

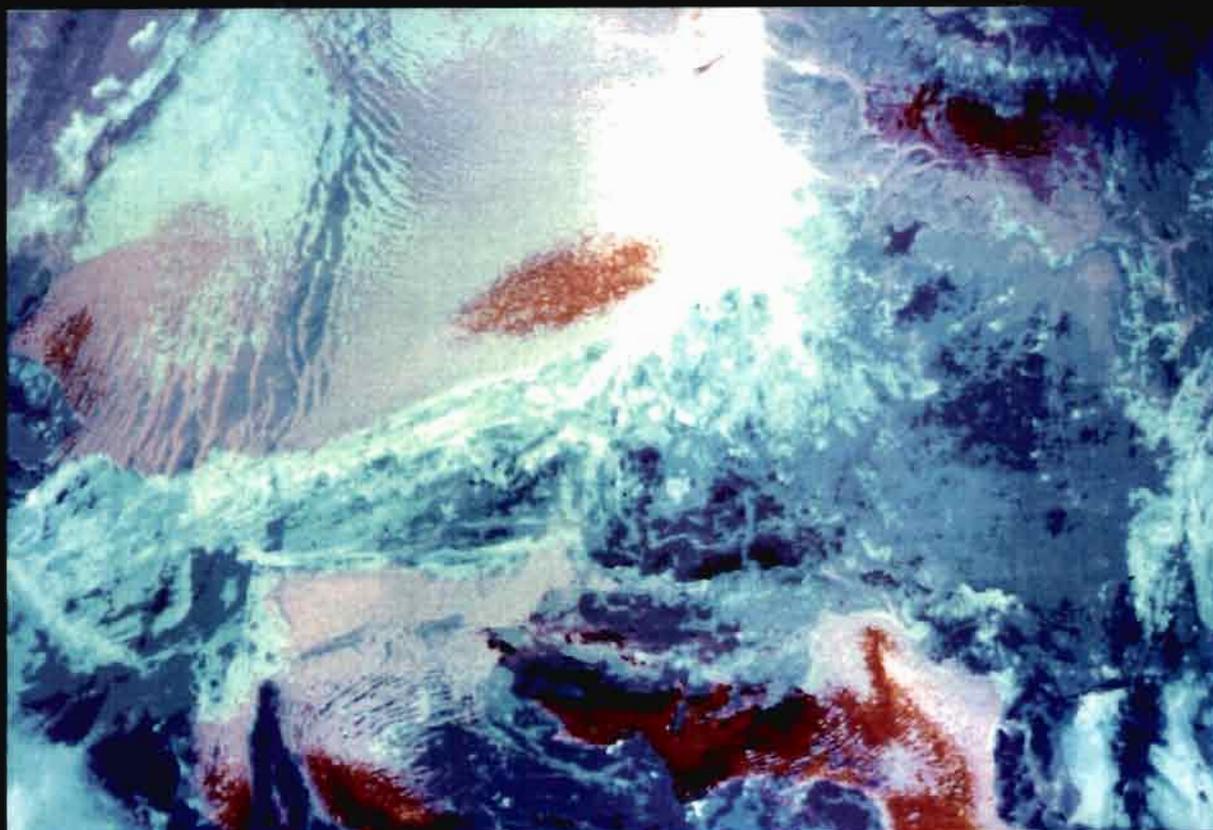
C.N.R.S.

PIREN

Action Thématique Programmée  
**AEROSOLS DESERTIQUES**  
1986-1988

Projet

*Téledétection  
des zones potentiellement  
sources d'aérosols désertiques  
en région péri-saharienne*



**RAPPORT FINAL**

présenté par RICHARD ESCADAFAL

Centre ORSTOM  
Laboratoire d'Informatique Appliquée - Unité de télédétection  
93143 - BONDY CEDEX

**Photographie de couverture:**

Image Nimbus-CZCS du centre sud de l'Algérie.  
Les ergs apparaissent en rouge et orangé  
(voir planche 5 et commentaires dans le texte)

DOCUMENTATION  
MAISON DE LA TELEDETECTION  
500, rue J.F. Breton  
34093 MONTPELLIER CEDEX 5

**C.N.R.S.**

**PIREN**

Action Thématique Programmée  
**AEROSOLS DESERTIQUES**  
**1986-1988**

## **Projet**

***Téledétection  
des zones potentiellement  
sources d'aérosols désertiques  
en région péri-saharienne***

## **RAPPORT FINAL**

**présenté par RICHARD ESCADAFAL**

Centre ORSTOM  
Laboratoire d'Informatique Appliquée - Unité de télédétection  
93143 - BONDY CEDEX

## TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION .....	2
1.1 RAPPEL des OBJECTIFS .....	2
1.2 DEROULEMENT DES TRAVAUX.....	4
2. UTILISATION de DONNEES LANDSAT Thematic Mapper .....	7
2.1 MISE AU POINT METHODOLOGIQUE SUR UN TERRAIN CONNU	
LE SUD TUNISIEN .....	7
2.1.1 Méthodologie .....	8
2.1.1.1 Observations de terrain.....	9
2.1.1.2 Traitement des données Landsat TM.....	9
2.1.2 Résultats .....	10
2.2 APPLICATION A UNE REGION PERIDESERTIQUE PEU CONNUE	
la bordure nord-ouest du Grand Erg occidental.....	13
2.2.1 Méthodologie .....	13
2.2.2 Résultats .....	19
3. COULEUR ET PROPRIETES SPECTRALES DES SOLS .....	22
3.1 Eléments de colorimétrie.....	23
3.2 Modélisation de la relation couleur-réfectance.....	24
3.2.1 Le métamérisme .....	24
3.2.2 Modèle expérimental .....	26
3.3 Discussion .....	28
4. TELEDETECTION DE LA COULEUR DE LA SURFACE DES SOLS .....	29
4.1 Application aux données Landsat TM.....	29
4.2 Teledetection de la couleur du sahara.....	30
5. CONCLUSION.....	33
6. BIBLIOGRAPHIE CITEE .....	35
7. PUBLICATIONS DANS LE CADRE DU PROJET.....	37
7.1 Communications.....	37
7.2 Articles publiés.....	37
7.3 Articles acceptés.....	38
7.4 Articles en préparation .....	38
7.5 Rapports.....	38

# 1. INTRODUCTION

## 1.1 RAPPEL DES OBJECTIFS

L'étude des aérosols désertiques englobe de nombreux aspects géologiques et atmosphériques, depuis la mise en suspension des particules arrachées à la surface des sols, en passant par leur transport, puis leur dépôt.

Des modèles tentent de prendre en compte tous ces aspects pour pouvoir prédire la circulation de ces particules au niveau des couches atmosphériques considérées au niveau global, et leurs effets climatiques.

Parmi les nombreux paramètres nécessaires à l'élaboration de modèles réalistes, la localisation et la nature des zones sources est un des moins bien connus.

En résumant de façon un peu brutale, on peut dire que la surface des sols alimente l'atmosphère en aérosols lorsque deux conditions au moins sont réunies :

- la surface du sol est peu cohérente ou facilement "abrasible" sous l'action du vent, composée non exclusivement de particules assez fines, non ou peu liées entre elles,
  
- des phénomènes climatiques locaux particuliers créent des vents aptes à soulever ou arracher les particules puis les injecter dans l'atmosphère.

La composition des surfaces d'une région est un caractère relativement permanent, alors que l'état en varie selon les saisons.

Ainsi, l'état hydrique dépend des précipitations et de la situation topographique. Le degré d'agrégation peut être modifié par les activités humaines (pulvérisation de la surface par les labours, piétinement par les animaux d'élevage, p.ex.).

Par contre, la composition minéralogique et l'aptitude à se désagréger sous l'action des éléments naturels (dessiccation, vent) varient peu.

Cependant, il n'existe pas à l'heure actuelle de document cartographique indiquant la composition et la répartition des différents types de surfaces dans les régions désertiques fournissant habituellement des aérosols.

Dans ce domaine aride notre équipe a déjà acquis une expérience de cartographie des formations superficielles à l'aide de données MSS Landsat, en Tunisie présaharienne (ESCADAFAL, 1984 ; POUGET et al., 1984).

Ces travaux ont montré qu'il est possible d'obtenir à partir de données satellitaires des informations sur l'état de la surface des sols, en particulier la rugosité, la couleur et la présence de végétation verte.

Nous avons donc proposé à l'ATP un programme de recherche méthodologique sur l'utilisation de la télédétection spatiale pour caractériser *les zones potentiellement sources d'aérosols*.

Pour cela nous nous proposons de caractériser les états de surface d'une région et d'en déduire leur aptitude à fournir des particules lorsque les conditions météorologiques favorables sont réunies.

## 1.2 DEROULEMENT DES TRAVAUX

Le projet a été initialement prévu avec deux zones d'études :

- une zone d'étude détaillée des types de surface à l'aide de données de télédétection à haute résolution spatiale, en Tunisie et en bordure de l'erg occidental en Algérie,
- une zone d'étude à plus petite échelle, au sud du Sahara, à l'aide de données Météosat.

Compte tenu du fait que, d'une part, Yveline PONCET, la responsable de cette deuxième partie, a été entre-temps appelée à des tâches qui l'ont accaparée (direction d'une unité de recherches) et que d'autre part, les crédits qui nous ont été alloués nous ont obligé à réviser notre projet en baisse, nous avons décidé de concentrer nos efforts sur la zone nord-africaine (voir planche 1).

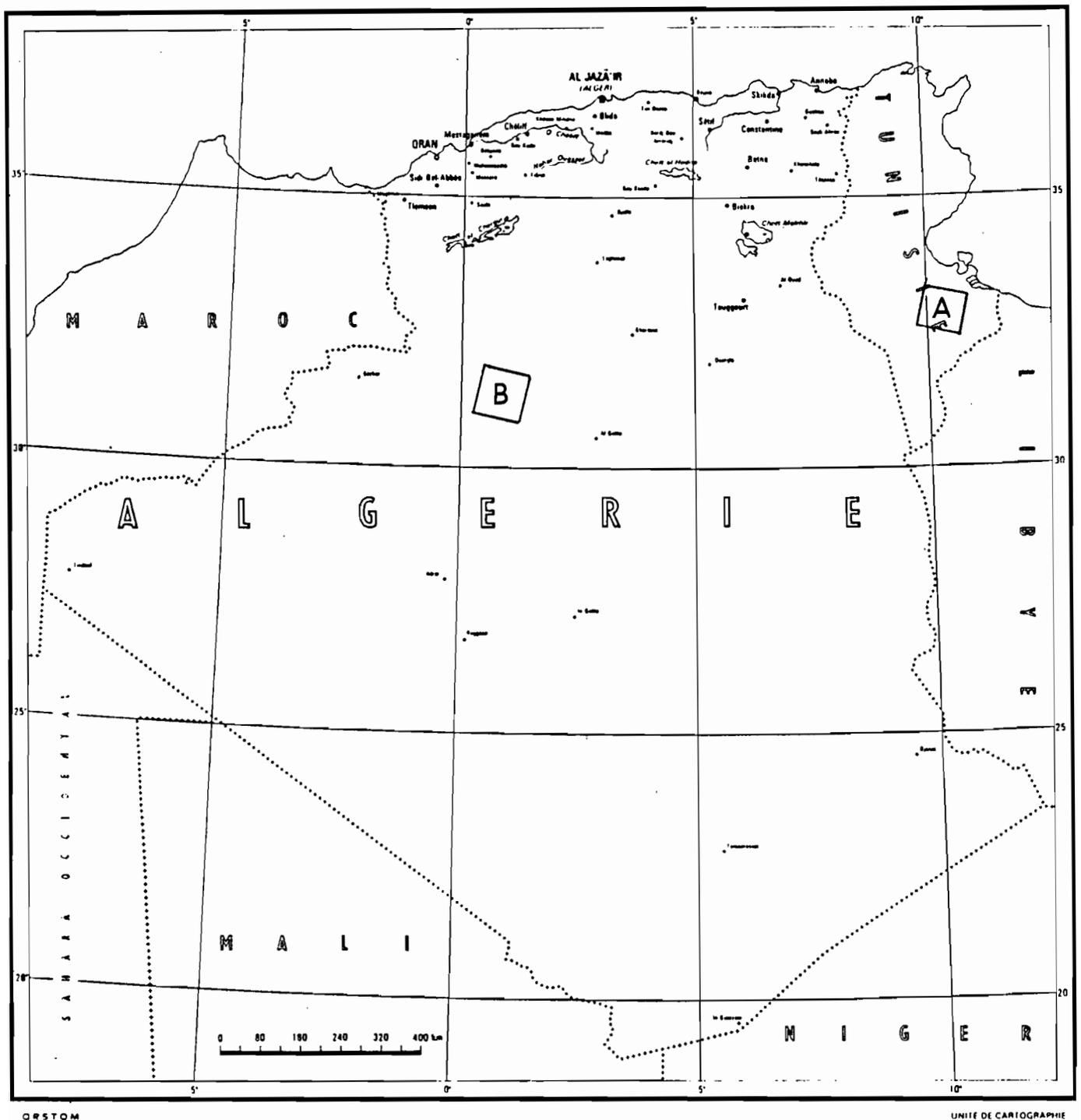
Si donc Y.PONCET et A.FOURNET n'ont pas pu participer au projet, nous avons par contre reçu le renfort de A.M. ABDEL-HADY, maître assistant à l'Université d'Alexandrie. En effet, dans le cadre d'une bourse post-doctorale allouée pour parachever ses travaux dans le laboratoire du Professeur P.ROGNON, M. ABDEL-HADY a effectué l'étude statistique des données Landsat TM sur le grand Erg occidental en Algérie.

Nous avons également bénéficié dans ce travail des discussions avec MM. P.ROGNON et Y.CALLOT, qui nous ont fait part de leur expérience de terrain et de leurs connaissances sur la zone étudiée en Algérie.

L'étude des données Landsat TM sur le Sud tunisien a été réalisée en collaboration avec M.POUGET, responsable de l'Unité de télédétection du L.I.A.. L'ensemble des traitements présentés dans ce rapport ont été réalisés dans ce laboratoire avec l'assistance de A.AING, N.DELARBRE, M.T. MIGUET, I.RANNOU, M. RAKOTO-RAVALONTSALAMA, L.ZURETTI.

Les recherches sur la colorimétrie appliquée aux sols ont été menées en collaboration avec M.C. GIRARD et D. COURAULT (laboratoire des sols, Institut National Agronomique Paris-Grignon). Dans ce domaine, les conseils de B.CERVELLE (laboratoire de Minéralogie cristallographie des Universités Paris 6 et 7), M. PODAIRE (LERTS, Toulouse) et de F.M.SCHMITT (Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications) nous ont été précieux.

Enfin, les données Nimbus CZCS nous ont été communiquées par Y.THOMAS (laboratoire de Géographie de l'E.N.S., Montrouge) qui a participé à l'interprétation de ces données.



**Figure 1.**

Carte de situation des deux zones étudiées avec Landsat Thematic Mapper.

A: Sud tunisien, bordure est de l'Erg oriental ; B: Algérie, bordure ouest de l'Erg occidental.

## **2. UTILISATION de DONNEES LANDSAT Thematic Mapper**

### **2.1 MISE AU POINT METHODOLOGIQUE SUR UN TERRAIN CONNU : LE SUD TUNISIEN**

Dans la première étape de ce travail nous avons testé l'intérêt des données du Thematic Mapper de Landsat pour la caractérisation de l'état de surface des sols dans une région que nous avons déjà étudiée de ce point de vue sur le terrain.

En effet, en Tunisie, la Direction des sols du Ministère de l'Agriculture a entrepris en 1979 la constitution d'un atlas des ressources en sols à l'échelle du 1/200 000. Dans la partie méridionale du pays, les données disponibles étaient rares et bien des zones difficiles d'accès. Un programme de cartographie de reconnaissance des sols assistée par télédétection spatiale a été alors mis sur pied en 1981 (POUGET et al., 1984).

Ces travaux ont montré que l'on peut obtenir par traitement des données Landsat MSS des informations sur la surface des sols. En effet, dans ces paysages présahariens la végétation steppique est très lâche et généralement peu active. Le capteur du satellite mesure donc des luminances qui dépendent essentiellement de la composition et de l'état de la surface des sols. Elles varient peu à une échelle pluriannuelle dans ces régions arides exploitées par un pastoralisme extensif.

Une analyse fine des relations entre sols, composition de leur surface, végétation et données radiométriques a mis en évidence l'intérêt des canaux visibles du MSS (ESCADAFAL et POUGET, 1986). Les valeurs des canaux 4 et 5 croissent simultanément en fonction de la brillance de la surface, mais celle-ci est souvent réduite par l'effet d'ombrage dû aux cailloux et aux blocs ou encore aux touffes de végétation sèche (rugosité au sens large).

Parallèlement, le rapport entre MSS4 et 5 diminue assez sensiblement lorsque la couleur de la surface des sols est plus saturée (c.à d. plus rougeâtre pour le cas des sols observés).

En se basant sur ces constatations, il a été possible de discriminer 16 types d'états de surface différents d'après leur rugosité et leur couleur.

Cependant cette étude a aussi montré les limitations inhérentes à la nature des données. En premier lieu, la résolution au sol du capteur MSS ne permet pas de se repérer facilement sur les images. Il a donc fallu constamment recalculer la position des observations au sol repérées par d'autres méthodes (triangulation à la boussole, notamment).

Un deuxième point concerne la difficulté à distinguer les surfaces gypseuses des autres matériaux peu colorés (limons battants, sables grossiers..), dont le comportement radiométrique dans le visible est souvent très voisin. Les informations contenues dans les cartes géologiques permettent de trancher dans le cas des roches affleurantes, mais ceci est insuffisant pour lever toutes les confusions possibles.

Cette expérience nous a incité à tester sur la même région les possibilités offertes par la nouvelle génération de capteurs en abordant l'étude des données du Thematic Mapper, dont l'intérêt pour les zones arides a déjà été souligné (MULDERS et EPEMA, 1986).

### **2.1.1 Méthodologie**

Nous avons choisi, à l'est de la ville de Tataouine, une zone test présentant une forte hétérogénéité. Elle est composée de reliefs et glacis façonnés dans des formations triasiques où dominant les gypses avec des intercalations de calcaires dolomitiques.

Ce paysage est creusé localement de petites dépressions (dollines) le plus souvent cultivées au printemps, il est envahi par des sables éoliens. Il en résulte une juxtaposition de matériaux de couleur, de faciès et de nature très variés (gypse, calcaire et quartz).

### ***2.1.1.1 Observations de terrain***

Suivant la méthode développée et appliquée lors de l'étude des données MSS (ESCADAFAL, 1981), nous avons repéré très précisément au sol un ensemble de 48 sites tests constituant un échantillon représentatif des différents ensembles sol-surface-végétation caractéristiques de la zone.

Chaque site test est défini par sa position (unité morphologique), la nature de son sol et l'organisation de sa surface (au sens large). Celle-ci est décrite en mesurant le pourcentage en recouvrement occupé par les différents composants : sol nu, sables, graviers, cailloux et pierres, débris, végétation. Chaque composant est décrit séparément : nature, couleur, état. Des photographies des fosses pédologiques et des échantillons de surface complètent ces relevés.

On obtient ainsi une caractérisation du milieu tel qu'il apparaît vu à la verticale et en particulier par les satellites. En choisissant des sites tests suffisamment étendus et homogènes, ils correspondent à un nombre assez important de pixels pour étudier les relations entre données terrain et luminances spectrales sous un angle statistique.

### ***2.1.1.2 Traitement des données Landsat TM***

L'image utilisée a été acquise le 5 août 1984 ; à cette période de l'année la végétation est à l'état sec et peu abondante après avoir été pâturée au printemps.

Une première visualisation globale a été faite sous la forme de compositions colorées en réalisant sur une console vidéo couleur interactive (Péricolor 1000) différentes combinaisons de canaux.

Deux modes principaux ont été utilisés, le mode "standard" ou "fausses couleurs" associant les canaux 2,3 et 4 (équivalents aux canaux MSS 4, 5 et 7) et le mode associant les canaux visibles 1 et 3 au canal 7 (infrarouge moyen). Les limites des sites tests y ont été repérées et intégrées à ces images.

L'analyse statistique générale de la distribution des valeurs dans les six canaux étudiés a eu pour but de cerner la qualité de l'information contenue dans chacun d'eux : dynamique et corrélations entre canaux (le canal 6, dans l'infrarouge thermique, n'a pas été pris en considération).

L'analyse statistique détaillée des valeurs de luminance observées dans les sites tests a été conduite en comparant les sites entre eux par les méthodes multivariées, puis les relations entre ces valeurs et la composition de chaque type de sites.

Suite à ces analyses, l'interprétation de la distribution relative des différents thèmes dans l'espace des données TM a permis de définir les centres des classes qui leur correspondent. Utilisant une classification basée sur la méthode barycentrique, nous avons enfin tracé une carte des principaux types de surface de la partie de l'image couvrant la zone test (512x512 pixels soit 15x15 km environ).

### **2.1.2 Résultats**

Contrairement à l'image MSS, on reconnaît sur l'image TM les pistes principales et secondaires (grâce à leur fort contraste avec leur contexte), le cours précis des oueds, les formes de relief remarquables (petites buttes témoins, p.ex.). Nous avons donc parfaitement pu nous y repérer, positionner les sites tests avec précision et identifier les formes caractéristiques du modelé comme on peut le faire sur une photographie aérienne à l'échelle du 1/50 000.

L'étude des relations entre canaux a montré que, comme dans le cas des données MSS, les valeurs des canaux rouge (3) et proche infrarouge (4) sont très corrélées ; ceci est lié à l'absence de végétation verte.

Les canaux 1 et 3 sont par contre nettement moins redondants. Les valeurs du canal 5 présentant une troncature par saturation n'ont pas pu être prises en compte. Le canal 7 enfin, apporte une information très différente de celles des canaux visibles, avec lesquels il est très peu corrélé.

L'analyse statistique détaillée a montré que pour les canaux 2,3 et 4 on retrouve exactement les mêmes relations entre composition des surfaces et luminance spectrale que dans le cas des canaux MSS 4,5 et 7. Les mesures enregistrées dans ces canaux sont directement en relation avec la brillance, la rugosité et surtout la couleur des surfaces.

Grâce au nouveau canal TM1, dont la bande spectrale est centrée sur le bleu vert et donc complémentaire des deux autres (jaune orangé et rouge), cette perception des couleurs est fortement améliorée. Suivant le principe de la trichromie, il devient en effet théoriquement possible de distinguer une gamme de couleurs variées.

En ce qui concerne les sols, leur couleur de surface ne varie ici que dans la gamme des bruns jaunes aux bruns rouges (10 YR à 5 YR du système Munsell). Cependant, on constate que le contraste entre ceux dont la couleur est assez saturée (chroma ou pureté relativement élevée) et les autres, apparaît encore plus nettement dans le rapport TM1/TM3 que dans celui précédemment utilisé (MSS4/MSS5). Il est ainsi possible de distinguer aisément les surfaces des sols d'après leur couleur suivant qu'elle est plus ou moins saturée, des teintes rougeâtres aux grises, en passant par les beiges.

La couleur des sols étant un des critères de diagnostic les plus spontanément et le plus couramment utilisé par les pédologues, on perçoit bien ici tout l'intérêt de cette nouvelle bande spectrale.

Ces relations entre couleurs et réponses spectrales dans les canaux visibles seront développées en détail dans le chapitre 3.

Compte tenu des remarques faites sur le canal proche infra-rouge (4), nous ne l'avons pas sélectionné pour la suite du travail. Le canal 7 par contre, spécialement conçu pour répondre à des préoccupations de géologues, s'est révélé apporter des informations sur la nature minéralogique des surfaces. Les relations suivantes ont été observées :

- luminance moyenne à forte dans le visible et faible dans le canal 7 : surfaces à dominante gypseuse,
- luminance faible à moyenne dans le visible et moyenne dans le canal 7 : surfaces à dominante calcaire,
- luminance moyenne à forte dans le visible et forte dans le canal 7 : surfaces à dominante quartzreuse (sables éoliens).

Le choix de la fenêtre spectrale de ce canal 7 (2080 à 2350 nm) n'est pas étranger à cet intéressant résultat, puisqu'elle correspond à la bande d'absorption des groupements hydroxyles. La présence de ces groupements diminue considérablement des sulfates hydratés (gypse), aux carbonates (calcaires et dolomies) puis à la silice (quartz), ce qui explique les variations observées.

En résumé, cet ensemble de résultats a montré que les canaux 1,3 et 7 sont les plus intéressants pour notre étude. Pour chaque groupe de sites tests correspondant à un thème bien individualisé, nous avons identifié les valeurs radiométriques caractéristiques dans chacun de ces trois canaux, pour définir une classification multispectrale de l'image.

**Les résultats de cette étude ont été publiés dans la revue "Photointerprétation et images spatiales" (ESCADAFAL et POUGET, 1987).**

## **2.2 APPLICATION A UNE REGION PERIDESERTIQUE PEU CONNUE : LA BORDURE NORD-OUEST DU GRAND ERG OCCIDENTAL.**

Nous avons cherché à étendre ces résultats obtenus en Tunisie, grâce une validation par des données de terrain précises, à des zones périsahariennes moins connues et fournissant probablement des poussières.

La région choisie comme zone d'application correspond à la bordure nord-ouest du grand Erg Occidental.(fig.1) Cette zone très difficile d'accès est potentiellement source d'aérosols désertiques, de par sa nature, son climat et sa situation (fig 2).

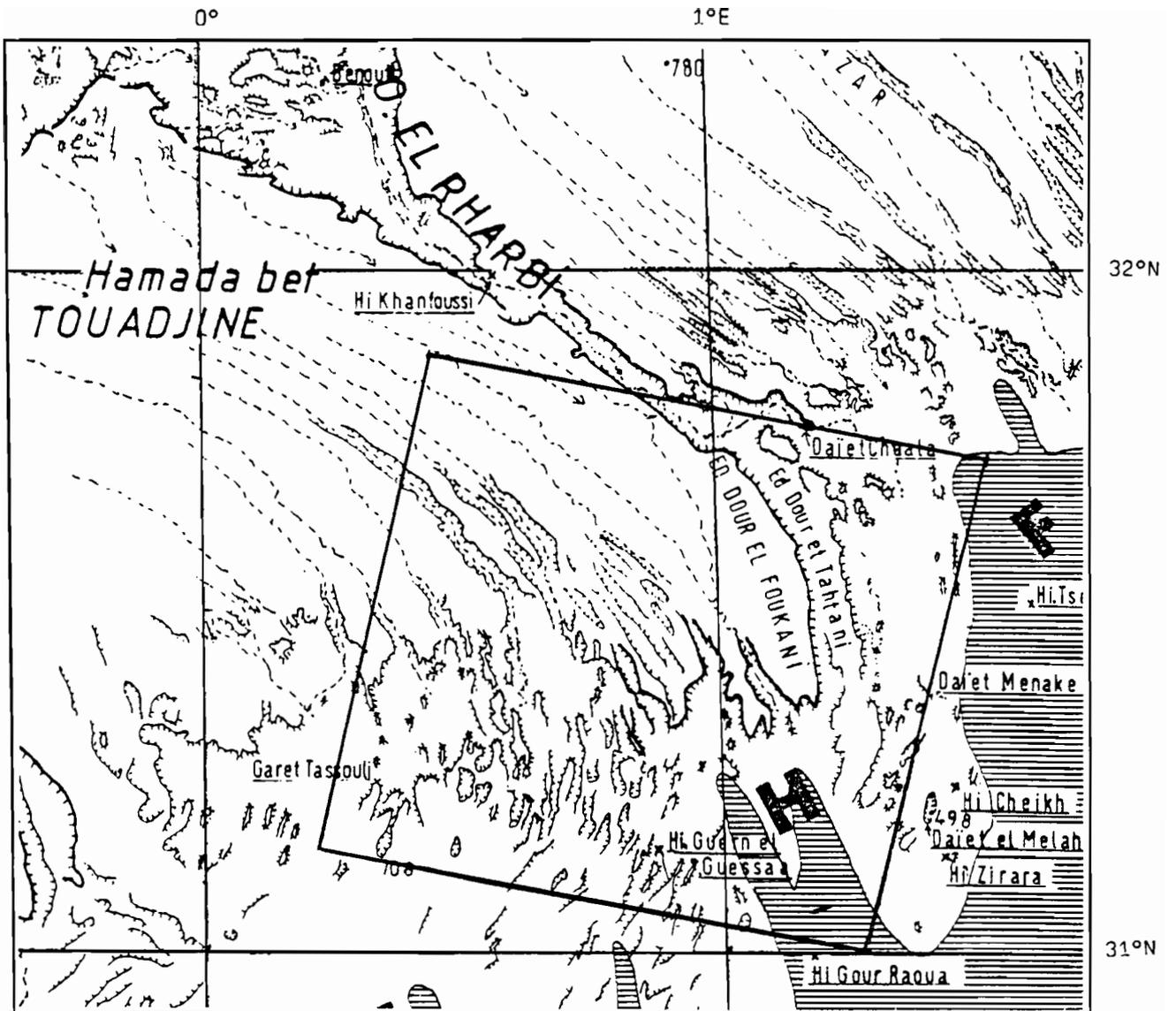
Elle présente l'avantage d'être diversifiée du point de vue des matériaux de surface : hamadas calcaires plus ou moins recouvertes des voiles de sables éoliens, dunes de différents types, paléolacs gypseux, dépressions interdunaires détritiques, dayas argileuses, sebkras (dépressions salées).

La morphologie et les matériaux de cette région ont été étudiée par Y.CALLOT (1987) dans une perspective paléoclimatique. Il n'existe donc pas de carte des matériaux de surface sur cette zone.

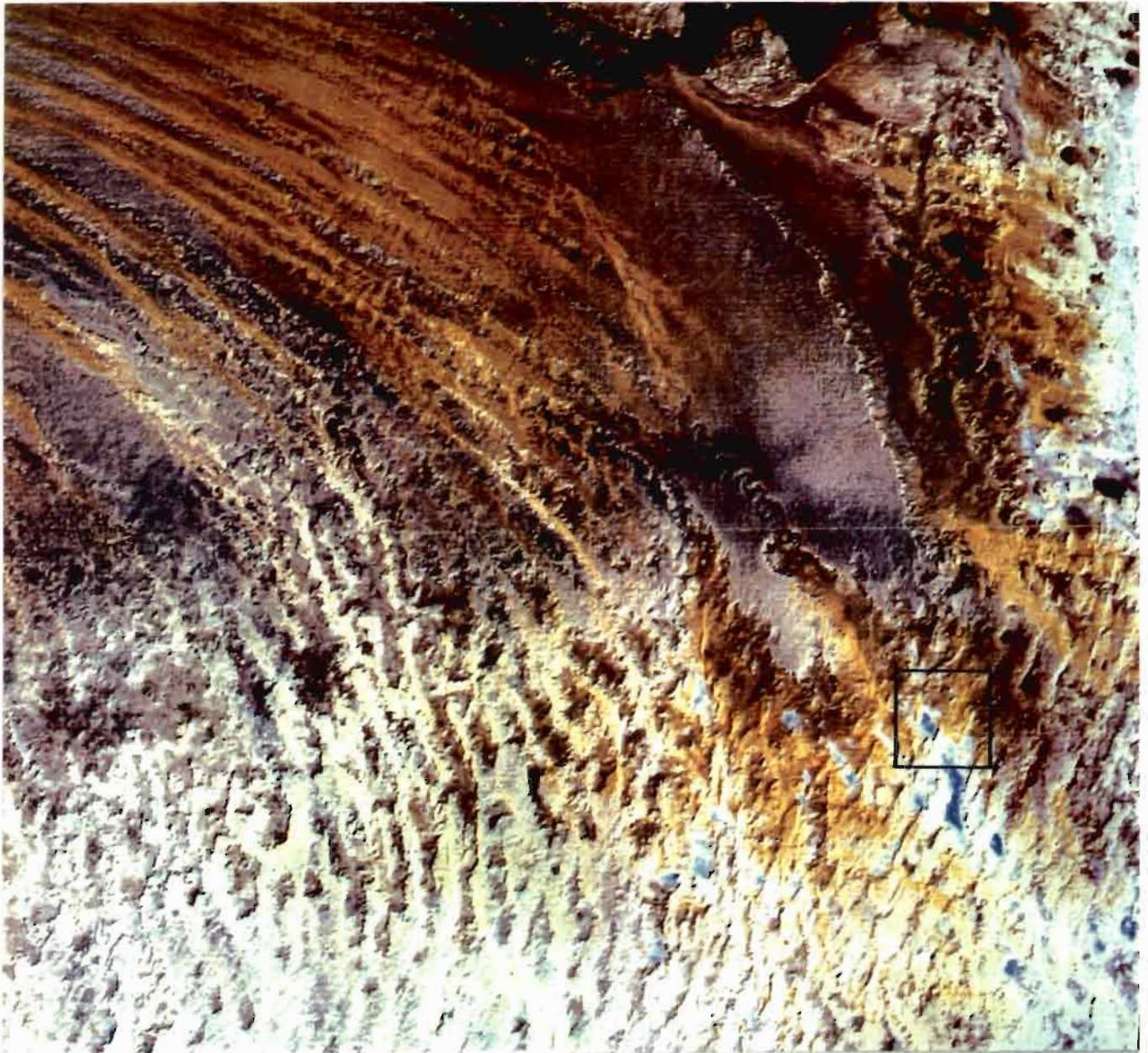
Bien que n'ayant pas la possibilité d'aller sur le terrain, nous avons donc pu vérifier la validité de notre extrapolation des résultats obtenus en Tunisie, en nous basant sur un certain nombre de sites que Y.CALLOT avait observé .

### **2.2.1 Méthodologie**

Dès que nous avons voulu exploiter cette possibilité pour orienter notre travail et les traitements d'image, nous avons été confronté à un important problème de repérage. En effet Y.CALLOT avait traversé cette région en tout-terrain, (il n'y a pratiquement pas de pistes) en se repérant sur les seules cartes topographiques disponibles au 1/200 000. Il ne pouvait donc se repérer sur les seules images.



**Figure 2.**  
 Localisation géographique de l'image Landsat TM  
 étudiée en bordure de l'Erg occidental  
 (voir planche 1 et suivantes).



### **Planche 1.**

**Image Landsat Thematic mapper de la bordure nord-ouest de l'Erg occidental  
(Composition colorée des canaux 1,3 et 7)**

**Mosaïque de tracés sur vidéo-copieur restitués photographiquement  
pour être superposé aux cartes topographiques.**

**Largeur totale couverte par l'image: 90 km**

**Le petit carré matérialise les limites de la zone visualisée sur la planche 2.**

Pour résoudre ce problème nous avons réalisé une composition colorée de l'image Landsat TM acquise, en utilisant les trois canaux les plus intéressants (voir plus haut) à savoir les canaux 1,3 et 7, visualisés en bleu, vert et rouge, respectivement .

Nous avons utilisé pour cela le nouveau matériel disponible à l'unité de télédétection du Laboratoire d'Informatique Appliquée du centre ORSTOM de Bondy (L.I.A.). Les compositions colorées ont été réalisées sur l'écran du Matra-Sun3 en quatre parties couvrant la totalité de l'image et restituées sur vidéocopieur couleur (Théta-scan).

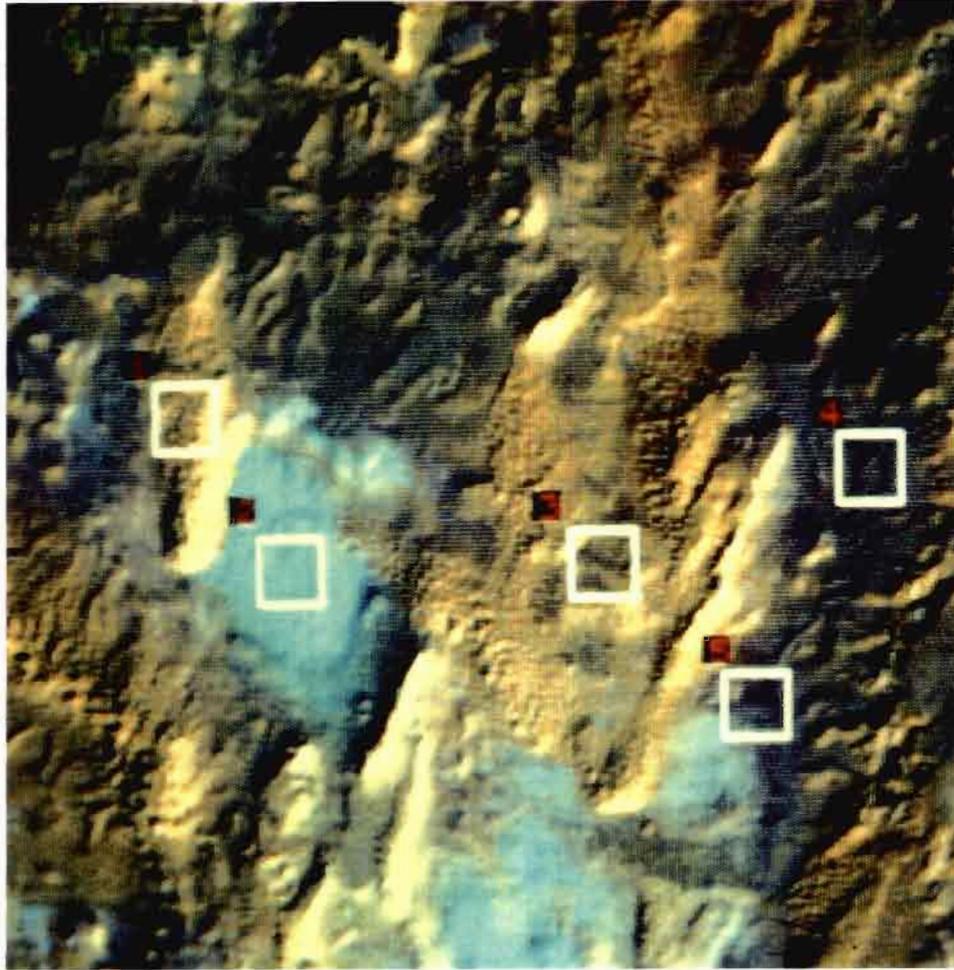
Une mosaïque de ces images à été composée à l'atelier photographique et placée sur un banc de reproduction. La composition colorée de l'ensemble de la zone (90x90 km) a ainsi pu être recalée sur le fond topographique au 1/200 000. Les deux documents, image et carte, ont été produits sur des supports superposables (translucides).

La planche 1 montre cette composition colorée de l'image entière. Toutes les zones-tests ont ensuite pu y être repérées à la fois en coordonnées géographiques en en coordonnées-image (lignes et colonnes).

Cette importante étape de repérage a posteriori, a permis de constituer une série de 53 zones tests parfaitement localisées et identifiées. La planche 2 illustre le cas d'une zone test, visualisée en composition colorée 1,3,7 sur écran Péricolor 1000.

Dans l'image acquise (du 26/11/86) les données de luminance extraites de ces zones ont fait l'objet d'une étude statistique multidimensionnelle (ACP et CAH) pour comparer les regroupements de zones sur les critères radiométriques avec les regroupements thématiques.

Par ailleurs une ACP sur l'image a permis de repérer les grands thèmes exprimés par la radiométrie brute (voir pl. 3).

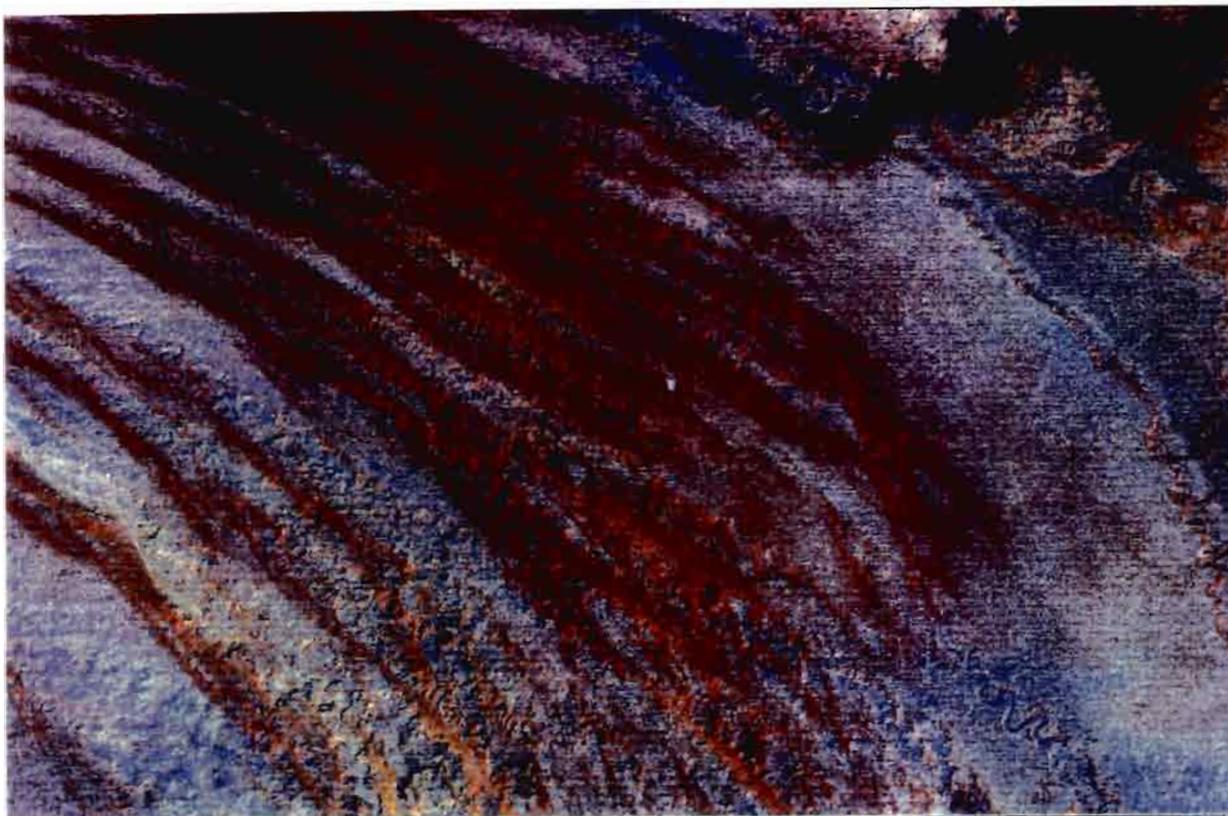


### **Planche 2.**

Composition colorée de zones tests visualisées sur écran Péricolor 1000 (canaux 1,3,7).

Exemple de 5 zones-échantillons utilisées pour l'étude statistique.

- 1: dunes vives (petit aklé) ,
- 2: surface gypseuse (paléolac),
- 3: sable sur calcaire ,
- 4: hamada calcaire,
- 5: transition calcaire-gypse.



### **Planche 3.**

Résultats d'une visualisation des trois premières composantes principales  
(partie nord-est de l'image).

Trois types de matériaux sont distingués par cette décorrélation :

en *rouge* les sables dunaires,

en *bleu* les calcaires nus et les calcaires à voile sableux éolien,

en *vert* les zones humides (oued après une crue).

### 2.2.2 Résultats

Le classement des zones tests d'après la radiométrie a mis en évidence plusieurs ensembles qui peuvent se regrouper en trois tendances suivant les rapport entre visible (canal TM1) et moyen infrarouge (canal TM7).

Ces trois ensembles correspondent exactement à ceux qui ont été trouvés dans le cas du sud Tunisien :

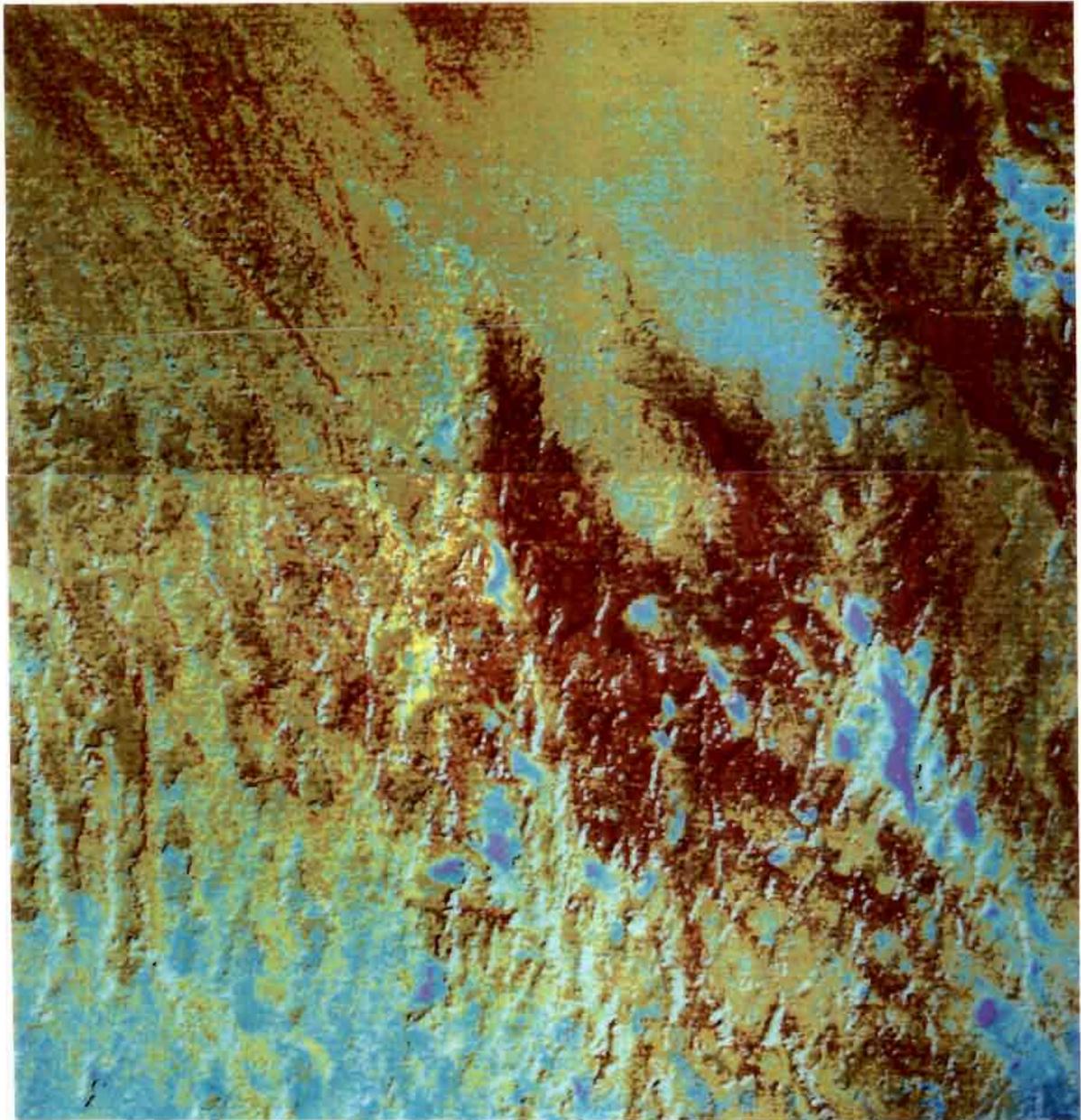
- les zones à luminance forte dans le visible et faible dans le moyen infrarouge correspondent aux paléolacs gypseux, surfaces à dominante gypseuse,
- les zones à luminance faible à moyenne dans le visible et moyenne dans le moyen infrarouge, correspondent aux surfaces calcaires (hamadas),
- les zones à luminance moyenne à forte dans le visible et forte dans le moyen infrarouge correspondent aux sables quartzeux.

A partir de ce résultat nous avons construit une classification de l'image discriminant ces types de matériaux. C'est une simple classification supervisée sur les deux canaux TM1 et TM7, les centres des classes sont les moyennes des luminances de chaque thème (type de matériau), les pixels y sont affectés en fonction de la distance euclidienne (voir planche 4).

Bien entendu ici la rugosité intervient également, comme le montre la légende de cette classification. Cette rugosité est due aux cailloux et aux pierres, ou localement aux touffes de végétation steppique ; elle a pour effet de diminuer les valeurs de luminance.

En plus de ces variations de rugosité, un certain nombre de nuances sont apparues parmi les différentes zones.

Ainsi, des différences observées entre les propriétés spectrales dans le canal 5 et le canal 7 paraissent discriminer certains matériaux. En l'absence de données de terrain sur les zones



#### **Planche 4.**

Classification de l'image Landsat TM de la bordure de l'Erg occidental mettant en évidence les grands ensembles minéralogiques (partie Est).

En *rouge*: le domaine des quartz éoliens (dunes de sable fins) ;

en *beige*: le domaine des voiles sableux sur calcaire,

en *bleu*: les formations carbonatées (hamadas) ;

en *mauve*: les paléolacs gypseux.

Plus la couleur est claire, plus la rugosité est faible

où ces différences ont été constatées, celles-ci n'ont pu être interprétées. Une étude de terrain appropriée permettrait certainement de lever le voile sur ce point.

Dans le domaine visible de fortes contrastes sont apparus également entre les matériaux sableux, certains paraissant plus "rouges" que d'autres, par exemple. Dans ce dernier cas, un lien entre couleur et âge et taille des grains de quartz pourrait exister, comme cela a été mis en évidence dans d'autres régions (EL BAZ, 1978).

Comme nous l'avions souligné dans le cas de l'étude sur la Tunisie, cette influence de la couleur des matériaux de surface nous a paru être un point important à élucider et ceci pour trois raisons au moins :

- dans le domaine visible, par définition, la mesure satellitaire couvre le domaine spectral accessible à l'homme. Les comparaisons entre les deux modes de perception devraient donc en être facilitées,
- la couleur des sols et de leur surface est une donnée très utilisée pour discriminer des matériaux différents sur le terrain ; mais aussi plus récemment au laboratoire (TORRENT et al., 1983). La possibilité de télédétection des différences de couleur est donc très séduisante.
- les satellites à faible résolution spectrale, permettant de couvrir de vastes étendues et avec lesquels nous envisageons d'extrapoler nos résultats, ont des capteurs fonctionnant seulement dans le visible et le proche infrarouge (satellites actuels) .

### 3. COULEUR ET PROPRIETES SPECTRALES DES SOLS

Pour préciser de façon rigoureuse les relations entre couleur et propriétés spectrales des matériaux pédologiques, une étude de laboratoire a été entreprise en collaboration avec M.C. GIRARD et D.COURLAULT de l'INA-PG.

Cet aspect de notre travail a donc dépassé ici le cadre des zones désertiques pour traiter ce point de façon plus globale et obtenir des résultats applicables aux régions arides, mais pas exclusivement.

Comme nous venons de le souligner au chapitre précédent, la couleur du sol est une donnée importante, utilisée depuis les débuts de l'observation des sols.

Depuis les années 50, elle est systématiquement notée par les pédologues au cours de leurs travaux de terrain. Suivant diverses recommandations, ceci est fait par comparaison avec des planches d'échantillons colorés standards, l'atlas Munsell des couleurs de sol (MUNSELL COLOR COMPANY, 1971). La couleur d'un échantillon est ainsi caractérisée par sa teinte (hue), sa clarté (value) et sa pureté (chroma) (voir fig. 1).

Plusieurs auteurs ont cherché des relations entre ces données et la réflectance des sols (SALMON-DREXLER, 1977 ; GIRARD, 1985). Ils ont observé certaines corrélations statistiques, mais le recours aux concepts colorimétriques nous a paru être la seule voie pour mettre en évidence des lois physiques généralisables.

### 3.1 ELÉMENTS DE COLORIMÉTRIE

L'objet de la colorimétrie est d'établir les relations entre perceptions visuelles et caractéristiques physiques des objets et de la lumière qui les éclaire, en spécifiant les conventions et les conditions d'application. Plusieurs traités y sont consacrés (JUDD et WISZECKI, 1975 ; KOWALISKI, 1978 ; WISZECKI et STILES, 1982), nous n'aborderons ici que quelques points essentiels à la discussion .

Un des fondements de la colorimétrie est un ensemble d'équations permettant de calculer, à partir de sa courbe de réflectance visible (380 à 770 nm), la couleur d'un objet sous un éclairage donné (type lumière du jour, par exemple). Par cette méthode on obtient les coefficients trichromatiques  $x,y,z$ , suivant le système défini en 1935 par la Commission Internationale de l'Eclairage (C.I.E.). Les calculs sont détaillés par ailleurs (voir CERVELLE et al, 1977 et ESCADAFAL et al., 1988 ). La précision et la fiabilité de cette mesure est bien supérieure à celle obtenue par comparaison visuelle avec les planches Munsell (ORLOV et al., 1980).

Des tables de conversion permettent de passer, sous certaines conditions standards, du système Munsell au système C.I.E., et inversement (WISZECKI et STILES, 1982). En s'entourant d'un certain nombre de précautions il est possible d'améliorer la précision des couleurs estimées avec le code Munsell (voir MELVILLE et ATKINSON, 1985). Dans ce cas, on observe une bonne corrélation entre couleurs calculées par les équations de la C.I.E. et les couleurs estimées visuellement (SHIELDS et al., 1966 ; FERNANDEZ et SCHULZE, 1987).

Nous avons appliqué cette démarche sur un ensemble de 84 échantillons de sols de provenance variée (sols tempérés, tropicaux et arides). Nous avons obtenu des résultats comparables, sur une gamme de couleurs de sols qui beaucoup plus étendue que celle des auteurs cités (ESCADAFAL et al., 1988a).

## 3.2 MODÉLISATION DE LA RELATION COULEUR-RÉFLECTANCE

La colorimétrie a donc été jusqu'ici appliquée aux sols pour préciser la couleur d'un échantillon d'après sa courbe de réflectance spectrale.

En fait, pour pouvoir interpréter les liens entre données de sol et réflectance il nous a paru beaucoup plus intéressant de chercher à *inverser cette démarche*, en testant la possibilité de calculer ou d'estimer les propriétés spectrales d'un sol d'après sa couleur.

### 3.2.1 Le métamérisme

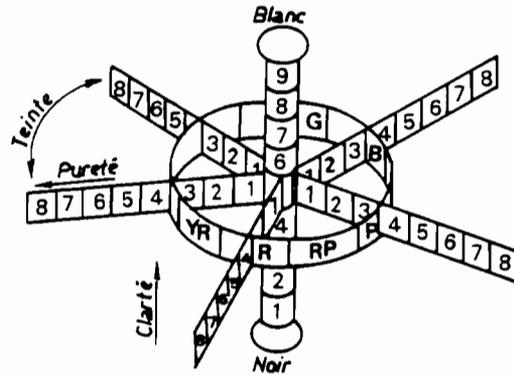
En théorie, le *métamérisme* s'oppose à cette inversion. Ce terme désigne le phénomène selon lequel l'oeil peut percevoir des couleurs identiques pour des objets de propriétés spectrales différentes. Cette caractéristique de la vision humaine, qui nous permet par exemple de percevoir du jaune lorsque notre oeil est simultanément exposé à du rouge et du vert, est très exploitée en reproduction des couleurs (photographie, télévision, imprimerie...).

Cependant, les simulations numériques réalisées par les spécialistes de cet aspect complexe de la colorimétrie ont mis en évidence une propriété remarquable des objets métamères : leurs courbes de réflectance doivent nécessairement s'entrecroiser, au

minimum trois fois (OHTA et WISZECKI, 1977). Or, les courbes d'échantillons de sols que nous avons observées, tout comme celles citées dans la littérature, sont toujours monotones croissantes dans le domaine visible.

De façon intuitive, on peut en déduire que la probabilité pour que deux courbes de sols de même couleur s'entrecroisent est très faible. En d'autres termes, en l'absence de métamérisme, il est possible qu'à une couleur de sol corresponde une courbe de réflectance et une seule.

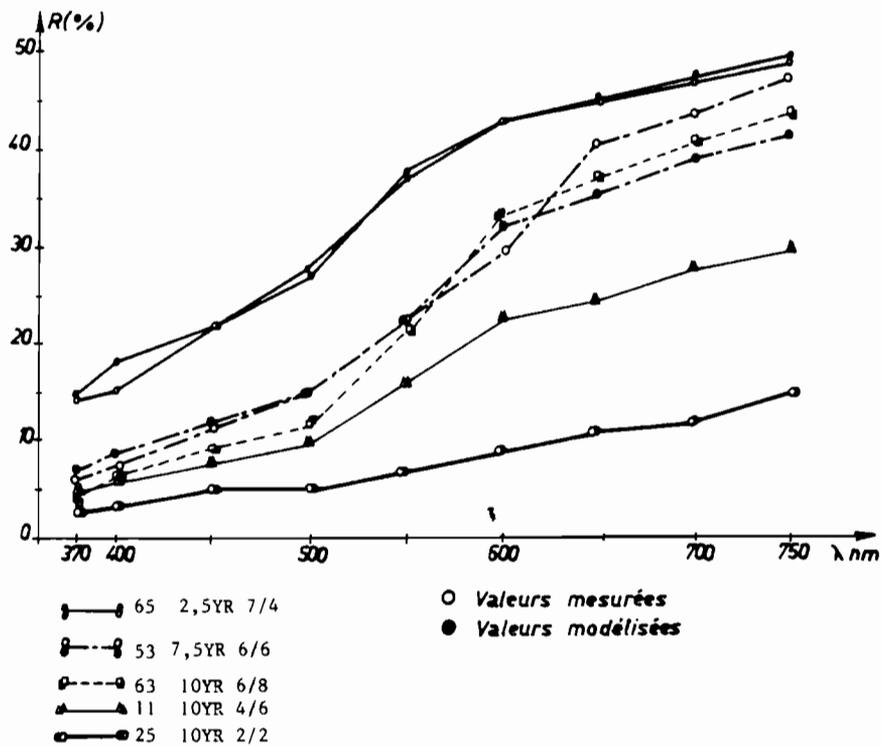
Pour tester cette hypothèse nous avons bâti un modèle empirique.



**Figure 3.**

Le système Munsell de classement des couleurs

Une couleur y est repérée par des coordonnées de type cylindrique selon la teinte, la clarté et la pureté.



**Figure 4.**

Modélisation des courbes de réflectance de 5 échantillons de sols représentatifs de la gamme étudiée.

Les valeurs modélisées sont calculées en utilisant les coefficients du tableau 1.

### 3.2.2 Modèle expérimental

A partir des coefficients trichromatiques  $x,y,z$  calculés pour la série de 84 échantillons de sols que nous avons étudiés, nous avons déduit les coefficients  $R, G, B$ , en inversant la relation (I) définie par la CIE (KOWALISKI, 1978).

$$\begin{aligned} X &= 2,7659 R + 1,7519 G + 1,1302 B \\ Y &= R + 4,5909 G + 0,06012 B \\ Z &= 0,0565 G + 5,5944 B \end{aligned} \quad (I)$$

Le but de ce traitement est d'exprimer la couleur suivant les trois composantes primaires : rouge, vert et bleu. Ces composantes à l'origine du système trichromatique ont servi de base aux définitions de la C.I.E.. Ce système  $R,G,B$  n'est pas orthonormé, il est donc moins facile à utiliser que le système  $x,y,z$  qui lui est généralement préféré. Par contre, il a un sens physique qui va nous permettre de le mettre en relation avec les propriétés spectrales.

Nous avons ensuite analysé les corrélations multiples entre la réflectance à une longueur d'onde visible donnée,  $RF(\lambda)$ , et les coefficients trichromatiques  $R,G,B$ , suivant le modèle :

$$RF(\lambda) = a_{\lambda} . R + b_{\lambda} . G + c_{\lambda} . B + d$$

avec  $a_{\lambda}, b_{\lambda}, c_{\lambda} = \text{constantes}$

Pour les longueurs d'onde de 400 à 750 nm échantillonnés tous les 50 nm, nous avons obtenu sur notre série de 84 d'échantillons les valeurs reportées dans le tableau 1 ci dessous.

$\lambda(\text{nm})$	$a\lambda$	$b\lambda$	$c\lambda$	$d\lambda$	$r(\text{mult.})$
400	0.0	0.0	0.0393	-0.521	0.985
450	0.0	0.0	0.0477	-0.120	0.999
500	0.0	0.0190	0.0356	-0.075	0.999
550	0.0046	0.0477	0.0046	-0.020	0.998
600	0.0498	0.0062	0.0059	-0.239	0.999
650	0.0719	-0.0248	0.0181	0.435	0.998
700	0.0801	-0.0345	0.0225	1.558	0.995
750	0.0868	-0.0544	0.0371	4.242	0.980

(avec R,G,B x 10<sup>4</sup>)

**Tableau 1.** Coefficients des régressions linéaires multiples entre réflectance RF( $\lambda$ ) et couleur R,G,B

On remarque premièrement une forte liaison entre les coefficients R,G,B et la réflectance dans les longueurs d'onde correspondant respectivement au rouge, au vert, et au bleu (importance des termes  $a\lambda$  à 650 nm,  $b\lambda$  à 550 nm et  $c\lambda$  à 450 nm).

De plus, les coefficients de corrélation très élevés obtenus montrent que ces relations permettent de reconstruire la courbe de réflectance spectrale à partir des valeurs R, G, B, comme l'illustre la fig. 4. L'écart moyen entre la valeur observée et la valeur modélisée est de 0,5 % entre 450 et 650 nm, et de 1,5 % aux extrémités du spectre, autour de 400 et 700.nm.

Un seul cas de désaccord entre valeur modélisée et observée à été noté sur l'ensemble des 84 échantillons étudiés. Nous avons donc sur cette série une fréquence du métamérisme de 1/84.

### 3.3 DISCUSSION

Le modèle ci-dessus nous a permis de montrer que le métamérisme est un phénomène rare dans le cas des sols étudiés.

L'extension de ces résultats à la totalité de la gamme des couleurs de sols suppose une étude théorique basée sur les équations du métamérisme. Ceci requiert des méthodes de calcul numérique assez sophistiquées que nous n'avons pas abordé ici, mais une étude sur ce sujet est en cours grâce à une collaboration entreprise avec Monsieur Francis M.SCHMITT, physicien, professeur à l'E.N.S.T.

En l'absence de cette démonstration mathématique, on peut cependant déjà utiliser ces résultats, basés sur une série d'échantillons de sols très diversifiés, pour affirmer que la *relation entre réflectance et couleur est bijective pour la majorité des sols* (ESCADAFAL et al., 1988b).

En résumé, cela revient à dire que couleur et réflectance spectrale dans le domaine visible sont deux grandeurs équivalentes, liées par des lois physiques établies.

**Les comptes rendus complets de ce travail ont été publiés dans plusieurs communications et articles dont la revue de l'INRA "Agronomie" et la revue internationale de télédétection "Remote Sensing of Environment" (voir 7.)**

## 4. TELEDETECTION DE LA COULEUR DE LA SURFACE DES SOLS

Cette étude théorique avait pour but de préciser les lois physiques liant couleur et réflectance dans le cas des sols, mais aussi de jeter les bases de la télédétection de la couleur des surfaces de sols.

De ce point de vue, la relation la plus intéressante mise en évidence *est la très forte corrélation entre les données de couleur exprimées en coordonnées R,G,B et la réflectance dans les bandes spectrales correspondant au rouge, vert et au bleu, soit par exemple TM3, TM2 et TM1, respectivement.*

Cette relation établie à partir de données de laboratoire a été testée avec succès sur des données réelles déjà publiées (ESCADAFAL et al., 1989). Elle permet notamment d'interpréter le rôle de la pureté de la couleur Munsell (chroma) souligné par ESCADAFAL et POUGET (1986), et les résultats publiés par (SALMON-DREXLER, 1977).

### 4.1 APPLICATION AUX DONNÉES LANDSAT TM

Par rapport aux données de laboratoire, les données de capteurs de satellites sur des surfaces réelles présentent des effets atmosphériques et l'influence de la rugosité et de l'exposition.

Nous avons appliqué la relation qui vient d'être évoquée à la comparaison entre les données sur les couleurs des surfaces dont nous disposons dans la zone du Sud tunisien, avec les données de l'image Landsat TM couvrant cette région.

Pour éliminer l'influence de la rugosité nous avons calculé les contributions relatives de chacun des trois canaux visibles. Nous les avons comparées avec les proportions de R,G,B dans les couleurs notées sur le terrain, pour une sélection de 10 échantillons de surface représentant la gamme de couleurs observée dans la région étudiée.

Les résultats exprimés sur la fig. 5 montrent que, à l'effet de perte de contraste près, on retrouve dans les données satellitaires des relations radiométriques comparables aux relations établies sur le terrain d'après les couleurs.

Ces premiers résultats montrent clairement que le Thematic Mapper de Landsat ouvre de nouvelles possibilités dans le domaine de la caractérisation des surfaces des sols par leur couleur, grâce à ses trois canaux visibles.

**Cet aspect de l'étude a été présenté en détail dans une communication au COSPAR 1988 qui est en cours de publication dans la revue "Advances for Space Research".**

#### **4.2 TELEDETECTION DE LA COULEUR DU SAHARA AVEC NIMBUS-CZCS**

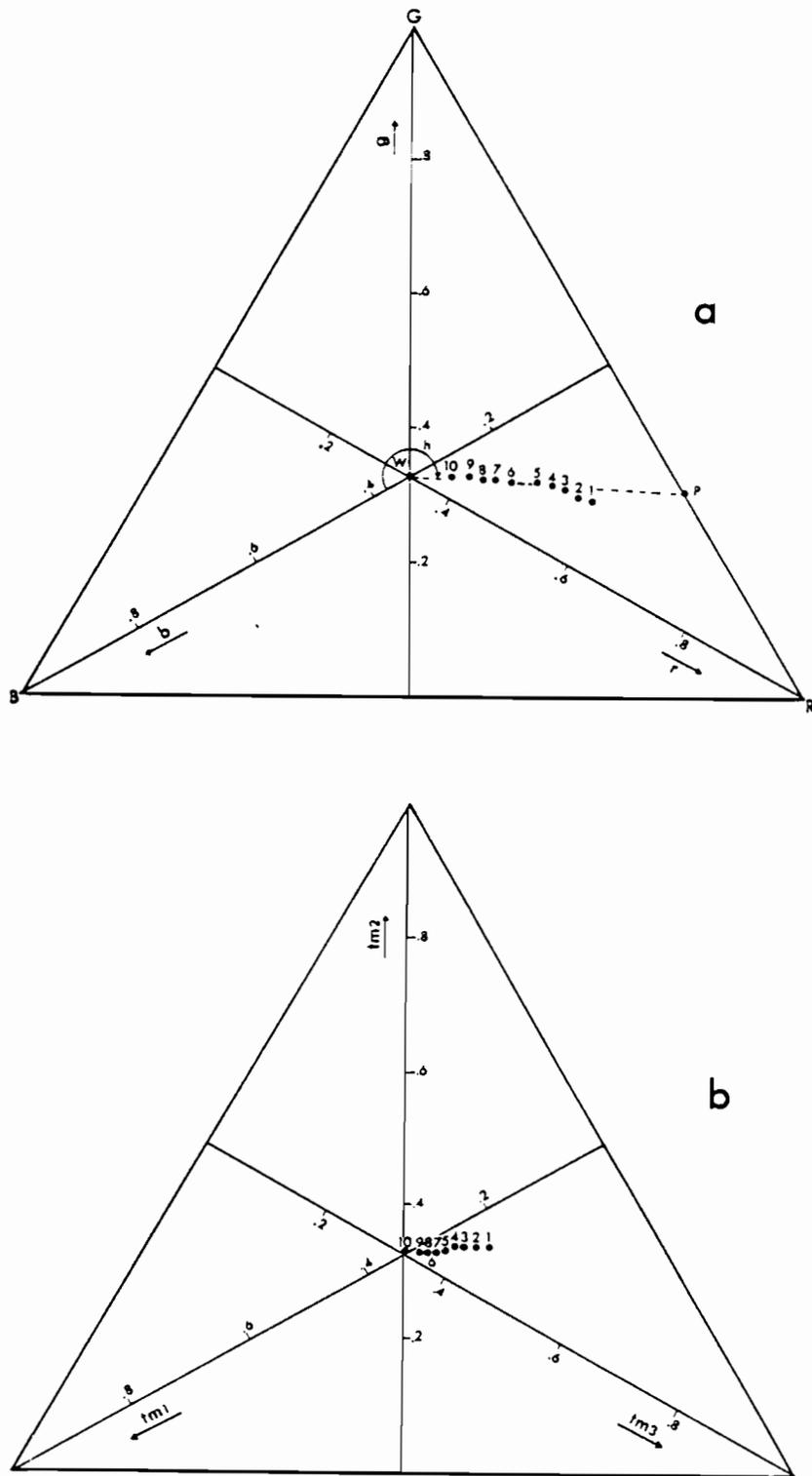
Entre autres capteurs, le satellite Nimbus-7 est équipé d'un radiomètre imageur destiné à l'étude de la couleur de la mer, le Coastal Zone Color Scanner (CZCS).

Ce scanner multicanaux possède quatre bandes spectrales étroites dans le domaine visible, une bande dans le rouge lointain (700-800 nm) et une bande thermique.

Ce radiomètre expérimental est calibré pour la gamme de réflectance des milieux marins, donc pour des valeurs nettement plus basses que celles du milieu terrestre.

Des exemples d'applications au domaine terrestre ont néanmoins été présentées ces dernières années, mais elles ne concernent pas les régions arides, très réfléchantes.

La possibilité de disposer de données sur la couleur des surfaces, sous la forme d'une image couvrant tout le Sahara, nous a cependant paru suffisamment attractive pour nous inciter à vérifier si réellement le CZCS n'a pas produit d'images sur cette région.



**Figure 5.**

Comparaison entre les proportions relatives de rouge (R), vert (G) et bleu (B) dans les couleurs de surface observées sur le terrain (a) et les luminances relatives dans les canaux Landsat TM correspondants (b).

A notre grande surprise les "quick-looks" de plusieurs images (correspondant à différentes dates) nous ont paru présenter un bon contraste et une bonne dynamique sur la partie couvrant les zones terrestres de l'Afrique du Nord.

Nous avons donc acquis une image du 13/02/82 qui nous a paru la meilleure de ce point de vue .

Dans cette image, si les canaux 2 à 4 sont effectivement saturés, le canal 1 (bleu) et le canal rouge (5) présentent par contre une gamme de luminances très étalée, et sont de surcroît très peu corrélés.

La planche 5 reproduit une composition colorée de cette image, qui nous donne une vue saisissante de tout le Sahara.

Au delà de l'aspect spectaculaire, on reconnaît sur cette image les grands ergs avec différentes nuances de couleur dans les sables, les taches très claires qui correspondent aux formations gypseuses, les grands plateaux calcaires, les massifs montagneux (très sombres).

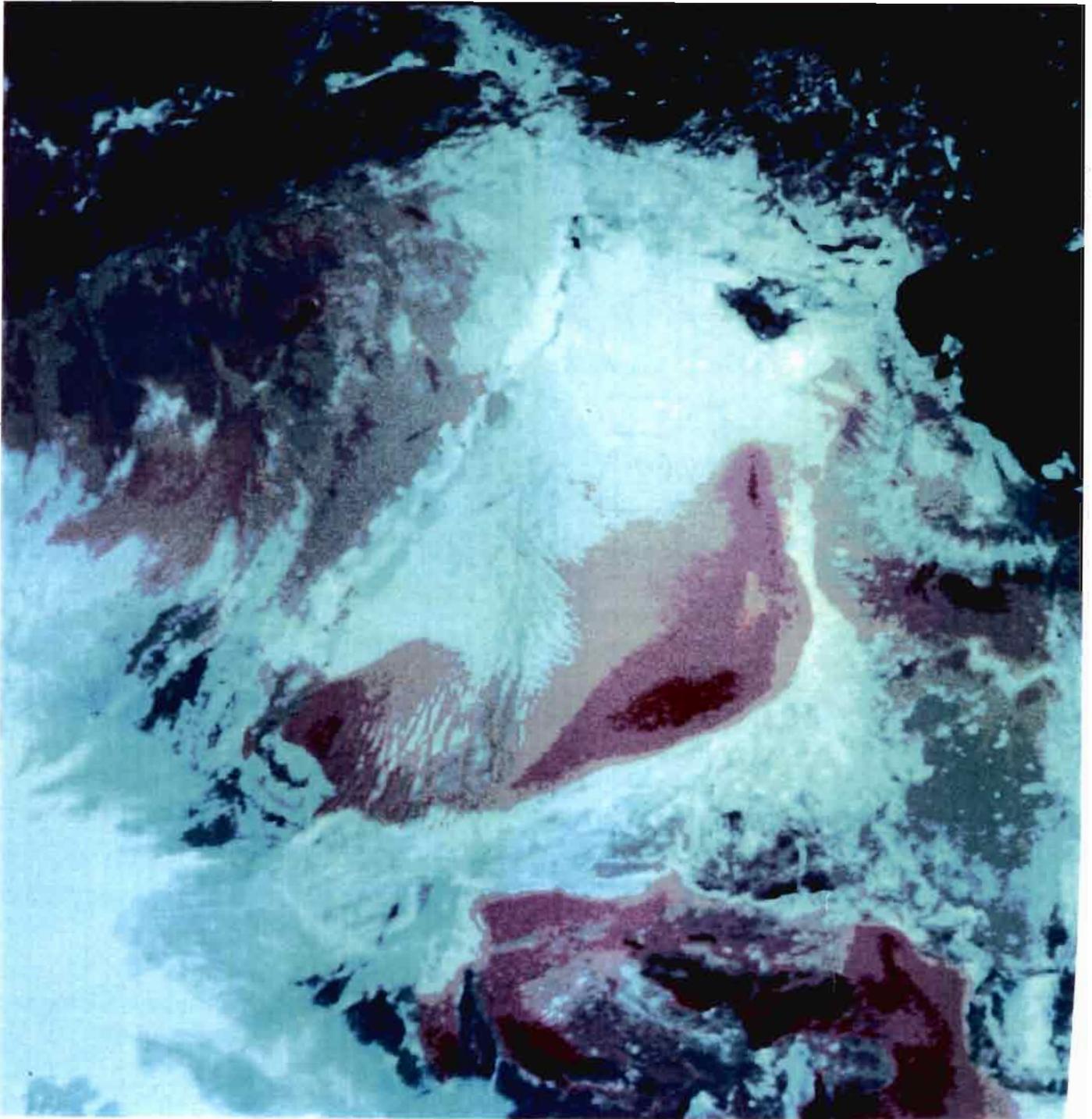
La photographie de couverture est une vue partielle du centre de cette image. Elle illustre l'intérêt de ces données pour l'étude des ergs, du point de vue de leur forme mais aussi de leur contenu.

Le recalage géométrique de cette image est en cours. Il va faciliter le repérage et l'étude détaillée de ces données, en particulier l'évaluation de l'effet des grandes variations des angles de visées de ce capteur à très large champ de balayage.

On peut cependant déjà prévoir que ces données CZCS permettront une cartographie à petite échelle des principaux types de surfaces du centre de l'Algérie.

Nous prévoyons d'étendre cette première tentative à d'autres dates et d'autres milieux arides, pour évaluer les possibilités réelles de cartographie des formations superficielles avec le CZCS.

Cependant, il faut remarquer et regretter que cet instrument ne fonctionne plus actuellement et n'ait pas été remplacé. SPOT 4 comblera partiellement cette lacune dans plusieurs années, avec trois canaux visibles, et l'avantage d'un canal dans l'infra-rouge moyen.



**Planche 5.**

Image Nimbus7-CZCS couvrant toute l'Afrique du Nord  
(Composition colorée des canaux visibles 1 et 5)

La gamme de couleurs représentée correspond réellement à des nuances de couleur sur le terrain.

Les ergs apparaissent en rouge et orangé, les zones salées et gypseuses en blanc,  
les roches calcaires dans les bleus.

L'image n'est pas corrigée géométriquement.

## 5. CONCLUSION

Ce rapport est une présentation succincte des travaux réalisés dans le cadre du projet et des résultats acquis à ce jour. Certains sont déjà publiés, d'autres sont encore en cours de formulation et de rédaction pour publication (voir 7.), et des développements sont prévus. Même s'il est donc trop tôt pour tirer un bilan définitif, un certain nombre de conclusions se dégagent de cet exposé :

- *la télédétection spatiale* à haute résolution, et plus particulièrement les données du *Landsat Thematic Mapper*, permet de caractériser l'état de la surface des sols avec une précision très satisfaisante, grâce en particulier aux canaux dans l'infrarouge moyen.

Dans les zones péri-désertiques étudiées on peut ainsi discriminer les surfaces *d'après leur dominante minéralogique* (ensembles gypseux, carbonatés, quartzeux), *leur rugosité* (pierrosité,..) et *leur couleur*. Les publications en préparation préciseront ces différents points.

- la couleur est une donnée de terrain très utilisée, liée à la nature des matériaux. Par une étude colorimétrique approfondie nous avons montré que *la relation entre couleur et réflectance dans le domaine visible est bijective* dans le cas des sols.

En utilisant la notation R,G,B, on peut directement *corrélérer la couleur* avec les données des canaux visibles dans les *bandes correspondant au rouge, au vert et au bleu*, respectivement.

Ceci permet de "télédétecter" la couleur des sols avec différents types de capteurs, dont le Thematic Mapper et le CZCS de Nimbus

- le CZCS fournit des images à large couverture spatiale et faible résolution spectrale (875 m au nadir). Bien qu'il soit conçu pour les applications marines, l'image acquise nous a offert *une vue d'ensemble de la couleur des matériaux superficiels du Sahara*.

Cette utilisation du CZCS, qui a été très critiquée par le comité scientifique de l'ATP qui avait refusé son financement, apparaît donc très prometteuse pour distinguer les grands types de surfaces des régions fournissant des aérosols à l'atmosphère.

L'analyse et le traitement de données CZCS est probablement une étape vers l'intégration de données sur les états de surface dans les modèles globaux de circulation atmosphérique. Dans l'attente des données des futurs capteurs à moyenne résolution spatiale, dont Spot 4, seules les archives CZCS peuvent fournir des données multispectrales sur les régions produisant des aérosols, à un coût abordable.

Il est en effet peu raisonnable d'envisager d'acquérir et de traiter une couverture complète de données TM sur l'Afrique sèche, pour produire une carte qui devra s'intégrer dans des modèles à très grandes mailles (plusieurs centaines de km).

Reste maintenant à interpréter ces états de surface en terme de production de poussières suivant différents scénarios climatiques et microclimatiques. Mais ceci dépasse largement le cadre des problèmes abordables par la télédétection, et nécessitera des mesures de terrain adaptées pour modéliser cette "fonction de production de poussières".

## 6. BIBLIOGRAPHIE CITEE

- ABDEL-HADY (A.), 1987. Etude des sols désertiques en relation avec la télédétection, Sud-ouest Sinäï (Egypte). Thèse de doctorat, Univ. P. et M. Curie, Paris, 250 p., + annexes.
- CALLOT (Y.), 1987. Géomorphologie et paléoenvironnements de l'Atlas saharien au Grand Erg Occidental : dynamique éolienne et plaéolacs holocènes. Thèse doct., Univ. Paris VI.
- CERVELLE (B.), MALEZIEUX (J.M.), CAYE (R.), 1977. Expression quantitative de la couleur liée à la réflectance diffuse de quelques roches et minéraux. Bull. Soc. Fr. Minéral. Cristall., 100 : 185-195.
- EL-BAZ (F.), 1978. The meaning of desert color in Earth orbital photographs. Photogrammm. Eng. Rem. Sens., 44 : 69-75
- ESCADAFAL (R.), 1981. Une méthode nouvelle de description de la surface des sols dans les régions arides. Actes du colloque "Informatique et traitement des données de sols", Paris, 1981, in : Sols, n°5 , p. 21-27.
- ESCADAFAL (R.), 1984. Organisation superficielle et télédétection des sols de la région de Tataouine (Sud tunisien). Communication présentée au 15ème Congrès de l'I.S.P.R.S., Rio de Janeiro, 10 p.
- ESCADAFAL (R.), POUGET (M.), 1986. Luminance spectrale et caractères de la surface des sols en région aride méditerranéenne (Sud tunisien). *I.T.C. Journal*, 86-1 : 19-23.
- FERNANDEZ (R.N.), SCHULZE (D.G.), 1987. Calculation of soil color from reflectance spectra. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51 : 1277-1282.
- GIRARD (M.C.), 1985. Télédétection de la surface du sol. In : "Application de la télédétection à l'agriculture", Colloques I.N.R.A., n°32, pp. 177-193.
- JUDD (D.B.), WYSZECKI (G.), 1975. Color in business, science and industry. John Wiley and Sons, New York, 553 p.

- KOWALISKY P., 1978. Vision et mesure de la couleur. MASSON, Paris, 197 p.
- MELVILLE (M.D.), ATKINSON (G.), 1985. Soil colour : its measurement and its designation in models of uniform colour space. *J. Soil Sci.*, 36 : 495-512.
- MULDERS (M.A.), EPEMA (G.F.), 1986. The Thematic Mapper, a new tool for soil mapping in arid areas. *I.T.C. Journal*, 19-23.
- MUNSELL COLOUR COMPANY, 1971. Munsell soil colour charts. Kollomorgen Corporation, Baltimore, 17 pl.
- OHTA N., WYSZECKI G., 1977. Location of the nodes of metameric color stimuli. *Color Res. Appl.*, 2, 183-186.
- ORLOV (D.S.), SADOVNIKOV (Y.N.), OBUKHOV (A.I.), 1980. Determination of soil colour by the visual and spectrophotometric methods. *Moscow Univ. Soil Sci. Bull. (U.S.A.)* d'après Pochvovedenie, 35 (3) : 41-48.
- POUGET (M.), LORTIC (B.), SOUISSI (A.), ESCADAFAL (R.), MTIMET (A.), 1984. Apport des données MSS Landsat pour la cartographie des ressources en sols des régions arides (Tunisie). 18ème Symp. Observ. de la Terre, CNES-ERIM, Paris, 1-15/10/84, 14 p.
- SALMON-DREXLER (B.C.), 1977. Reducing Landsat data to parameters with physical significiance and signature extension. A review of Landsat capabilities. Proc. 11th Symp. Remote Sens. Environ., Ann. Arbor, pp. 1289-1299.
- SHIELDS (J.A.), St ARNAUD (R.J.), PAUL (E.A.), CLAYTON (J.S.), 1966. Measurements of soil color. *Can. J. Soil Sci.*, 46 : 83-90.
- TORRENT (J.), SCHWERTMANN (U.), FECHTER (H.), ALFEREZ (F.), 1983. Quantitative relationships between soil color and hematite content. *Soil Sci.*, 136 : 354-358.
- WYSZECKI G., STILES W.S., 1982. Color science : concept and methods, quantitative data and formulae. Wiley, New York, 2nd edition, 950 p.

## 7. PUBLICATIONS DANS LE CADRE DU PROJET

### 7.1 COMMUNICATIONS

COURAULT (D.), GIRARD (M.C.), ESCADAFAL (R.), 1988. Modélisation de la couleur des sols par télédétection. Actes du 4e Colloque "Signatures spectrales d'objets en télédétection", Aussois, janvier 1988, pp. 357-362.

ESCADAFAL (R.), GIRARD (M.C.), COURAULT (D.), 1988. Modeling the relationships between Munsell soil color and soil spectral properties. Communication au 5ème Symposium "Pédologie et Télédétection", AISS, Budapest, 11-15/04/88.

ESCADAFAL (R.), POUGET (M.), 1988. Comparaison entre les données Landsat MSS et TM pour la cartographie des formations superficielles en zone aride. Actes du séminaire Earthnet, décembre 1987, Frascati, Italie, ESA publication, (sous presse).

### 7.2 ARTICLES PUBLIÉS

ESCADAFAL (R.), GIRARD (M.C.), COURAULT (D.), 1988. La couleur des sols : appréciation, mesure et relations avec les propriétés spectrales. *Agronomie*, 8(2) : 147-154.

ESCADAFAL (R.), POUGET (M.), 1987. Cartographie des formations superficielles en zone aride (Tunisie méridionale) avec Landsat TM. *Photo-interprétation*, 4(2) : 9-12 .

### 7.3 ARTICLES ACCEPTÉS

ESCADAFAL (R.), GIRARD (M.C.), COURAULT (D.), 1988. Modeling the relationships between Munsell soil color and soil spectral properties. *International Agrophysics*, 3 (sous presse).

ESCADAFAL (R.), 1988. Remote sensing of arid soil surface color with Landsat Thematic Mapper. Communication présentée au XXVIIe COSPAR, 14-30 juillet 1988, Helsinki, Finlande. (à paraître dans *Adv. Space Res.*).

ESCADAFAL (R.), GIRARD (M.C.), COURAULT (D.), 1989. Munsell soil color and soil reflectance in the visible spectral bands of Landsat (MSS and TM). *Remote Sensing of Environment*, (sous presse).

### 7.4 ARTICLES EN PRÉPARATION

ESCADAFAL(R.), ABDEL-HADY (A.), CALLOT (Y.), ROGNON (P.), 1989. Remote sensing of soil surface aspect with Landsat TM for monitoring desert dust production in the Sahara. *International Journal of Remote Sensing*, (en préparation)

ESCADAFAL(R.), THOMAS (Y.), 1989. An unexpected use of Nimbus data : mapping the color of the Sahara sand sea with CZCS. *Geocarto International*, (en préparation)

### 7.5 RAPPORTS

ABDEL-HADY, Rapport d'activité au Ministère des Relations Extérieures, 106 p.