est celle du document final. D'après les cartes pédologiques existantes, nous avons reporté les limites des unités pédologiques connues sur un fond topographique transparent (contre-calque). Jusqu'à ce stade, aucune interprétation n'a été faite, il s'agit simplement de la mise en forme des données brutes disponibles.

La première phase de l'interprétation a consisté à homogénéiser les légendes existantes pour ébaucher la légende synthétique. Nous avons superposé le contre-calque à la diazo ; l'erreur maximale entre les deux étant de 2 mm d'un bord à l'autre, la coïncidence était très satisfaisante. La vision d'ensemble de la mosaïque de carte pédologique et des unités isophènes qu'elle recouvrait a permis d'une part de définir le contenu d'un grand nombre de ces unités (cf. tableau 1), et d'autre part de faire les rapprochements nécessaires entre unités de sols voisines.

La deuxième phase a été l'élaboration d'une carte pédologique de reconnaissance pour les zones non prospectées jusqu'alors, à savoir :

- la moitié nord de la feuille, cartographiée par A. MTIMET
- la partie SE, région de l'oued Fessi et la partie SW, région de du Dahar, cartographiées par R. ESCADAFAL.

Pour les deux premières zones, nous disposons de photos aériennes ; nous avons donc appliqué les méthodes classiques de photo-interprétation et de prospection sur le terrain. En comparant ces données de terrain et celles collectées à titre de vérification sur les zones déjà cartographiées, nous avons pu établir les liens existants entre elles. Le travail de report des nouvelles unités définies et d'interpolation avec la carte issue de la première phase a également été facilité par l'utilisation de la diazo.

Dans le cas de la région du Dahar, beaucoup moins bien connue et accessible, nous avons travaillé directement sur la diazo pour interpréter les observations de terrain. En effet, il n'existe pas de mission aérienne couvrant cette zone. De plus, l'extension des zones dunaires rend la projection par les moyens classiques particulièrement difficile. Certaines zones n'ont donc pu faire l'objet d'observations sur le terrain et l'image satellite nous a permis d'extrapoler les observations faites sur les unités voisines, ou de déterminer d'après la classification du tableau 1 le contenu de zones isophènes apparaissant sur la diazo.

Ainsi les champs de dunes sont-ils nettement discernables (unité n° 16 = unité pédologique n° 5), de même que les affleurements géologiques formant des reliefs structuraux en pente douce (unité n° 8 = unité pédologique n° 1 et 2).

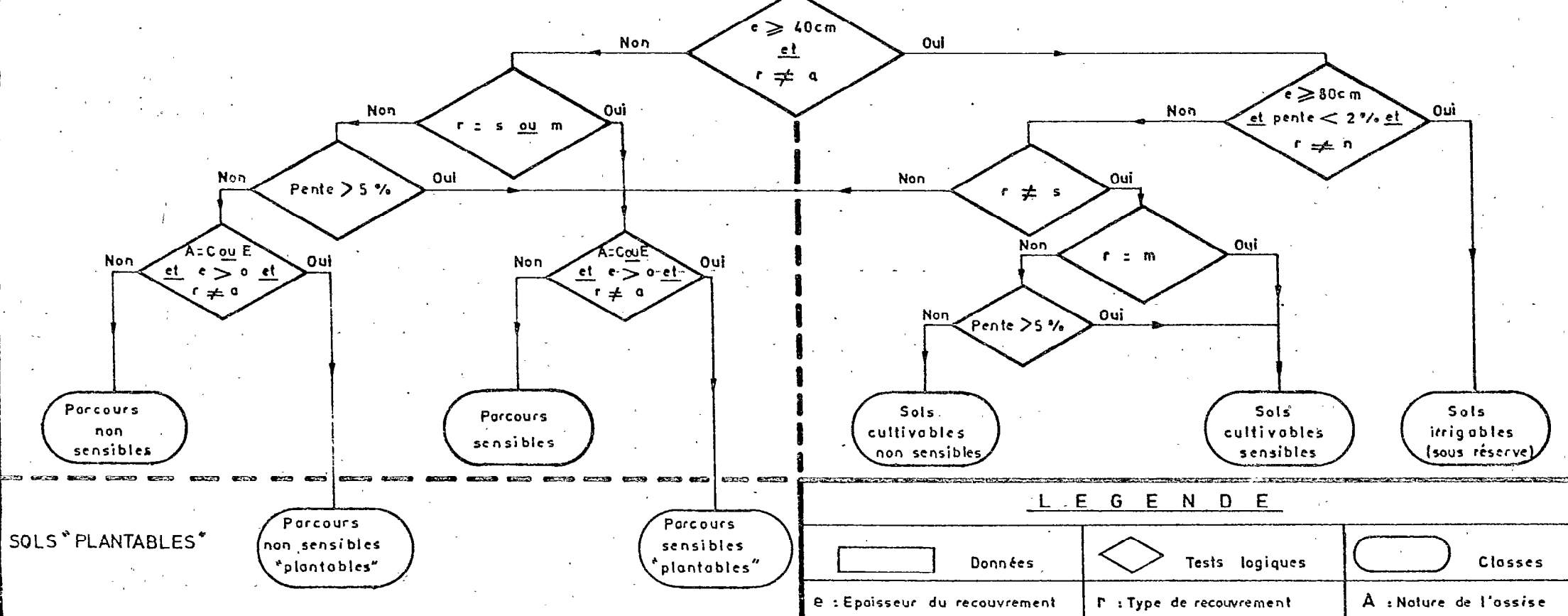
Tout au long de l'élaboration de la carte des unités pédologiques, l'utilisation de la diazo nous a donc été très profitable, en apportant une vue d'ensemble permettant de synthétiser les informations à l'échelle du document final et également en apportant des informations originales sur la structure du paysage, sur la répartition des matériaux récents et sur certaines zones mal connues.

Nous avons cherché à établir les relations entre unités isophènes et unités pédologiques, mais l'étude des tableaux 1 et 2 montre qu'à une même unité isophène peuvent correspondre plusieurs unités de sols, parfois fort différentes, et inversement ; une relation biunivoque n'est observée que dans certains cas (entre 5 et 10, 6 et 22, 16 et 5).

UNITES PEDOLOGIQUES
FAMILLES de MATERIAUX

SOLS NON CULTIVABLES

SOLS CULTIVABLES



SOLS "PLANTABLES"

LEGENDE

	Données		Tests logiques		Classes
E : Epaisseur du recouvement		r : Type de recouvement		A : Nature de l'assise	

Symboles définissant les types de recouvrements et d'assises utilisés dans la légende de la carte.

- a : Alluvions et colluvions calcaires très grossières
- S : Alluvions éoliennes sableuses des zones dunaires

- m : Matériau d'origine mixte calcaire sablo-limoneux
- n : Matériau limono-sableux alluvial ou colluvial
- l : Matériau limoneux à nodules calcaires

- E : Encroûtement calcaire feuilleté sur limon à nodules
- C : Croûte calcaire démantelée sur encroûtement nodulaire

Figure n°4 ORGANIGRAMME DE CLASSEMENT UTILISÉ POUR LA CARTE DES RESSOURCES EN SOLS DE BIR LAHMAR

3-4 Télédétection des contraintes agronomiques

La figure n° 4 donne un organigramme de classement, montrant le rôle joué par chacun des critères utilisés pour l'établissement de la carte de ressources en sols. (exemple de la carte de Bir Lahmar au 1/25 000^{ème}, dont le principe n'est pas différent des cartes à petite échelle ; d'après ESCADAFAL, 1979).

L'apport direct de la télédétection à la détermination de ces différents critères agronomiques retenus pour le classement est très variable.

3-4-1 La pente

La pente est une variable essentielle dont dépend l'aptitude à l'irrigation et la sensibilité à l'érosion hydrique. Les images LANDSAT ne nous donnent pratiquement aucun renseignement, seuls les reliefs les plus abrupts peuvent être distingués (cf. 3-2). Les satellites futurs, STEREOSAT (USA) et SPOT (France), fourniront des images stéréoscopiques qui permettront de lever ce handicap. En attendant, nous avons mesuré les pentes sur les cartes topographiques existantes (au 1/100 000^{ème}).

3-4-2 La nature de l'assise

L'assise, obstacle naturel aux racines, peut être une roche dure, une dalle ou une croûte calcaire ; elle est généralement recouverte par les horizons supérieurs du sol et on ne peut alors déterminer sa présence d'après les images satellite. On peut néanmoins avoir des indications en raisonnant sur les données géomorphologiques (extension des massifs, des glaciers anciens et récents, cf. 3-2).

Lorsque l'assise affleure, cas fréquent à cause de la forte érosion caractérisant ces régions, elle est généralement aisément détectable (unités isophènes 8, 9 et 10).

3-4-3 L'épaisseur de la couche meuble

Le problème de la détermination de l'épaisseur de la couche meuble est encore plus difficile à résoudre que le précédent, l'image-satellite ne permettant que certaines déductions d'après la géomorphologie et la végétation (cf. 3-2 et 3-3-1).

3-4-4 La salure

Les premières interprétations ont montré que la végétation est une bonne indicatrice de la salure ; ceci reste cependant insuffisant. En effet, les sols faiblement à moyennement salés ne portent pas une végétation détectable par les satellites.

Cependant la présence de sels dans le sol modifie souvent sa surface de façon plus ou moins nette, le cas le plus flagrant étant l'apparition d'efflorescences salines. Le seuil de détectabilité de ces modifications de surface n'a pu être fixé sur les documents issus de traitements photochimiques dont l'étude reste très qualitative.

3-4-5 La nature et la texture de la couche meuble

Les matériaux constituant les horizons supérieurs meubles ("couche meuble") des sols de la région sont assez variés, mais on peut en définir les plus remarquables d'après leur nature et leur texture.

	couleur à l'état sec
Matériau à sables grossiers, calcaires	7,5 YR 6/6
Matériau à sables fins, faiblement calcaires	7,5 YR 7/6
Matériau sablo-limoneux, faiblement calcaires	7,5 YR 6/8
Matériau limono-sableux, calcaires	6,25 YR 6/8
Matériau limoneux à nodules calcaires	5 YR 5/8

La couleur, information extraite des études pédologiques, semble être une variable caractérisant bien chacun des matériaux ci-dessus ; or, il a été mis en évidence par ailleurs que la couleur du sol a une influence remarquable sur la réflectance des sols nus (GIRARD, 1977 ; DA COSTA, 1980).

Comme l'effet de la végétation est négligeable sur une bonne partie de l'image (cf. 3-3-1), nous pouvons espérer trouver une relation assez nette entre la réflectance de la surface du sol, apparaissant sous la forme de nuances de couleurs sur la diazo, et la nature et la texture du matériau qui la compose.

Effectivement, on constate que les sols sableux apparaissent nettement plus clairs que les sols limoneux, eux-mêmes plus clairs que les sols squelettiques sur croûte calcaire de couleur "saumon". Il existe donc une relation, mais qui, à l'interprétation des images, ne peut s'exprimer que qualitativement en termes de type "moins clair" ou "plus jaune". De fait, il serait vain de vouloir préciser plus exactement la couleur apparaissant sur l'image en utilisant un code de couleurs par exemple, car la coloration des films n'est pas absolument constante d'un côté à l'autre du document, de plus elle n'est caractéristique que de ce document précis et ne peut donc pas être comparée à celle d'un autre document analogue.

Ainsi, nous n'avons pas pu comparer entre elles les deux images disponibles, car la coloration brun orange, par exemple, n'a pas la même signification du point de vue des valeurs de réflectance sur les deux images. Cette difficulté importante nous a empêché de tirer parti de l'existence de données sur les sols à l'état sec et à l'état humide.

3-5 Bilan de l'utilisation des traitements photochimiques

Les documents obtenus à partir des négatifs standards ont un nombre d'avantages indéniables. Ils sont faciles à réaliser, économiques, et ils peuvent être produits aux formats et aux caractéristiques souhaités (contraste, couleur).

Dans le travail que nous avons fait, la qualité des compositions colorées que nous a fourni le bureau de télédétection nous a permis d'en tirer un grand nombre d'informations sur la géologie, la géomorphologie, la végétation et les sols de la zone étudiée. La vision d'ensemble qu'offrent ces images s'adapte particulièrement bien à l'objectif des cartes de ressources en sols qui sont avant tout des cartes de synthèse.

Ce type de document photographique sera donc amené à jouer un rôle irremplaçable dans la poursuite du programme de cartographie du sud de la Tunisie, particulièrement pour les zones où il n'existe pas de couverture aérienne. Cependant, il ne peut se suffire à lui-même ; il contient des informations complémentaires très utiles, mais on ne peut, dans l'état actuel de l'art, en tirer toutes les informations nécessaires à l'établissement de ces cartes.

Cette conclusion est à rapprocher du fait que l'interprétation de ces documents photographiques reste assez classique et qualitative. Seule l'étude des valeurs numériques peut permettre de classer précisément les objets d'après leur réflectance, de faire des rapports entre canaux et entre images, en bref, d'exploiter à fond les possibilités de la télédétection spatiale multispectrale et multitemporelle.

4 - APPORT DES TRAITEMENTS NUMERIQUES

Ils ont été effectués par R. ESCADAFAL à l'atelier de traitement numérique de Bondy qui dispose d'un équipement informatique complet. Ce dernier est accessible aux utilisateurs grâce à un poste d'analyse où ils peuvent manipuler les données de la zone étudiée et les visualiser sur un écran vidéo couleur (Péricolor).

4-1 Caractéristiques de l'enregistrement utilisé

Les données numériques utilisées sont celles de l'enregistrement du 26 décembre 1975. Elles se présentent sous la forme d'une bande magnétique où sont stockées les valeurs numériques de l'image de chaque canal composée de 2256 lignes comportant chacune 3240 points élémentaires. Un extrait de l'image peut donc être repéré en coordonnées lignes et colonnes. Les valeurs moyennes de réflectance de chaque point sont codées de 0 à 127 pour les canaux 4, 5 et 6 et entre 0 et 63 pour le canal 7. Pour l'image étudiée, les valeurs enregistrées s'étalent sur une petite partie seulement de cette gamme théorique ; les réflectances sont assez faibles, certainement à cause de l'état humide des sols (cf. 2-2-1).

4-2 Etude de l'image par canal

Il s'agit du traitement le plus simple, dont nous allons analyser les différentes étapes dans son application à la zone étudiée.

La totalité de l'image ne peut être étudiée en même temps, car pour être utilisable, les données stockées sur la bande doivent être chargées sur des disques ; comme l'écran ne permet de visualiser qu'une petite zone, il n'est pas utile de charger toute la bande : cela occuperait trop de mémoires. Nous avons choisi d'étudier une zone pour laquelle nous disposions de cartes pédologiques, ce qui devait nous permettre de réaliser un étalonnage de tout ou partie de l'image. Cette zone est limitée par le cadre suivant (Fichier Gabès 01) :

- colonnes : 1750 à 2350

- lignes : 650 à 1250

La dégradation des valeurs numériques d'un canal est un découpage en classes ; chaque classe peut être visualisée à l'écran en lui affectant une couleur particulière.

Exemple : tous les pixels du canal 5 dont la valeur est comprise entre 0 et 10 apparaissent en rouge sur l'écran Péricolor.

Le travail de l'analyste consiste à constituer des classes qui paraissent correspondre à des thèmes recherchés. D'où la nécessité d'avoir une connaissance du terrain au moins dans une zone où l'on puisse procéder à cette phase d'apprentissage.

Dans le cas du fichier Gabès 01, les valeurs du canal 4 sont de qualité médiocre car il y a de nombreux défauts de balayage ("stretching") ; les valeurs du canal 5 s'étalent de 0 à 42 et celles du canal 7 de 0 à 19 ; la dynamique de cet enregistrement est donc très faible. Pour obtenir une gamme de valeurs suffisamment étalée pour pouvoir être dégradée efficacement, une combinaison des canaux 6 et 7 a été réalisée par corrélation, créant ainsi le canal A dont les valeurs s'échelonnent de 0 à 125 (programme CORCA).

La dégradation de ce canal nous a permis de définir des classes remarquables et de procéder au traçage de ces classes. Il a été fait avec une imprimante en noir et blanc où chaque classe apparaît avec une trame différente ; le nombre de trames possibles étant insuffisant, le traçage a été fait en deux passages (cf. fig. 5 a et 5 b). La précision dans le contour est bien meilleure que dans le cas des images diazos. Cependant, la forme et l'échelle de ce document (1/94 000^{ème} env.) le rendent difficile à utiliser, car il n'est pas directement superposable aux cartes existantes.

Les classes définies n'apportent pas une information supplémentaire très importante. En effet, comme on peut le constater sur la légende des figures, les confusions de thèmes sont nombreuses ; ainsi n'a-t-il pas été possible de séparer les sols gypseux des sols calcaires, ni les zones d'ombres des zones à forte densité de végétaux (halophytes ou "sbot").

Cette carte radiométrique que constitue le traçage obtenu ne peut donc être directement interprétée en termes pédologiques et nous avons cherché à utiliser des traitements plus élaborés pour lever cette difficulté.



image du 26_12_75 Lignes 1000 à 1226 Colonne 1828 à 2090

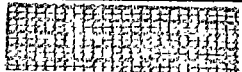
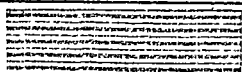
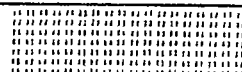
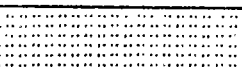
Trame										
Valeurs	0	10	11	40	41	54	55	61	62	69
Thèmes	mer (non représenté)		ombres		végétation dense + ombres		Sols squelettiques sur dalle calcaire		sols à croûte calcaire	

(1^{er} Passage)

Fig. 5a - Traçage du canal A - région de Bir Lahmar (voir texte)



Image du 26_12_75 Lignes 1000 à 1226 Colonnes 1828 à 2090

Trame								
Valeurs	70	77	78	87	88	94	95	125
Thèmes	sols limoneux		sols limono.sableux		sols sableux		Sables dénudés	

(2^{ème} Passage)

Fig. 5 b. - Traçage du canal A - région de Bir Lahmar (voir texte)

4-3 Etude des combinaisons de canaux

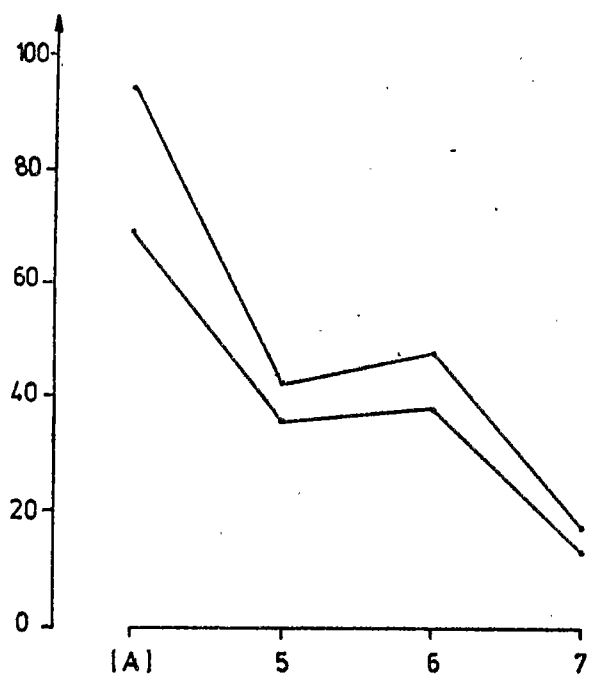
4-3-1 "Signature spectrale" et "serpent"

L'utilisation d'un seul canal ne permet pas d'exploiter toute la richesse des informations contenues dans les données LANDSAT. Celles-ci nous donnent, en effet, simultanément les valeurs de réflectance dans quatre gammes de longueurs d'ondes différentes du spectre visible et proche infrarouge (données multispectrales). Deux objets indiscernables sur un ou deux canaux peuvent être distingués grâce aux autres. Il est donc très intéressant de combiner les canaux entre eux ; cela est fait de façon qualitative par l'utilisation des diazos (cf. 3), mais également beaucoup plus finement par les traitements numériques.

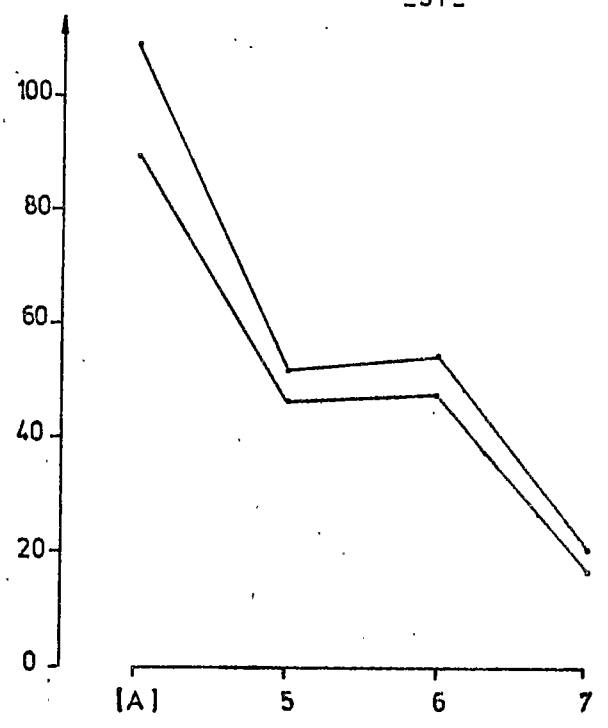
En théorie, ces traitements permettraient de cartographier automatiquement un objet dont la courbe de réflectance ou "signature spectrale" serait connue ; mais, en pratique, celle-ci varie beaucoup, dans le milieu naturel, avec les saisons et les conditions atmosphériques. Un objet peut donc avoir une courbe de réflectance caractéristique, mais pour un ou quelques enregistrements très semblables seulement.

En repérant un objet que l'on connaît (sol ou peuplement végétal, par exemple) sur la portion d'image apparaissant à l'écran Péricolor, il est possible d'obtenir, grâce à la procédure "Mitraillette", une liste des valeurs de réflectance des pixels autour d'un point centré sur cet objet, ceci pour les quatre canaux. On peut ainsi connaître la variation de la réflectance de cet objet pour chaque gamme de longueurs d'ondes dans l'image considérée et tracer le "serpent" correspondant. Ce "serpent" peut être assimilé à une signature spectrale à l'instant de l'enregistrement de l'image.

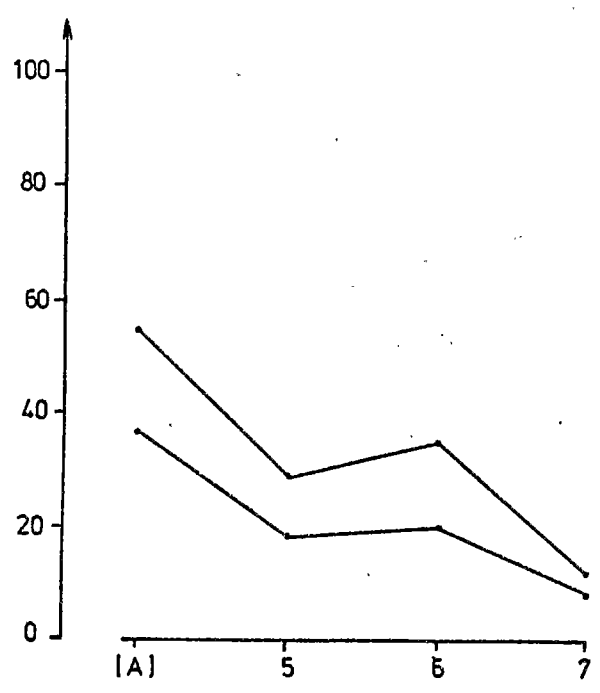
Au cours de nos essais au laboratoire d'analyse numérique, nous avons appliqué ce traitement et obtenu les "serpents" d'un certain nombre de sols (cf. fig. 6) ; connaissant ainsi les valeurs remarquables dans les différents canaux, on peut proposer une combinaison faisant ressortir les thèmes recherchés.



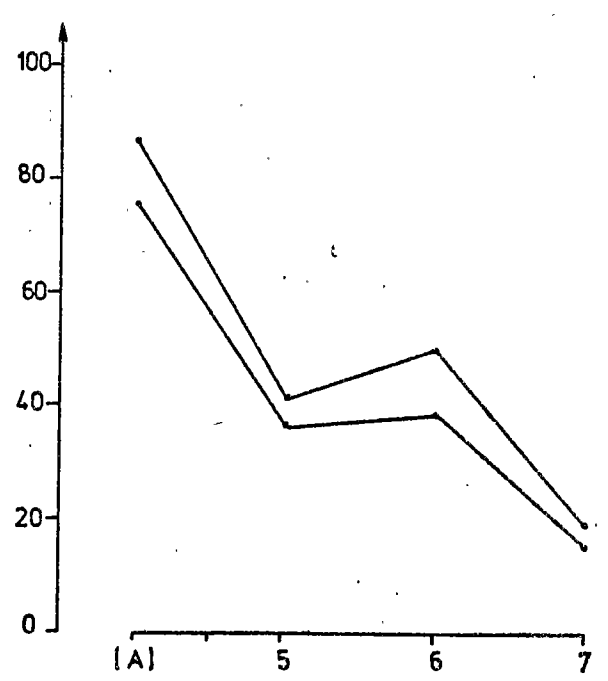
Sols limoneux



Sols à sables dénudés (dunes)



Sols à végétation halophyte



Sols à croûte gypseuse

Fig.n°6 - "Serpents" de quelques thèmes étudiés

4-3-2 Utilisation de la procédure "Loterie"

Les bases théoriques en ont été développées par ailleurs (ORSTOM, 1978). Rappelons qu'il s'agit d'une méthode de traitement des données permettant la combinaison des valeurs numériques de 2 ou 3 canaux simultanément.

Dans le cas de l'image étudiée, nous disposons déjà du canal A qui est une "fusion" des canaux 6 et 7. De plus, nous avons vu que le canal 4 est inutilisable ; nous avons donc construit une "Loterie" entre les canaux A et 5 (cf. fig. n° 7). Le canal A est découpé en 8 classes ($i = 0$ à 7) et le canal 5 en 6 classes ($j = 0$ à 5) ; on obtient $6 \times 8 = 48$ lots numérotés L_{ij} .

L'intérêt du découpage en lots apparaît bien dans l'exemple suivant (cf. fig. n° 7) :

- dans le canal A, la classe 5 correspond aux sols à croûte gypseuse, aux sols limoneux et aux sols des steppes sableuses dégradées
- dans le canal 5, la classe 2 correspondrait à l'ensemble des sols gypseux
- à l'intersection des deux, le lot 5.2 correspondrait donc aux sols à croûte gypseuse exclusivement.

Cependant, l'insuffisance du nombre des données de type "Mitraillette" n'a pas permis d'attribuer un contenu à chacun des lots et cet essai de "Loterie" n'a pu être appliqué à l'ensemble de la zone à cartographier. De toute façon, il ne saurait être appliqué aux parties montagneuses de la zone où la réflectance varie très fortement en fonction de la seule exposition, les autres variables (sols ou végétation) étant masquées.

Cet échec partiel est dû à plusieurs facteurs :

- la faible dynamique de l'image : malgré la grande netteté des documents photographiques, l'enregistrement choisi ne présente pas une gamme de valeurs numériques intéressante ; il est donc pauvre en informations. Ceci explique les difficultés à obtenir des dégradations dont le contenu soit assez précis.

CANALS

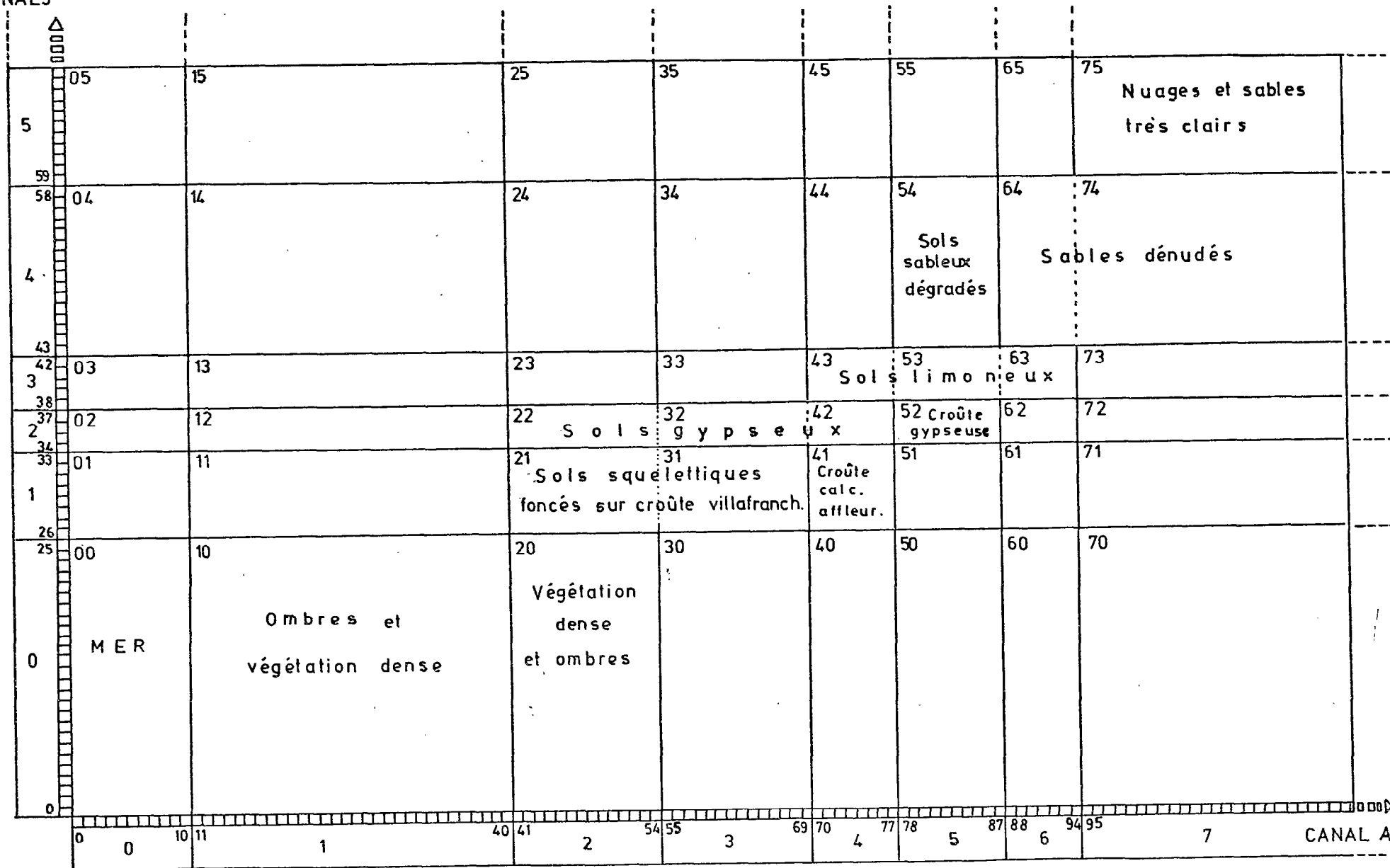


Fig. n°7 Essai de Loterie (voir texte)

- le manque de données de terrain adaptées : les thèmes recherchés sont les sols, mais en fait nous ne disposons pas d'informations sur l'aspect de la surface de ces sols qui seul détermine réellement les valeurs de réflectance observées (cf. 5).
- les difficultés liées à l'organisation d'un travail par correspondance où les échanges subissent la lenteur du courrier et où l'utilisateur a donc beaucoup plus de difficultés à faire comprendre ses besoins que lorsqu'il dialogue avec les techniciens ou avec l'ordinateur.

De ce travail se dégagent néanmoins des enseignements généraux qui seront très utiles pour les développements ultérieurs de ce programme.

5 - CONCLUSIONS - PERSPECTIVES

L'apport de l'utilisation des documents photochimiques permettant une vue d'ensemble, le recalibrage et l'harmonisation des documents existants nous a été précieux et irremplaçable dans les régions où il n'existe pas de couverture par photographies aériennes. L'interprétation de ces données reste néanmoins assez qualitative et classique.

Seul le recours aux traitements numériques peut permettre d'exploiter à fond la richesse des données multispectrales. Ils nécessitent un étalonnage ou apprentissage préalable à partir de données de terrain. Or, l'expérience faite ici a montré que les données de terrain extraites des cartes pédologiques sont largement insuffisantes, même si elles sont interprétées en termes plus physiques ("siérozem tronqué" interprété en "sols limoneux", par exemple). Il faut avoir des renseignements sur la végétation qui influence la réponse spectrale dès que son recouvrement atteint 30 %, et surtout sur la surface du sol.

En effet, les travaux menés dans le cadre de l'expérience ARZOTU dans le Sud tunisien et d'autres travaux plus généraux sur la réflectance des sols nus ont montré que celle-ci dépend exclusivement de l'état de la surface des sols, particulièrement de l'existence d'un microrelief, de croûtes ou pellicules de battance, de dépôts sableux (LONG et al., op. cité ; CELIS-GEUSTER, 1980 ; CIPRA et al., 1980).

Une nouvelle conception des enquêtes sur le terrain s'est donc avérée nécessaire, et c'est pourquoi la méthode de description de la surface du sol que nous avons mise au point par ailleurs a été conçue pour pouvoir s'appliquer aussi bien aux études agronomiques, pédologiques ou hydrologiques, qu'aux observations de type "vérité-terrain" (ESCADAFAL, 1981).

Elle est basée sur la cartographie de "parcelles-échantillons" de 8 m x 4 m dont les composants sont décrits à l'aide d'une fiche originale exploitable par des moyens informatiques. La couche supérieure du sol y est décrite en insistant particulièrement sur la surface elle-même, dont les propriétés peuvent être très différentes de celles du matériau sous-jacent ; ainsi les croûtes de battance, par exemple, ont une porosité et une couleur particulières.

Les variables prises en compte, parmi les plus intéressantes pour la télédétection, sont la texture, la structure, la couleur à l'état sec et humide, le microrelief et le taux de recouvrement végétal. Il est ainsi possible d'interpréter les données de télédétection obtenues sur un même sol à l'état humide ou sec, battant ou labouré. Pour compléter ces observations directes, un dispositif de prises de vues à la verticale permet de photographier l'ensemble de la "parcelle-échantillon" ; en utilisant différentes émulsions combinées à différents filtres, on peut même obtenir des photographies multispectrales (POUQUET, 1976).

Des essais de photographies stéréoscopiques ont d'ores et déjà été tentés avec succès.

* * * * *

Le premier essai d'application de la télédétection à la cartographie des sols du sud de la Tunisie tenté dans ce travail modeste dans ses moyens et ses buts nous a néanmoins permis de définir les principes de son utilisation future pour la cartographie des autres feuilles de cette région où les images LANDSAT sont les seuls documents disponibles, en dehors de cartes géologiques générales et de cartes topographiques anciennes.

L'étude des produits des traitements photochimiques constitue une première étape indispensable, mais seuls les traitements numériques permettront d'obtenir des cartes correspondant à certains thèmes utilisés pour le classement des sols. Parmi ceux-ci, la nature et la texture de la couche meuble devraient pouvoir être facilement détectés après étalonnage par des observations de terrain adaptées.

Pour tester la validité de la démarche proposée, une expérimentation sur une zone pilote sera indispensable. Elle devra comprendre la description des sols et de leur surface sur fiche complétée par des photographies réalisées au moment où le satellite LANDSAT enregistre les données de la zone. L'échelle de travail étant extrêmement différente, des observations à une échelle intermédiaire, par avion ou plus économiquement par ballon ou cerf-volant (DUDON, 1980), seront nécessaires. Ces observations seront faites à plusieurs époques de l'année pour cerner les différents états des sols (sec ou humide, labouré ou battant, végétation couvrante ou non . . .). Cela suppose une infrastructure importante sur le terrain avec une équipe de chercheurs thématiques, et des échanges très intenses et fréquents avec les responsables et les techniciens du Bureau de Télédétection (vidéocassettes, courrier, visites).

L'ensemble des informations ainsi collectées sur cette zone pilote, qui devra couvrir une surface d'environ 15 x 15 km, permettra de préciser les relations suivantes :

Nature et état	_____	Nature et état	_____	Propriétés
du milieu		de la surface du sol		spectrales

La connaissance de ces dernières fera faire de grands progrès à l'exploitation des données de la télédétection spatiale en vue de la cartographie thématique automatisée des zones arides de la Tunisie.

B I B L I O G R A P H I E

- CELIS-GEUSTERS (A. M.), 1980. - Ground truth radiometry (Exotech) on bare and overgrown belgian soils. Pédologie, 30 (1), p. 43-66.
- CIPRA (J. E.), FRANZMEIER (D. P.), BAUER (M. E.), BOYD (R. K.), 1980. - Comparison of multispectral measurements from some non-vegetated soils using Landsat digital data and spectroradiometer. Soil Sci. Soc. Am. J., 44, p. 80-84, bibl.(14 réf).
- DA COSTA (L. M.), 1980. - Surface soil color and reflectance as related to physico-chemical and mineralogical soil properties. Th. Ph. D., Univ. Miss. Columbia, 1979 ; 8024350.
- DUDON (M.), 1980. - Manuel de photographie aérienne par ballons et cerf-volants. C.R.M.A.A. Contrat n° 77.73.023.00.202.75.01 Nantes, rapport multicopié, 37 p. + annexes, 36 fig.
- ESCADAFAL (R.), 1979. - Contribution à l'étude des ressources en sols de la plaine des Ababsas (Médenine). Etude n° 542, ORSTOM - DRES, Tunis 49 p. + annexes (19 p.), bibl. (3 p.), 2 cartes.
- ESCADAFAL R.), 1980. - Compte-rendu de stage au Bureau de Télédétection de l'ORSTOM. ORSTOM, Tunis, 21 p., bibl. (7 réf.).
- ESCADAFAL (R.), 1981. - L'étude de la surface du sol dans les régions arides. Recherches méthodologiques. ES n° 187, ORSTOM - DRES, Tunis, 64 p. bibl. (11 p.).
- ESCADAFAL (R.), MTIMET (A.), 1981. - Carte des ressources en sols au 1/200 000^{ème}, feuille de Médenine. A paraître.

- FLORET (Ch.), PONTANIER (R.), 1978. - Relations climat-sol-végétation dans quelques formations végétales spontanées du Sud tunisien, (production végétale et bilan hydrique des sols). Ministère de l'agriculture ; DRES, Tunis et IRA, Médenine. CEPE, Montpellier. PNUD. ORSTOM, mission en Tunisie. Document technique n° 1, 96 p. multig. + annexes, bibl. (7 p. $\frac{1}{2}$).
- GIRARD (M. C.), GIRARD (C. M.), 1977. - Télédétection de la surface du sol. A.I.S.S., 1^{er} colloque "Pédologie et Télédétection", Rome, p. 55-64.
- HAMZA (A.), 1979. - Rapport d'information sur la création d'un laboratoire de télédétection à la division des sols. ES n° 160, DRES, Tunis, 11 p. + bibl. (14 p.) + 2 tableaux.
- HAMZA (A.), 1980. - La télédétection, principes, méthodes et applications. Le cas de la Tunisie (rapport de stage aux U.S.A.). ES n° 168, division des sols, Tunis, 104 p. + bibl. (4 p.).
- LONG (G.), DEBUSSCHE (G.), LACAZE (B.), LE FLOCH (E.), PONTANIER (R.), 1978.- Contribution à l'analyse écologique des zones arides de Tunisie avec l'aide de données de la télédétection spatiale. Expérience ARZOTU, rapport final 1975-1978. C.E.P.E. Louis Emberger, INRA Tunisie, ORSTOM, CNES, Montpellier. 220 p., 19 fig. et tabl., bibl. (10 p.).
- MTIMET (A.), 1980. - Application des images-satellites à la cartographie des sols de la feuille de Médenine. DRES, division des sols, Tunis, ES n° 180, 14 p.
- MTIMET (A.), 1981. - Rapport de stage de Télédétection à l'ORSTOM. Bondy. DRES, division des sols. (13 p.).
- ORSTOM, 1978. - Analyse multivariante. Procédure "Loterie". Application à l'analyse multispectrale en télédétection. Télédétection 2, initiations-documents techniques n° 39, ORSTOM, Paris, 77 p.

POUQUET (J.), 1976. - ~~Techniques d'utilisation des enregistrements de télé-~~
détection "à la portée des débutants". Apports de la télédétection
à l'étude des régions arides et subarides. Journée d'étude du 9 avril
1976, comité national de géographie, université Louis Pasteur, Stras-
bourg, p. 21-33.

ROUATBI (R.), 1967. - Contribution à l'étude hydrogéologique du karst enterré
de Gabès-Sud. Thèse Montpellier, juin 1967, 1 vol. 235 p. + 1 vol.
annexes.

UNESCO, 1970. - Carte géologique de la Djeffara au 1/200 000^{ème}. Etude des
ressources en eau du Sahara septentrional. Projet UNESCO UNOP, Gabès.