

ORSTOM
Laboratoire Informatique Appliquée
Unité de Télédétection
BONDY
(France)

CNRS
Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive
(CEFE)
MONTPELLIER
(France)

ALEXANDRIA UNIVERSITY
Botany Department
ALEXANDRIA
(Egypt)

**UTILISATION DES DONNEES SPOT POUR LA CARTOGRAPHIE
DES RESSOURCES RENOUVELABLES
Région Méditerranéenne Côtière
Nord-Ouest de l'Egypte**

RAPPORT FINAL

MINISTERE Délégué auprès du Premier Ministre
chargé de l'ENVIRONNEMENT
et des Risques Technologiques majeurs
Service de la Recherche, des Etudes
et du Traitement de l'Information sur l'Environnement (STRETIE)
Subvention n° 86 358

Rapport présenté dans le cadre de la subvention n° 86 358 du 12 Décembre 1986

*Ce rapport n'engage que la responsabilité de ses auteurs,
ne pas citer sans autorisation.*

ORSTOM
Laboratoire Informatique Appliquée
Unité de Télédétection
72, route d'Aulnay - 93413 BONDY Cédex (France)
Téléphone: (1) 48 47 31 95
Télécopie: 48 47 30 88
Télex : SSC BY 2354 53 F

AUTEURS

Ce rapport a été réalisé dans le cadre d'un projet qui a bénéficié d'une subvention du Ministère Français de l'Environnement et qui a été labellisé MAB/FRANCE en 1987/1989.

Placé sous la responsabilité de M. POUGET, responsable de l'Unité de Télédétection du Centre ORSTOM de Bondy, le projet a pu être mené à terme grâce aux collaborations suivantes:

- au niveau du CEFÉ/CNRS de Montpellier (France): E. LE FLOC'H
- au niveau de l'Université d'Alexandrie (Egypte),
Faculté des Sciences, Département de Botanique:
S. KAMAL
B. SALEM
M. AYYAD

SOMMAIRE

RESUME	5
INTRODUCTION	7
1 - LE CONTEXTE GENERAL DE L'ETUDE	7
2 - LES OBJECTIFS.....	9
3 - LE DEROULEMENT DE L'ETUDE.....	9

CHAPITRE I

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	13
---------------------------------------	----

CHAPITRE II

LA DEMARCHE GENERALE.....	15
1. PREPARATION DE L'ETUDE.....	15
2. INVENTAIRE DES PRINCIPALES UNITES PHYSIOGRAPHIQUES SUR IMAGES SPOT.....	16
3. L'ETUDE SYNCHRONIQUE DES RELATIONS ETATS DE SURFACE/IMAGE AU NIVEAU DES SITES TESTS.....	17
4. L'ANALYSE DIACHRONIQUE DES IMAGES SPOT (CARTOGRAPHIE DES ETATS DE SURFACE).....	18
5. EBAUCHE DE CARTOGRAPHIE THEMATIQUE A MOYENNE ECHELLE.....	19

CHAPITRE III

ANALYSE SYNCHRONIQUE: LES RELATIONS ETATS DE SURFACE/IMAGE AUX NIVEAU DES SITES TESTS ESSAI DE TYPOLOGIE DES ETATS DE SURFACE.....	21
1. DONNEES ET METHODES.....	21
2. LES RESULTATS.....	24
2.1. Typologie des états de surface à partir de la description sur le terrain	24
2.2. Typologie des états de surface à partir des données radiométriques de terrain	25
2.3. Typologie des états de surface à partir des données SPOT (30 Novembre 1987).....	32
3. SYNTHÈSE : TYPOLOGIE DES ETATS DE SURFACE PERÇUS PAR SPOT A UNE DATE.....	34

CHAPITRE IV

ANALYSE DIACHRONIQUE: CARTOGRAPHIE DES ETATS DE SURFACE DE LA REGION D'EL OMAIED.	35
1 - ANALYSE DIACHRONIQUE DES IMAGES SPOT 10 AVRIL 87/30 NOV. 87.....	35
1.1 - Classification et interprétation de l'image du 10 avril 1987	35
1.2 - Classification et interprétation de l'image du 30 novembre 1987.....	38
1.3 - L'image multidate	40
2 - VERS UNE CARTOGRAPHIE THEMATIQUE A MOYENNE ECHELLE.....	48
CONCLUSION.....	53
BIBLIOGRAPHIE.....	57
ANNEXE I	59
ANNEXE II.....	73
ANNEXE III.....	77
ANNEXE IV	81

RESUME

Ce rapport présente les résultats d'une étude portant sur l'emploi des données SPOT pour la cartographie à moyenne échelle des ressources renouvelables dans la région méditerranéenne côtière nord-ouest de l'Egypte.

L'**approche "états de surface"** caractérise l'ensemble d'une démarche progressive qu'il est possible de formaliser en 5 étapes principales:

- *préparation de l'étude*, planning d'acquisition des données SPOT.
- *inventaire des principales unités physiographiques*.
- *étude synchronique* des relations "états de surface"/image SPOT au niveau de 50 sites tests.
- *étude diachronique* des données SPOT avec cartographie des états de surface: unités permanentes et unités variantes avec mise en évidence des changements.
- *cartographie thématique* à moyenne échelle (ressources renouvelables).

Les principaux résultats concernent:

- la **typologie des états de surface** perçus par le satellite et obtenus par l'étude synchronique des relations "états de surface"/ image SPOT pour l'ensemble de la zone.
- la **cartographie des états de surface** de la région d'El Omayed, réalisée au terme d'une étude diachronique de données SPOT acquises à 8 mois d'intervalle (10 avril et 30 novembre 1987), permet de distinguer et d'interpréter 11 unités permanentes et 6 unités variables. Cette cartographie constitue une base solide pour la cartographie thématique, en particulier des ressources renouvelables.

INTRODUCTION

1 - LE CONTEXTE GENERAL DE L'ETUDE

Les objectifs variés des projets SAMDENE (System Analysis of Mediterranean Desert Ecosystems of Northern Egypt) et REMDENE (Regional Environmental Management of Mediterranean Desert Ecosystems of Northern Egypt) peuvent se résumer en un seul but: acquérir de l'information en écologie. Ces projets, qui se sont succédés depuis 1974, avaient aussi en commun l'ambition que leurs résultats pourraient directement ou indirectement contribuer au développement rural agricole de cette région côtière du nord-ouest de l'Egypte.

C'était particulièrement le cas du projet REMDENE qui avait pour objectifs:

- l'étude et évaluation des ressources en terres de secteurs représentatifs de la zone côtière nord-ouest de l'Egypte.
- l'évaluation de l'impact des différents modes d'utilisation du sol (pâturages, cultures en sec et en irrigué, occupation humaine, etc.) sur l'environnement et la valeur des ressources.
- en utilisant les techniques de modélisation, faire à l'usage des décideurs la synthèse de l'information acquise pour servir de guide pour l'aménagement des ressources et l'optimisation du développement régional.

En d'autres termes, ce projet ambitionnait d'aider à construire un outil efficace pour la planification et la régionalisation des actions de développement.

En fait, dans cette région d'Egypte, il n'y a pas de terres inoccupées et les terres réellement fertiles sont très rares de telle sorte qu'il semble nécessaire de tenter de satisfaire l'accroissement de la demande sociale, dans le domaine des produits de l'agriculture, au travers d'une amélioration des techniques de production et si possible aussi par un meilleur aménagement des ressources et de leurs usages.

Un meilleur aménagement des ressources comporte la protection de l'environnement. Une telle problématique est parfaitement conforme aux **orientations** définies par le Conseil international de Coordination du **MAB** lors de sa 9ème session en Octobre 1986 à Paris:

- fonctionnement des écosystèmes sous différentes intensités d'impact humain.
- gestion et restauration des ressources ayant subi l'impact humain.
- investissement humain et utilisation des ressources.
- réponse de l'homme aux contraintes de l'environnement.

C'est principalement dans la première orientation que s'inscrivent les objectifs du projet REMDENE. Une **meilleure connaissance du fonctionnement des écosystèmes** est donc recherchée pour trois raisons:

- certains types d'utilisation peuvent être considérés comme durables pour une période relativement courte sous la dépendance du contexte socio-économique.
- les écosystèmes peuvent être affectés par des facteurs anthropiques venant de l'extérieur.
- les écosystèmes affrontent les changements à court et long terme imposés en même temps de l'intérieur et de l'extérieur du système.

Depuis 4 décennies l'approche "**diagnostic écologique**" est utilisée pour de telles études. Cette approche est basée sur la connaissance des relations entre les plantes, les animaux et les facteurs de l'environnement et sur la connaissance des bio-indicateurs de l'état de l'environnement.

Ce diagnostic est utilisé pour:

- l'identification de la nature et de l'état des ressources renouvelables des écosystèmes.
- l'évaluation des potentialités biologiques des écosystèmes.
- la caractérisation du niveau de sensibilité des différents écosystèmes.
- la définition et la description des tendances évolutives en relation avec les différentes formes possibles et les niveaux d'utilisation des écosystèmes et des ressources.

Un tel diagnostic écologique peut être qualifié "d'approche naturaliste". Le plus souvent, les résultats sont exprimés par une cartographie thématique, les thèmes les plus communs étant:

- *carte des unités écologiques* où les données écologiques doivent être homogènes aux différents niveaux de perception écologiques (région, secteur, station). Une telle carte est souvent essentielle pour permettre la généralisation des données.
- *carte de l'occupation du sol* décrivant la végétation actuelle d'une façon analytique par des paramètres tels que les types de végétation, strates, espèces dominantes, niveau de l'impact humain, type de l'utilisation du sol.
- *carte de dynamique de la végétation*, basée sur la perception de la dynamique évolutive de la végétation dans une situation où l'impact humain serait moins important.
- *cartes des ressources renouvelables*: sol, végétation.
- *cartes des potentialités biologiques* exprimant les possibilités de développement de productions variées prenant en compte les différentes formes et niveaux possibles d'utilisation du sol.
- *carte de sensibilité*, très utile pour la gestion de l'environnement soumis aux différents risques tels que salinisation, désertification, etc.

Une telle liste de thèmes cartographiques est bien illustrée par le sommaire du document déjà édité dans le cadre du projet REMDENE (AYYAD and LE FLOC'H, 1983). Toutes les cartes établies à cette occasion l'ont été avec l'aide des photos aériennes prises à plusieurs dates (1954,1962,1979). L'échelle de temps est très grande et les changements facilement perceptibles par un observateur avisé. Cependant l'évolution est maintenant très rapide et sa vitesse s'accroît avec l'augmentation de la pression humaine. Il serait donc très utile d'avoir un outil qui permettrait une mise à jour plus rapide et plus précise.

L'intérêt affiché par tous les scientifiques thématiques à l'arrivée des satellites d'observation de la terre, tels que LANDSAT, se fonde sur trois caractéristiques principales:

- répétitivité des acquisitions.
- simultanéité des données sur une très grande surface.
- intérêt des systèmes de détection qui enregistrent des mesures radiométriques (vision multispectrale).

Ces caractéristiques laissaient espérer la possibilité d'un **certain renouvellement de l'approche du diagnostic écologique** pour l'inventaire, l'évaluation, la prévision et le suivi des ressources terrestres.

En fait, les données LANDSAT MSS, à cause de leur faible résolution spatiale, n'ont pas permis une telle évolution au moins en zones arides. L'arrivée de la nouvelle génération des capteurs (LANDSAT TM, SPOT HRV) avec une résolution bien meilleure permet de se placer à un niveau où les variables telles que géomorphologie, couvert végétal et surface du sol sont détectables par leurs propriétés spectrales et leur structure. Il est donc possible de localiser des sites tests et de réaliser sur le terrain des mesures radiométriques en mode synchrone avec l'acquisition de données par le satellite. Il devient donc théoriquement possible d'avoir une information localisée et actualisée.

2 - LES OBJECTIFS

Le travail présenté ici a été réalisé dans le cadre d'une convention avec le Ministère Français de l'Environnement en prolongement du projet REMDENE. Il résulte d'une collaboration entre chercheurs égyptiens de l'Université d'Alexandrie et chercheurs français (ORSTOM, CEFÉ/CNRS) qui, voici quelques années, avaient coopéré dans ce même projet de cartographie des ressources renouvelables (AYYAD and LE FLOCH, 1983).

Le projet a deux objectifs principaux:

- **Actualisation des méthodes d'inventaire et de cartographie, à moyenne échelle, des ressources renouvelables en utilisant les données satellitaires et en particulier SPOT.** Les données SPOT doivent être aussi un moyen pour faire mieux comprendre le fonctionnement et la dynamique des écosystèmes sous différents niveaux d'intensités d'impact humain.

Un autre intérêt, à court et à moyen terme, consiste à établir, dès à présent, les bases pour le suivi et la surveillance par satellite de cette région fragile et en pleine transformation. En effet, le long de cette mince bande côtière, large de quelques kilomètres seulement, on assiste à une accélération excessive de la pression humaine qui, partant d'Alexandrie, se propage rapidement vers l'ouest: aménagements hydro-agricoles et cultures irriguées, céréaliculture et arboriculture en sec, urbanisation, infrastructures touristiques, etc.

- **Soutien à une action de formation** de chercheurs égyptiens à l'utilisation des données satellitaires et soutien aux structures permettant de réaliser effectivement le traitement et l'interprétation de ces données (Université d'Alexandrie).

3 - LE DEROULEMENT DE L'ETUDE

Au Tableau 1 sont indiquées les principales phases du déroulement de cette étude depuis la notification de la subvention n°86 358 (12 décembre 1986) du Ministère français de l'Environnement jusqu'à la rédaction du présent rapport final.

- *La première phase* (début de 1987), a consisté à préparer l'ensemble du programme et plus particulièrement à planifier l'acquisition de données SPOT (demande de programmation) et de prospection sur le terrain.

- *La seconde phase* a été concrétisée en juillet 1987, l'équipe constituée sur ce projet s'étant retrouvée au complet durant deux semaines au Centre ORSTOM de Bondy avec comme tâche de:

- réaliser l'analyse préliminaire des données acquises le 10 avril 1987 par le satellite SPOT

(traitements photographiques et numériques).

- préparer la mission terrain prévue pour la seconde quinzaine de Novembre 1987.

- *la troisième phase* a comporté en fait deux périodes:

- sur le terrain (15 novembre-3 décembre 1987): observations et mesures radiométriques au niveau de 50 sites tests

- au laboratoire (Bondy): traitement des données.

- *la quatrième phase* (analyse diachronique) a été étalée dans le temps compte tenu de la dispersion géographique des membres de l'équipe. Le travail a pu néanmoins être conduit au sein de l'Unité de Télédétection de l'ORSTOM à Bondy par le responsable de l'opération avec la collaboration de Mr E.LE FLOCH qui a pu effectuer plusieurs missions de courte durée et de Mme S.KAMAL qui a bénéficié d'une allocation de l'UNESCO (septembre-octobre 1988).

-Signalons que déjà au cours du projet les résultats ont fait l'objet de publications:

- en novembre 1988 aux Journées de Télédétection de Bondy (POUGET *et al*, 1989).
- en avril 1989 à Coquimbo (Chili): à l'atelier MAB/UNESCO: Bases écologiques du Développement rural intégré et de lutte contre la désertification en zones arides et semi-arides d'Afrique et d'Amérique latine (POUGET *et al*, 1990).
- en janvier 1990 à Alexandrie où l'ensemble des résultats a été présenté à l'occasion d'un séminaire organisé conjointement par l'Université (Faculty of Science et Institute of Graduate Studies and Research).et l'Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM) avec le soutien financier du Comité MAB/FRANCE

Tableau 1 Les principales phases du déroulement de l'étude

	1987	1988	1989	1990
Notification de la subvention n°86 358 du 12 déc 1986				
1 - Préparation de l'étude Première image SPOT	10 avril			
2 - Analyse préliminaire de l'image SPOT du 10 avril	Bondy Juillet 1987			
3 - Etude synchronique des relations "états de surface/ image au niveau des sites test				
* Observations et mesures radiométriques sur le terrain	(15 nov.-3 déc.)			
* Seconde image SPOT * Traitement des données	30 novembre	/-----/		
4 - Analyse diachronique des images: cartographie des états de surface		/-----/	/-----/	
Présentation des résultats		Bondy	Coquimbo	Alexandrie
Rédaction du rapport final				/-----/

L'étude a été financée par le Ministère français de l'Environnement: Service de la Recherche, des Etudes et du Traitement de l'Information sur l'Environnement (STRETIE): subvention n°86 358 de 150 000FF.

A ce financement il faut ajouter les moyens non budgétisés fournis par:

- l'ORSTOM et particulièrement l'Unité de Télédétection du Laboratoire d'Informatique Appliquée de Bondy où a été effectuée la quasi totalité des traitements des données satellitaires (photographiques et numériques) ainsi que la mise en forme des différentes publications et du rapport final.

- l'Université d'Alexandrie et particulièrement le Département de Botanique (Dr M.AYYAD) qui a assuré l'ensemble de la logistique du travail de terrain et l'organisation du Séminaire de janvier 1990 en collaboration avec l'Institut de Recherche et de Post-graduation (Dr EL RAEY).

- le Comité MAB/FRANCE a soutenu cette opération qui a bénéficié dès le départ de son label. Par ailleurs le Comité a apporté sa contribution financière à l'occasion du Séminaire d'Alexandrie (participation aux frais de voyage et per diem).

Outre les publications déjà citées et le présent rapport cette opération a contribué à promouvoir l'utilisation des données SPOT au sein de l'Université d'Alexandrie:

- d'une part avec la **fourniture de données satellitaires** qui ont été utilisées dans le cadre de thèses ou de mémoires:

GALAL SAMAH 1989,"Remote Sensing of Vegetation and Soils" Master of Science, Institute of Graduate Studies and research, University of Alexandria.

FARAG Magdy 1990,"Remote Sensing of Water pollution in the Eastern Mediterranean" Ph D., Institute of Graduate Studies and research, University of Alexandria.

SALEM Boshra 1989,"Remote Sensing of Vegetation and Land Use in the North Western Desert of Egypt". Ph. D., Botany Department, Faculty of Science, University of Alexandria.

- d'autre part avec le transfert du logiciel TIMOR (Traitement d'Image satellite sur Micro-ORDinateur), développé à l'ORSTOM, dans les structures de l'Université d'Alexandrie: Laboratoires du DR EL RAEY (Department of Environmental Studies, Institute of Graduate Studies and Research) et du Dr AYYAD (Botany Department).

CHAPITRE I

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

. La region cotiere nord-ouest de l'Egypte

La zone d'étude se situe à l'ouest d'Alexandrie et s'étend sur une centaine de kilomètres le long de la côte. Elle s'inscrit à l'intérieur de 2 scènes SPOT correspondant à une même orbite: KJ=107-288 et KJ=108-288 (Fig. 1 et.2).

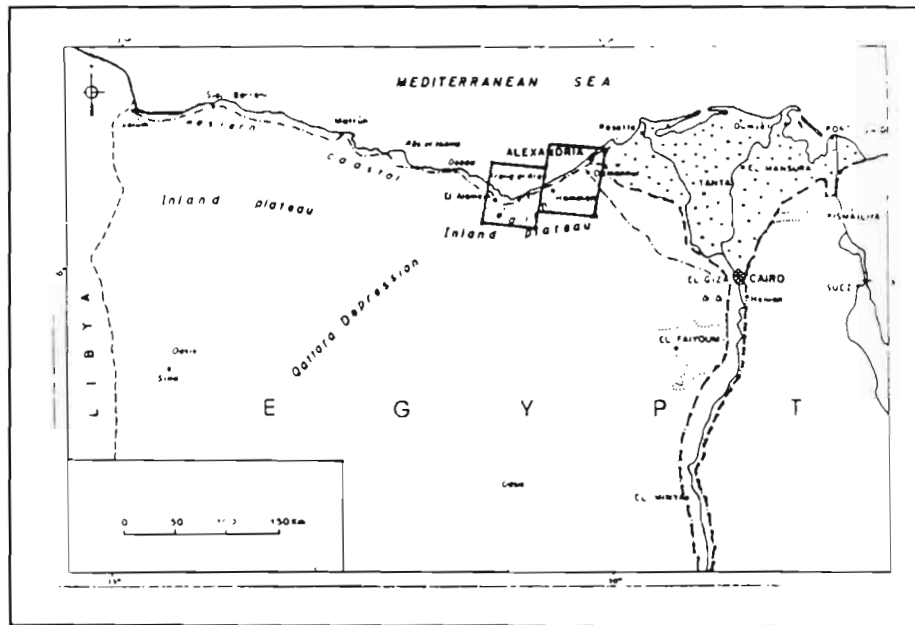


Figure 1. La région côtière Nord-Ouest de l'Egypte.

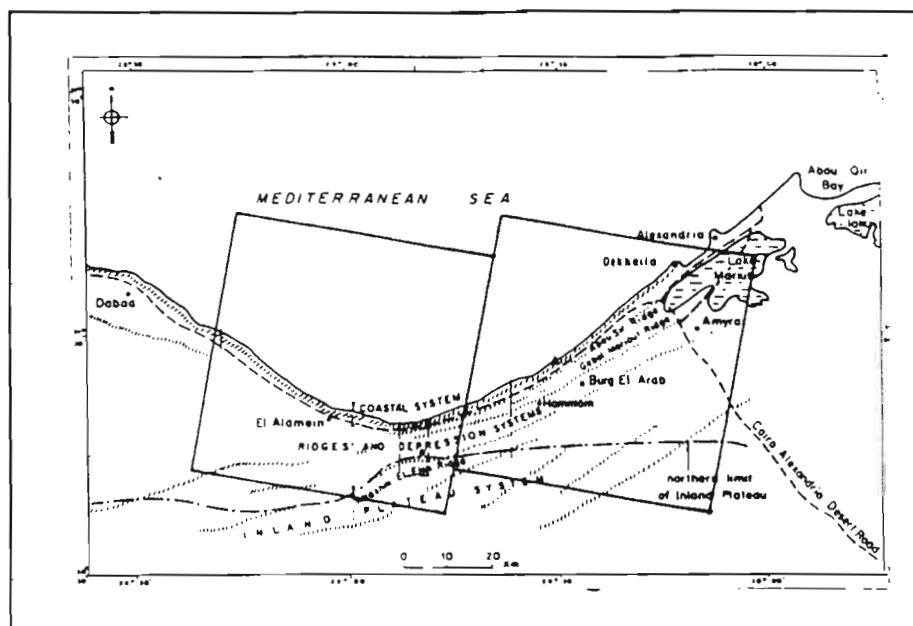


Figure 2. Les grands traits de l'organisation géomorphologique.

Le climat est de type méditerranéen aride avec des précipitations moyennes d'environ 150 mm/an.

L'organisation géomorphologique peut être schématiquement caractérisée par trois ensembles (Fig. 2):

- une dune côtière plus ou moins consolidée (coastal system).
- un système de dunes consolidées parallèles à la côte et séparées par des dépressions endoréiques longitudinales (ridges and depression system).
- un plateau faiblement ondulé qui prend le relais, vers le sud, du système précédent (inland plateau system).

La distribution des sols est en relation étroite avec cette organisation géomorphologique:

- sols sableux plus ou moins profonds, dominants dans la région ouest d'El Omayed, c'est-à-dire d'El Alamein à Hammam.
- sols limoneux à limono-sableux à l'est (Burg el Arab).
- sols salsodiques dans les dépressions.

L'occupation humaine, très longtemps dominée par le pastoralisme (ovins, dromadaires) et l'aridoculture (céréales sur limons, vergers de figuiers sur sables), connaît depuis peu une intensification spectaculaire:

- périmètres irrigués par les eaux du Nil après la réalisation du barrage d'Assouan, matérialisant ainsi vers l'ouest l'extension du mode d'occupation du sol qui prévaut dans le Delta.
- urbanisation et implantation de complexes touristiques le long de la côte (dune côtière).
- extension des vergers de figuiers, donc des labours dans les zones sableuses avec aggravation de l'érosion éolienne (région d' El Omayed).

La végétation naturelle, le plus souvent très dégradée, subsiste dans les zones sableuses (steppe à ligneux bas et à graminées pérennes) et surtout dans les zones salées (steppes à halophytes).

CHAPITRE II

LA DEMARCHE GENERALE

La démarche générale se réfère à l'approche "état de surface", l'état de surface étant la composition et l'organisation de la surface du sol à un moment donné (ESCADAFAL, 1989). Cette approche est basée sur les relations qui existent entre les caractéristiques de la surface du sol (états de surface) et les luminances spectrales mesurées par le satellite, ceci dans des conditions où les effets atmosphériques (brumes, aérosols, etc.) et les effets dus au relief restent faibles. La démarche consiste donc à comparer les états de surface (terrain) et les valeurs radiométriques (image). Cette comparaison s'effectue dans une **démarche progressive qu'il est possible de décomposer en 5 étapes principales:**

- *la préparation de l'étude* avec établissement d'une planification d'acquisition des données SPOT et de prospection sur le terrain.
- *l'inventaire des principales unités physiographiques* basé sur l'analyse préliminaire de l'image SPOT du 10 avril 1987.
- *l'étude synchronique* des relations états de surface/image SPOT au niveau de sites tests.
- *l'analyse diachronique* des données SPOT (10 avril/30 novembre 1987) avec cartographie des états de surface et d'une façon plus générale l'étude des changements.
- et enfin une ébauche de *cartographie thématique* à moyenne échelle.

1. Préparation de l'étude

Le premier point concerne le **choix des données satellitaires:** nombre de scènes et dates à retenir. Pour prendre en compte la dynamique saisonnière, très importante en zone aride, il était évident au départ que deux images seraient nécessaires, l'une en fin de saison "humide" (Mars-Avril) et l'autre en fin de saison sèche (Octobre- Novembre). Une programmation d'acquisition de données SPOT a été préparée pour 1987 avec ces deux créneaux de dates. Les deux scènes se trouvant sur la même orbite du satellite l'acquisition a pu se faire simultanément par les deux capteurs HRV (Haute Résolution dans le Visible) en mode multispectral. Suite à des aléas nous avons dû nous satisfaire des données un peu tardives d'Avril. Une mission terrain a été programmée et réalisée en Novembre 1987 c'est-à-dire au moment du second créneau d'acquisition (15 Novembre-3 Décembre 87). Finalement nous avons pu disposer des deux scènes ((KJ=107-288 et KJ=108-288) à deux dates différentes: 10 Avril et 30 Novembre 87 (cf Fig. 2 p14).

2. Inventaire des principales unités physiographiques sur images SPOT

Réalisé avant la tournée sur le terrain et basé sur l'analyse de l'image du 10 Avril, cet inventaire a été conduit de deux façons différentes mais complémentaires:

- *analyse visuelle des compositions colorées* (échelle 1/200.000 et 1/50.000) réalisées à partir de films négatifs Noir et Blanc (1/400.000) à l'Atelier photographique de Bondy.
- *analyse numérique des données* (bande magnétique CCT) effectuée à Bondy par l'ensemble de l'équipe en Juillet 1987.

Nous avons adopté la **démarche dirigée** basée sur les connaissances déjà acquises sur la zone d'étude et sur les caractéristiques de l'image elle-même. Il s'agit sur la composition colorée visualisée sur l'écran de délimiter des zones qui apparaissent homogènes par leur couleur et leur texture. Ces zones sont caractérisées par leurs valeurs radiométriques (moyenne et écart-type dans chacun des canaux SPOT XS₁, XS₂, XS₃) ce qui permet de définir des centres de classes. Chaque pixel de l'image est ensuite affecté à la classe pour laquelle la "distance" calculée est minimale. Dans le cas présent il s'agit de la distance euclidienne pondérée par l'écart-type (distance de SEBESTYEN).

Le résultat obtenu est une image classée, chaque classe correspondant à un ou plusieurs types d'états de surface au moment de l'acquisition des données le 10 Avril 1987.

Pratiquement, il s'agit donc d'une première stratification de l'image, en environ une vingtaine de classes. Les connaissances acquises par l'équipe sur cette région et une certaine pratique de l'interprétation des données de télédétection permettent d'identifier 5 grands ensembles:

- l'**eau libre**: mer, lacs salés plus ou moins profonds.
- la "**végétation active**", en rouge sur les compositions colorées standard: cultures dans les parcelles irriguées, végétation naturelle en bordure des zones inondées.
- les "**salt marsh**" dans les dépressions salines, caractérisés par des luminances faibles dans tous les canaux, apparaissent en gris foncé sur l'image.
- un **ensemble steppe-labours (zones de steppes et d'aridoculture)**, comprenant plusieurs classes plus ou moins nettes, s'organise en fonction de la brillance, des luminances faibles à moyennes à des luminances élevées dans tous les canaux, le parcellaire restant toujours visible.
- enfin les **sables blancs** de la dune côtière, caractérisent les zones extrêmement claires sur l'image (luminances très élevées).

Sans détailler davantage cette étape de la démarche, il convient de souligner l'importance de l'analyse préliminaire:

- elle permet d'**inventorier les principales unités spatiales ou unités physiographiques** (sl) dont la physionomie est définie par des caractères en relation avec le milieu physique (géologie, géomorphologie, sols, hydrologie), la végétation naturelle et d'une façon générale l'occupation du sol.
- elle conduit à **formuler des hypothèses** sur les paramètres, surface du sol, dont l'influence est prépondérante sur les données radiométriques enregistrées par le satellite. Ceci oriente le choix des variables terrain à prendre en compte dans l'étape ultérieure. Par exemple, l'étroite corrélation existant entre les trois canaux SPOT dans l'ensemble steppe-labours souligne l'importance de la brillance. Dans ce type de milieu le facteur rugosité est certainement le plus important en raison de la "discrétion" des autres facteurs susceptibles d'intervenir tels que l'humidité ou la couleur, les sols étant secs généralement clairs avec cependant une faible variation de teinte dont on verra qu'elle est perceptible par le satellite dans certaines conditions. La rugosité étant en relation avec plusieurs éléments caractéristiques de la composition et de l'organisation de la surface (pierrosité, travaux du sol, végétation etc.) il conviendra de privilégier la prise en compte de ces paramètres. En définitive l'analyse préliminaire constitue une phase essentielle de la préparation de la mission de terrain en facilitant l'établissement d'un plan d'échantillonnage: choix de la localisation des sites, choix des variables à collecter, etc.

3. L'étude synchronique des relations états de surface/image au niveau des sites tests

L'objectif de cette étape est de révéler les relations existant entre les états de surface observés sur le terrain (entre le 15 Novembre et le 3 Décembre 1987) et l'image SPOT acquise au même moment (30 Novembre 87). Autrement dit, il s'agit d'une part de savoir s'il est possible d'associer d'une façon biunivoque états de surface/caractéristiques radiométriques mesurées par les capteurs HRV de SPOT et d'autre part d'établir la meilleure façon d'associer ces états de surface aux paramètres écologiques (sols, végétation, occupation humaine, hydrologie, etc) qui conditionnent les ressources renouvelables dans leur état présent, leur utilisation et leurs potentialités que l'on a pour objectif de cartographier. Ces relations sont indispensables à connaître pour une utilisation effective et efficace des données satellitaires.

L'étude de terrain a été conduite au niveau de sites tests (50) où ont été effectués des observations précises de la surface du sol et des mesures radiométriques. La composition colorée à 1/50.000 sur papier s'avère constituer un document irremplaçable pour un repérage précis sur le terrain. Le choix de l'emplacement des sites tests se réfère à l'étape précédente mais résulte surtout d'une confrontation terrain/image permettant une localisation sans ambiguïté, ainsi qu'une appréciation de l'hétérogénéité et de la représentativité du site par rapport à l'objectif thématique.

La description de la surface est facilitée par l'emploi d'un formulaire adapté à ce type d'études utilisant les données satellitaires. Un formulaire simplifié a été construit à partir d'un modèle plus général (POUGET and MULDER, 1988, cf Annexe I). Il comporte deux volets:

- les données stationnelles: situation dans le paysage, géomorphologie, pente, exposition, érosion, sols, végétation, occupation du sol, etc.
- les données qui caractérisent qualitativement et quantitativement la composition et l'organisation de la surface du sol au moment de la description, c'est-à-dire l'état de surface: microrelief, couverture végétale et couverture minérale.

Pour étudier le comportement radiométrique des états de surface et le comparer aux données SPOT des mesures radiométriques ont été effectuées avec un radiomètre CIMEL (3 canaux analogues à HRV) sur les différents éléments composant la surface.

L'information image est apportée par les données radiométriques acquises le 30 Novembre 87 par les deux capteurs HRV1 et HRV2 de SPOT.

La confrontation terrain/image doit permettre d'établir une typologie des états de surface susceptibles d'être perçus par le satellite et surtout de fournir les clés pour l'interprétation thématique des images SPOT.

4 . L'analyse diachronique des images Spot (cartographie des états de surface)

Cette analyse permet la synthèse et surtout la généralisation spatiale des relations états de surface/image établies dans l'étape précédente.

L'analyse diachronique peut se décomposer en 3 phases:

- *superposition géométrique* des deux images.
- *classification de chaque image* prise séparément avec interprétation thématique des classes obtenues selon deux démarches possibles:
 - * soit une démarche dirigée déjà utilisée pour la classification d'avril. Les relations établies au niveau des sites tests permettent d'ajuster au mieux ces classifications tout en précisant la signification thématique des classes.
 - * soit une démarche non dirigée, les relations précédentes sont alors utilisées pour valider les classifications et pour donner "a posteriori" une signification thématique aux classes. C'est cette démarche que nous avons adoptée.
- *La création d'une image multidate* et son interprétation conduisent à distinguer des **unités permanentes** et des **unités variantes**. la restitution cartographique n'est autre qu'une **carte des états de surface** prenant en compte la dynamique saisonnière.

On obtient ainsi une stratification de l'espace en **unités** qu'il est possible de relier à des états de surface et plus précisément aux facteurs influençant les radiométries SPOT: humidité, couleur du sol et rugosité; ce dernier facteur étant en relation avec la densité du couvert végétal steppique et le microrelief créé par les labours ou les accumulations sableuses piégées par les touffes de végétation. On interprète et on cartographie à moyenne échelle (1/50 000) ces unités en terme de milieu caractérisées par la géomorphologie, la végétation, l'occupation humaine, la nature de la surface du sol. Une telle stratification de l'espace sert de base à la cartographie des ressources renouvelables (sol, végétation) et d'une façon plus générale à l'élaboration de cartes thématiques variées. Nous présenterons avec un peu plus de détails les trois phases, déjà évoquées, de l'analyse diachronique.

Phase 1 - Superposition géométrique des deux images. La superposition géométrique d'images SPOT prises à des dates différentes ne pose pas de problèmes particuliers d'autant que dans le cas présent la superposition se résume à une simple translation (prise de vue quasi verticale pour les deux dates).

Phase 2 - Classification et interprétation thématique des deux images. Concernant la phase classification, nous avons adopté une approche globale qui consiste à appliquer un modèle de décomposition de l'espace géographique à partir de ces données satellitaires (c'est-à-dire des valeurs radiométriques), de manière non supervisée pour chaque date afin de réaliser une image multidate (ANDRIANASOLO et MALEK, 1988, MALEK, 1989).

Ce modèle de décomposition de l'espace comprend plusieurs étapes:

- *création d'une population échantillon.* Etant donné le grand nombre de pixels contenus dans une image, l'analyse des données est faite à partir d'une population échantillon représentative. On réalise un échantillonnage du type aléatoire systématique. L'effectif E de la population échantillon est déterminé par une relation fonction de la variance totale et de la précision désirée.
- *classification automatique* dont le but est de répartir, à l'aide de critères de distances, cette population en N classes homogènes. La méthode utilisée est la **méthode des centres mobiles** qui permet de construire, par itérations successives, la partition d'une population quelconque en un nombre de classes choisi à l'avance (de 2 à N classes). La partition est réalisée en se basant sur des critères de distance entre classes et entre individus: décomposition de la variance totale T en variance intra-classe W et en variance inter-classes B ($T=W+B$) avec maximisation de B et minimisation de W. L'utilisation de la classification en centres mobiles doit comporter un critère d'arrêt mais la détermination du nombre maximum de classes au sein d'une population est un problème complexe. La détermination de ce critère peut reposer soit sur des considérations

statistiques ou mathématiques de stabilité maximale des classes soit, comme nous l'avons fait, sur des critères thématiques liés à la connaissance du milieu (ne pas scinder des thèmes identifiés comme homogènes).

L'application d'une classification ascendante hiérarchique (CAH) aux centres des classes obtenus par les différentes itérations de la méthode des centres mobiles permet de suivre la filiation des classes obtenues lors des partitions successives et facilite l'interprétation thématique.

* *extrapolation à l'ensemble de l'image.* Les centres de classes, ainsi obtenus (valeurs radiométriques dans chacun des canaux SPOT XS1, XS2, XS3), sont utilisés pour réaliser la classification de l'ensemble de l'image en 2,3,4,...N classes. Chaque pixel de l'image est affecté à la classe pour laquelle la "distance" calculée est minimale (distance euclidienne, dans le cas présent).

* *interprétation thématique.* L'interprétation thématique se fonde sur l'information apportée par les sites tests et par les documents annexes déjà acquis sur la zone. Par ailleurs une information très intéressante est fournie avec le calcul d'indices radiométriques et la création de néo-canaux correspondant: indice de végétation, indice de brillance, indice de couleur (cf paragraphe ci-après). Les diagrammes, obtenus en combinant deux à deux ces néo-canaux, permettent de situer les unes par rapport aux autres les différentes classes représentées par la moyenne des valeurs des pixels dans les deux canaux concernés.(cf Figure 8 et 9).

Phase 3 Création d'une image multidate. Concrètement la construction d'une image multidate se fait en superposant les deux images classées (10 avril 87 et 30 novembre 87). L'image générée contient toutes les unités multidates et mélange deux grands ensembles d'unités selon leur stabilité thématique:

- les **unités permanentes**, dont la signification thématique reste la même entre les deux dates.
- les **unités variantes**, correspondant aux surfaces dont la signification thématique a changé dans l'intervalle de temps considéré, c'est-à-dire 8 mois.

Cette image multidate contribue à préciser l'interprétation thématique des états de surface et leur dynamique. Comme précédemment cette interprétation thématique s'appuie sur les néo-canaux et les sites tests qui apportent en outre une validation, au moins qualitative dans notre cas, des résultats ainsi obtenus. Un exemple d'interprétation thématique d'image multidate sera présenté et discuté au chapitre IV.

5 - Ebauche de cartographie thématique à moyenne échelle.

L'image multidate constitue une base solide permettant l'élaboration de la plupart des documents cartographiques relatifs au diagnostic écologique traditionnel: cartes de l'occupation des terres, cartes des ressources renouvelables (sols, végétation), etc.

La présentation de l'exemple d'El Omayed (cf chapitre IV) fournira une illustration de ces types de documents qui, en tout état de cause, ne sont que des documents pour aller sur le terrain et pour effectuer, soit la carte des sols pour le pédologue, soit la carte phytoécologique pour l'écologue, etc. Ce travail n'était pas défini comme étant l'un des objectifs du projet.

CHAPITRE III

ANALYSE SYNCHRONIQUE: LES RELATIONS ETATS DE SURFACE/IMAGE AU NIVEAU DES SITES TEST AVEC ESSAI DE TYPOLOGIE DES ETATS DE SURFACE

L'objectif est d'inventorier et de caractériser les principaux états de surface susceptibles d'être perçus par le satellite et par là même susceptibles de fournir une information utile pour la cartographie des ressources renouvelables.

Les relations états de surface/image seront étudiées à partir de l'analyse de l'information terrain et de l'information image collectées en mode synchrone au niveau des sites tests (50) répartis sur l'ensemble de la zone étudiée, c'est-à-dire de Burg el Arab à El Alamein.

1. Données et méthodes

L'**information terrain** est constituée, pour chaque site test, des données concernant *la description de la surface et des mesures radiométriques* (réflectance).

Parmi les nombreuses données collectées à l'aide du formulaire on retient 34 variables qualitatives et quantitatives (Tableau 2)

Tableau 2
Liste des variables "description de la surface"

1- Données sur le site																										
GM	Unité géomorphologique (6 classes)																									
PE	Pente (4 classes)																									
EX	Exposition (3 classes)																									
EO	Intensité de l'érosion éolienne (4 classes)																									
HY	Intensité de l'érosion hydrique (4 classes)																									
MA	Matériau originel du sol (7 classes)																									
OC	Occupation du sol (7 classes)																									
2- Caractérisation de l'état de surface																										
21 Microrelief																										
MN	Nature (5 classes)																									
MR*	Importance par rapport à surface totale (en %)																									
MH*	Hauteur (4 classes)																									
ML*	Largeur (5 classes)																									
MM*	Longueur (3 classes)																									
MO	Orientation (6 classes)																									
22 Couverture végétale																										
	Végétation sur pied	RP* recouvrement (en %)																								
		VS* structure (4 classes)																								
RV	Recouvrement total (en %)	VH* hauteur moyenne de la classe dominante (5cl)																								
	Litière	RL* recouvrement (en %)																								
23 Couverture minérale																										
	Affleurement rocheux	RR* recouvrement (en %)																								
	Pierrosité (>7,5 cm)	RO* recouvrement (en %)																								
		RG* recouvrement (en %)																								
	Graviers (7,5 à 0,2 cm)	GN* nature (4 cl)																								
RM	Recouvrement total (en %)	RT recouvrement (en %)																								
		TX* texture (3 classes)																								
	Terre fine (<0,2 cm)	TH* humidité (3 classes)																								
		OC couleur (10 classes)																								

Terre fine	Structure particulière	RS* recouvrement (en %)																								
		SN* nature (4 classes)																								
	Structure en agrégats	RA* recouvrement (en %)																								
		AN* nature (4 classes)																								
		AD* diamètre (4 classes)																								
	Structure continue avec croûte	RC* recouvrement (en %)																								
		BN* nature (4 classes)																								
Les variables repérées d'une * ont été prises en compte dans l'AFC.																										
0----->100 %																										
<table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="padding: 5px;">RV</th> <th colspan="3" style="padding: 5px;">RM</th> <th colspan="3" style="padding: 5px;">RT</th> </tr> <tr> <th style="padding: 5px;">RP</th> <th style="padding: 5px;">RL</th> <th style="padding: 5px;">RR</th> <th style="padding: 5px;">RO</th> <th style="padding: 5px;">RG</th> <th style="padding: 5px;">RS</th> <th style="padding: 5px;">RA</th> <th style="padding: 5px;">RC</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="width: 15%;"></td> <td style="width: 15%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> </tr> </tbody> </table>			RV		RM			RT			RP	RL	RR	RO	RG	RS	RA	RC								
RV		RM			RT																					
RP	RL	RR	RO	RG	RS	RA	RC																			
Schéma récapitulatif montrant les différentes composantes de la surface (recouvrement total = 100 %)																										

Les mesures radiométriques ont été réalisées avec un radiomètre CIMEL sur chacun des éléments composant la surface, par exemple:

- les différents types de structure caractérisant la terre fine: agrégats, croûte de battance, croûte saline, etc.

- les éléments du microrelief: buttes sableuses colonisées par la végétation, espaces entre les buttes, etc.

On effectue ensuite une pondération de la réflectance pour caractériser globalement le comportement radiométrique de l'ensemble du site. A partir de ces valeurs on calcule les indices radiométriques (Annexe II):

indice de brillance (réflectance)

$$IBR = \sqrt{\frac{(XR_1)^2 + (XR_2)^2 + (XR_3)^2}{3}}$$

indice de végétation (réflectance)

$$IVR = \frac{XR_3 - XR_2}{XR_3 + XR_2} * 100$$

indice de couleur (réflectance)

$$ICR = \frac{XR_2 - XR_1}{XR_2 + XR_1} * 100$$

Les données SPOT

Les sites tests se répartissent sur les deux scènes SPOT dont la dynamique est très sensiblement la même comme on peut le vérifier dans la zone de recouvrement. Après localisation sur l'image, on extrait pour chaque site, les valeurs radiométriques moyennes pour les trois canaux SPOT: XS₁, XS₂, XS₃ ainsi que les indices (Annexe III):

indice de brillance

$$IB = \sqrt{\frac{(XS_1)^2 + (XS_2)^2 + (XS_3)^2}{3}}$$

indice de végétation

$$IV = \frac{XS_3 - XS_2}{XS_3 + XS_2}$$

c'est-à-dire:

$$128 * \frac{(1 + (XS_3 - XS_2))}{(XS_3 + XS_2)}$$

indice de couleur

$$IC = \frac{XS_2 - XS_1}{XS_2 + XS_1}$$

c'est-à-dire:

$$128 * \frac{(1 + (XS_2 - XS_1))}{(XS_2 + XS_1)}$$

Les méthodes d'analyse

Pour l'essentiel, l'analyse des données consiste à effectuer une classification des sites en fonction de ces 3 ensembles de données.

L'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) est utilisée pour tenter une typologie des états de surface en se basant sur la description qui en a été faite sur le terrain et comportant à la fois des variables qualitatives et quantitatives (microrelief, couverture végétale et minérale). On cherche à connaître les relations entre variables mais surtout à savoir comment s'effectue le regroupement des individus c'est-à-dire des états de surface et quelles sont les variables les plus déterminantes.

Pour classer les sites en fonction des données radiométriques (CIMEL et SPOT) la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) est mieux adaptée. Le regroupement des sites est basé alors sur la distance (distance euclidienne) qui les sépare dans l'espace radiométrique à 3 dimensions correspondant aux 3 canaux du visible et du proche-infrarouge.

2. Les résultats

2.1. Typologie des états de surface à partir de la description de terrain

Le tableau 2 indique les 18 variables actives retenues sur un total de 34 relevées lors de la phase terrain. Ce choix résulte à la fois de la capacité limitée du logiciel utilisé (STATITCF) et de la nécessité de prendre en compte, en priorité, les caractéristiques de la surface (microrelief, couverture végétale et minérale). Les variables quantitatives sont transformées automatiquement en classes.

L'Analyse Factorielle des Correspondances fait apparaître plusieurs ensembles de sites auxquels on peut associer les variables les plus discriminantes permettant de caractériser des types d'états de surface (Fig.3):

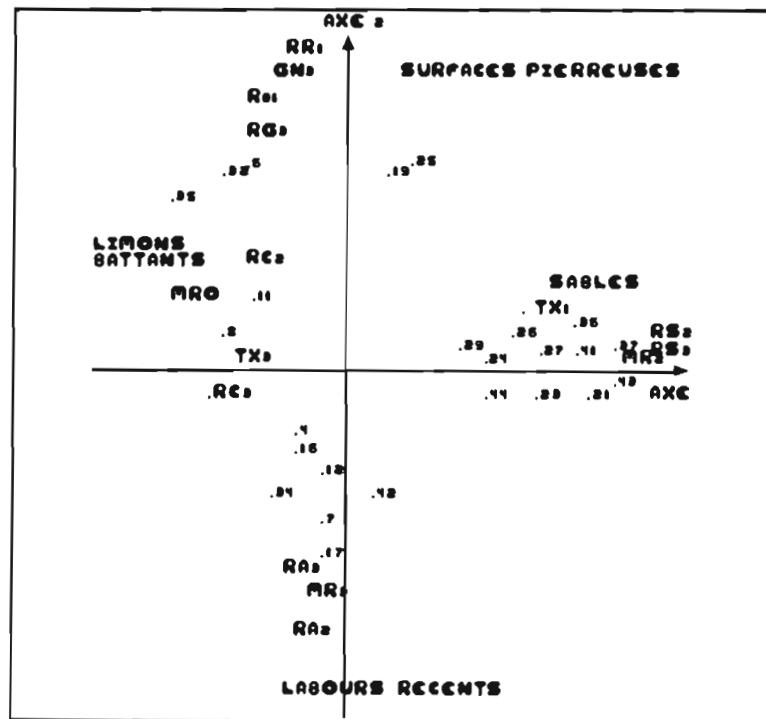


Figure 3. Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) sur les données description de terrain. Graphique Axe 1/Axe 2 (les chiffres indiquant les numéros des sites, les sigles les variables proposées au tableau 2)

- **les sables** (sites n° 21, 23, 24, 26, 27, 29, 36, 37, 41, 43, 44): texture sableuse (TX1), structure particulière (RS2,RS3) et microrelief relativement important (MR2=20 à 80% de la surface).
- **les limons battants** (sites n°8,11): texture limoneuse à sablo-limoneuse (TX3), structure continue avec croûte (RC2,RC3) et microrelief nul (MR0).
- **les surfaces pierreuses** (sites n°6, 25, 32, 35): affleurements rocheux (RR1), graviers (RG3) constitués de débris de grès calcaires et de croûte calcaire (GN3). Ce sont les sites situés sur les dunes consolidées (ridges) et le plateau avec croûte calcaire affleurante.
- **les labours récents sur sables** (sites n°17, 42) **et limons** (sites n°7, 12) **et certains labours anciens sur limons** (sites n°4, 16, 34): structure en agrégats dominants (RA3) et microrelief important (MR3>80% de la surface).
- **les "salt marsh" à croûte saline**: surfaces caractérisées par une structure continue avec croûte saline (BN3), très humides (TH3).
- **les "salt marsh" à pseudosables**: surfaces caractérisées par une structure en microagrégats type pseudosables (AN3), humides (TH2).

2.2. Typologie des états de surface à partir des données radiométriques de terrain

L'arbre hiérarchique (Fig. 4) entre les sites tests calculé par Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) sur les données radiométriques de terrain montre une partition en 14 classes matérialisées par le trait vertical (tiret).

CLASSES

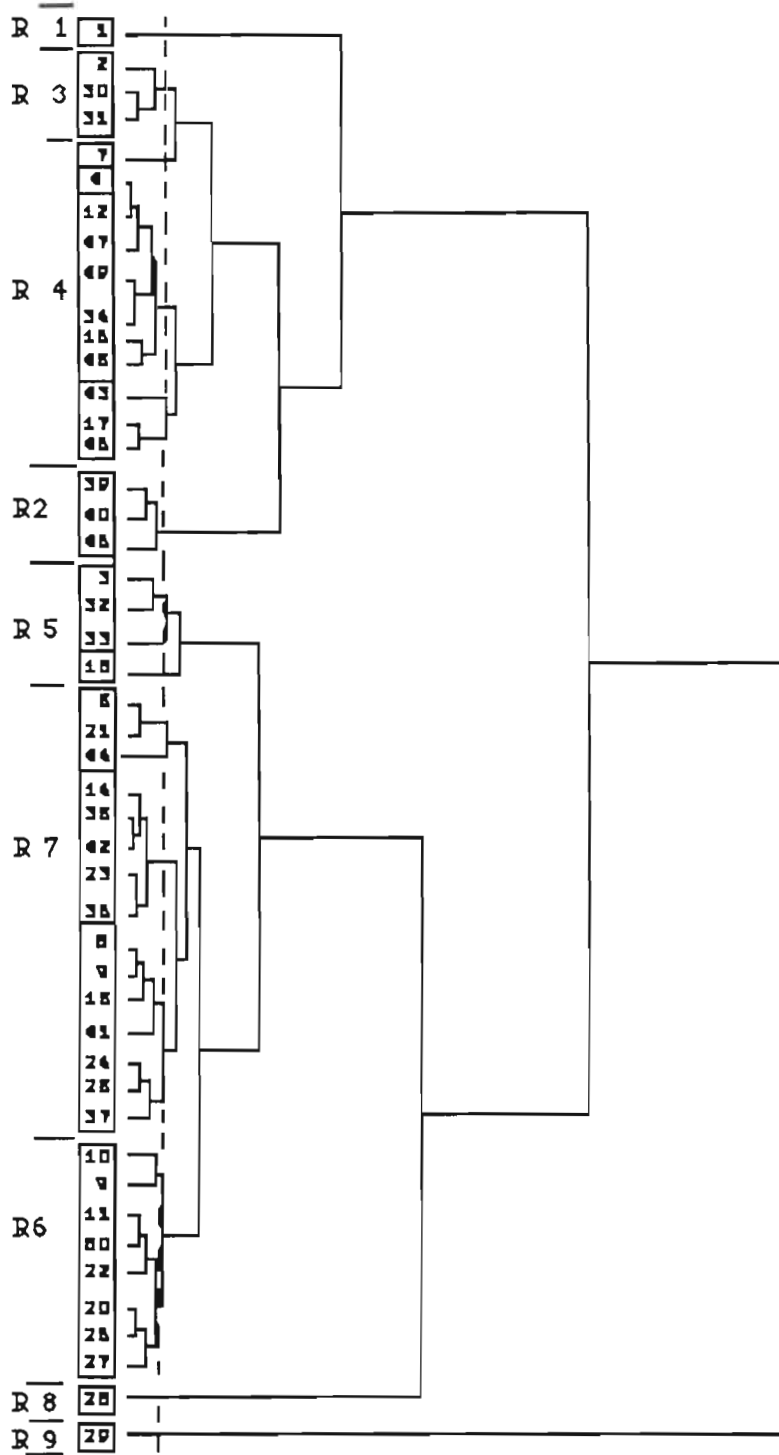


Figure 4. Arbre hiérarchique entre les sites tests (47) calculé par Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) sur les données radiométriques de terrain.

Pour chacune de ces classes, comprenant un ou plusieurs sites, on calcule les indices radiométriques moyens (IBR, IVR, ICR) afin d'aider à l'interprétation thématique qui s'appuie également sur les descriptions de terrain. Des regroupements s'imposent et l'on distingue 8 classes principales (Tableau 3) qui correspondent soit à un type d'état de surface relativement bien défini (R1,R8,R9), soit à plusieurs types.

Tableau 3:
Typologie des états de surface à partir des données radiométriques de terrain

Classes	Etats de surface	IBR	IVR	ICR
R1	Végétation active	354	78	> 0
R2	"Salt marsh fonçés" steppes à halophytes	258	22	20
R3	"Salt marsh clairs" steppes à halophytes	328	11	10
R4	Labours récents (sables et limons) et Labours anciens (limons), pseudosables.	385	10	18
R5	Steppes-labours anciens (sables,limons)	462	10	17
R6	Steppes-labours anciens (sables, limons)	515	13	14
R7	Steppes-labours anciens (sables)	551	4	13
R8	Croûte saline	641	1	<0
R9	Sables blancs (dune côtière)	1020	8	8

Ainsi la **végétation active** (R1) se distingue nettement de tout l'ensemble avec un indice de végétation très élevé (site n°1, parcelle de Trèfle d'Alexandrie irrigué).

La **croûte saline** (R8), qui recouvre entièrement certaines dépressions asséchées (site n°28), présente des caractéristiques radiométriques spécifiques: réflectance élevée dans tous les canaux avec $XR_1 > XR_2 > XR_3$ et $ICR < 0$. Les **sables blancs** de la dune côtière (R9), avec des surfaces très claires, tranchent sur la totalité des autres sites (cf valeurs excessives de l'indice de brillance IBR).

Les classes R2 et R3 regroupent les états de surface des dépressions salines: "salt marsh" où dominent les steppes à halophytes:

- R2: "**Salt marsh fonçés**" c'est-à-dire soit des steppes denses à halophytes (*Tamarix articulata*, *Suaeda fruticosa*, *Atriplex halimus* pour les sites n°40 et 48), soit des steppes moins denses avec entre les touffes de végétation une surface humide et "rugueuse" constituée de microagrégats (pseudosables).
- R3: "**Salt marsh clairs**", le plus souvent il s'agit de steppes à *Halocnemum strobilaceum* avec croûte saline (site n°31). Le site n°2 correspond par contre à une parcelle récemment labourée à l'intérieur du périmètre irrigué de Burg el Arab.

La classe R4 individualise plusieurs types d'états de surface "**labours**" caractérisés par une rugosité importante:

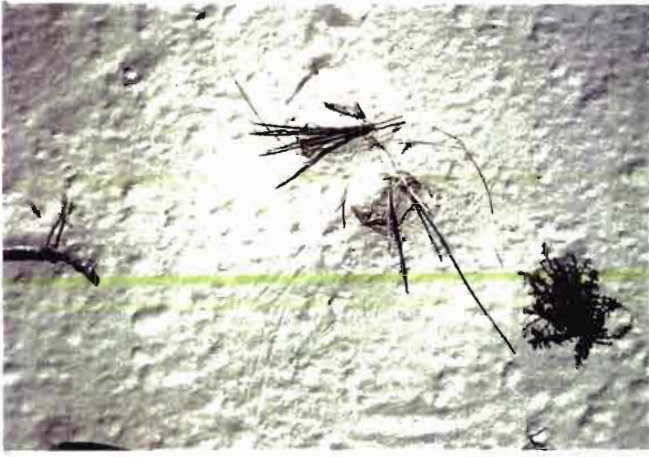
- labours récents sur sables (sites n°17,43,45) ou sur limons (sites n°7,12).
- labours anciens (printemps 87) sur limons (sites n°4,34,49), avec parfois des pseudosables secs (site n°46) à frais (site n°47).

Les classes R5,R6,R7 forment un ensemble complexe **steppes-labours anciens** où les surfaces sont de plus en plus "brillantes" en relation avec la diminution du couvert végétal et de la rugosité. Les données radiométriques ne permettent pas de discriminer les différents états de surface caractérisant cet ensemble steppes-labours anciens, tout au plus permettent-elles de les situer dans un continuum où d'une façon générale la rugosité diminue.

PLANCHE I

LES ETATS DE SURFACE : MILIEUX NATURELS

- PHOTO 1: Sables blancs de la dune côtière (R9, S11).
- PHOTO 2: Croûte saline (R8, S7);
- PHOTO 3: Sables siliceux rougeâtres. Steppe claire (R6, R7, S8).
- PHOTO 4: "Salt marsh" clairs: steppe à *Halocnemum strobilaceum* (R3, S3).
- PHOTO 5: Surfaces pierreuses des dunes consolidées (ridges).
- PHOTO 6: "Salt marsh" fonçés à pseudosables:
steppe à *Suaeda fruticosa* (R2, S2)



1



2



3



4



5



6

PLANCHE II

LES ETATS DE SURFACE : LABOURS

- PHOTO 1: Labour récent sur sables (R4, S4).
- PHOTO 2: Labour ancien sur sables (R7, S8).
- PHOTO 3: Labour récent sur limons (R4, S4).
- PHOTO 4: Labour ancien sur limons (R5, S5).
- PHOTO 5: Labour ancien sur limons (R6, S6).
- PHOTO 6: Limons battants (S10).



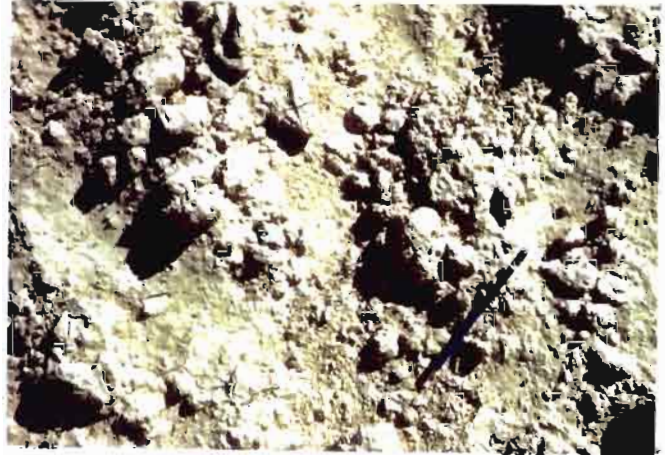
1



2



3



4



5



6

2.3. Typologie des états de surface à partir des données SPOT (30 Novembre 1987)

L'arbre hiérarchique (Fig. 5) entre les 50 sites tests, calculé par la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) sur les données SPOT, montre une partition en 15 classes matérialisée par le trait vertical (tiret).

Après regroupement il subsiste 11 classes principales correspondant à un ou plusieurs états de surface (Tableau 4).

*Tableau 4:
Typologie des états de surface à partir des données SPOT (30 Novembre 1987).*

Classes	Etats de surface	IBR	IVR	ICR
S1	Végétation active	73	208	117
S2	"Salt marsh foncés" steppes à halophytes	75	158	135
S3	"Salt marsh clairs" steppes à halophytes	91	141	133
S4	Labours récents (sables et limons) et Labours anciens (limons),	110	138	135
S5	Steppes à végétation dense, lab. anciens	121	133	136
S6	Steppes-labours anciens (sables, limons)	125	136	135
S7	Croûte saline	128	117	126
S8	Steppes, labours anciens (sables)	135	135	137
S9	Steppes, limons battants	138	135	139
S10	Limons battants	141	143	137
S11	Sables blancs (dune côtière)	197	122	127

On retrouve ici les types les plus caractéristiques mis en évidence à partir des données radiométriques de terrain (cf Tableau 3):

- la **végétation active** (S1).
- les **steppes à halophytes** des "salt marsh foncés et clairs" (S2 et S3).
- les **labours récents** (sables et limons) et **anciens** (limons) avec parfois des **pseudosables** (S4).
- la **croûte saline** (S7) dont les caractéristiques radiométriques sont atténuées car l'ensemble de la zone où se situe le site n°28 ne représente que quelques pixels (pixels composites) dans un environnement dominé par des états de surface de type "salt marsh" (S2,S3).
- les **sables blancs** de la dune côtière (S11).

Il est intéressant de noter une distribution différente des sites dans le complexe steppes-labours anciens:

- un état de surface **limons battants** (S10) déjà mis en évidence dans l'analyse des données concernant la description de terrain (sites n°8 et11), s'individualise assez nettement et se caractérise par un indice de brillance élevé.

- la classe S5 regroupe plusieurs types d'états de surface dont les **steppes sableuses à végétation dense** (recouvrement végétal entre 8 et 15%).

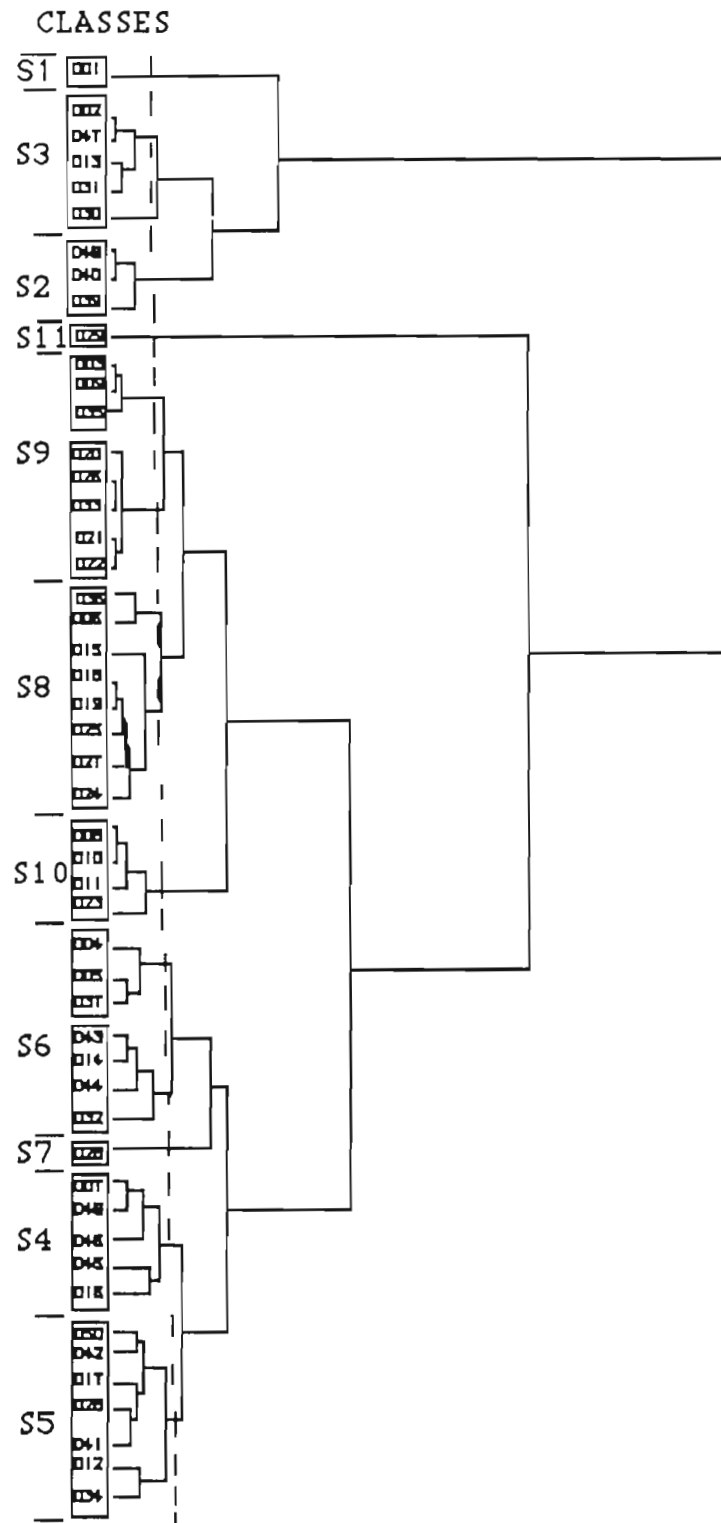


Figure 5. Arbre hiérarchique entre les sites tests (50) calculé par Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) sur les données radiométriques SPOT (30 Novembre 1987)

3. Synthèse: Typologie des états de surface perçus par SPOT à une date.

Les analyses précédentes apportent des éléments pour esquisser une typologie des états de surface perçus par SPOT à la date du 30 Novembre 1987. Cette typologie s'organise autour de quatre ensembles principaux:

- Les états de surface associés d'une façon **biunivoque** à des caractéristiques radiométriques spécifiques correspondent le plus souvent à des milieux écologiques bien déterminés:
 - la **végétation active** est représentée ici par une parcelle irriguée de trèfle d'Alexandrie (site n°1). Un échantillonnage plus fourni aurait introduit une diversification du type de végétation (autre culture irriguée ou végétation naturelle à dominante de roseaux en bordure des zones inondées dans les dépressions salines) et une diversification des réponses radiométriques.
 - la **croûte saline** qui se forme à la surface des lacs salés (évaporites) présente une "signature spectrale" caractéristique avec des valeurs radiométriques décroissantes dans le sens des canaux XS₁, XS₂, XS₃.
 - les **sables blancs** de la dune côtière correspondent à des valeurs radiométriques très élevées dans les trois canaux.
- Un autre ensemble concerne les états de surface associés à un milieu écologique, bien individualisé mais très diversifié, les **dépressions salines**, où les radiométries (CIMEL et SPOT) permettent de distinguer nettement deux sous-ensembles, les "**salt marsh fonçés**" et les "**salt marsh clairs**" caractérisés chacun par plusieurs types d'états de surface en fonction de la densité et de la nature du couvert végétal, de la nature (croûte saline, pseudosables) et de l'état (humidité) de la surface du sol.
- L'**état de surface labours**, qui regroupe en fait plusieurs types (labours récents sur sables ou sur limons, labours anciens sur limons), occupe une place assez précise dans l'espace radiométrique entre les "salt marsh", plus sombres et l'ensemble steppes-labours plus clair. Les labours sur limons conservent pendant plusieurs mois une certaine rugosité en raison de la stabilité des agrégats. Cette surface motteuse est ensuite "fixée" par une croûte de battance qui contribue au maintien de la rugosité. Sur sables, les labours sont très rapidement "détruits" et les surfaces aplanies en raison de la fragilité des agrégats et de l'importance de l'érosion éolienne.
- Dans l'ensemble **steppes-labours anciens** les caractéristiques radiométriques, en saison sèche, ne permettent pas de distinguer les états de surface correspondant aux deux principales composantes, à l'exception des limons battants qui assurent la transition avec les sables blancs de la dune côtière. Dans ce complexe, les états de surface "pierreux", pourtant bien définis par la description sur le terrain, ne s'individualisent pas. Il en est de même pour la steppe à *Limoniastrum* (site n°14).

En définitive, au travers de cette typologie on perçoit la nature et l'importance, très variable selon les milieux, de l'information susceptible d'être apportée par cette image SPOT. On en perçoit les **limites**, le satellite ne distingue pas les surfaces sableuses des surfaces limoneuses sauf dans le cas où les textures sont associées à une autre caractéristique qui elle est discriminante, telle la luminosité très élevée des sables blancs ou des limons battants. La texture peut apparaître aussi indirectement par une **différence de comportement** du sol après un labour: sur limons la rugosité créée par les agrégats subsiste plusieurs mois (labours anciens) alors que sur sables, les agrégats très fragiles et l'érosion éolienne toujours intense contribuent à aplanir la surface en quelques semaines sinon quelques jours. Pour mettre en évidence cette différence de comportement et exploiter ainsi une telle possibilité d'information il faut envisager une étude diachronique. A cet égard, la scène du 10 Avril 87 s'est révélée particulièrement intéressante.

CHAPITRE IV

ANALYSE DIACHRONIQUE : CARTOGRAPHIE DES ETATS DE SURFACE DE LA REGION D'EL OMAYED

Les données SPOT permettent la mise en évidence d'une information importante sur les états de surface qui sont en relation plus ou moins directe avec les paramètres écologiques (sols, végétation, occupation humaine, hydrologie, etc.) et conditionnent les ressources renouvelables dans leur état présent, leur utilisation et leurs potentialités.

Si les principaux milieux écologiques (dune côtière, dépressions salines, périmètres irrigués, zones labourées,) se distinguent relativement de nombreuses confusions subsistent cependant. Pour une part l'analyse diachronique devrait permettre de distinguer sans ambiguïté les zones d'aridoculture (sur sables et sur limons) des zones sous végétation naturelle.

En prenant l'exemple de la région d'El Omayed (scène KJ: 107-288) nous nous proposons maintenant de présenter les résultats obtenus par la mise en jeu de l'analyse diachronique.

1 - ANALYSE DIACHRONIQUE DES IMAGES SPOT 10 Avril 1987/30 Novembre 1987

Dans une première phase nous avons donc procédé à la superposition géométrique des deux images 10 avril 1987 et 30 novembre 1987 de la région d'El Omayed. La zone présentée ici correspond à un fichier de 1400 lignes et 988 colonnes soit au total 1 383 200 pixels SPOT. (28*20 kms, soit environ 560 km²).

1.1. - Classification et interprétation de l'image du 10 avril 1987

La classification, de type non dirigé, consiste à appliquer un modèle de décomposition de l'espace comportant plusieurs étapes:

- *Création d'une population échantillon* de 8715 pixels (1 pixel sur 4 selon les lignes et les colonnes).

- Classification de cette population échantillon en classes (de 2 à 12 classes) selon la méthode des centres mobiles. L'application d'une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) aux centres de classes obtenus par les différentes itérations permet de suivre la filiation des classes correspondant à chacune des partitions (Figure 6).
- Classification de l'ensemble de l'image. Elle est réalisée à chacune des itérations à partir du centre des classes (méthode distance minimum). On obtient ainsi de nouvelles images à 2, 3,...12 classes (Figure 6).
- Interprétation thématique. La figure 6 et les images successives (Figure 7) montrent les filiations entre les différentes classes, individualisant et hiérarchisant ainsi des thèmes correspondant à des milieux écologiques bien définis.

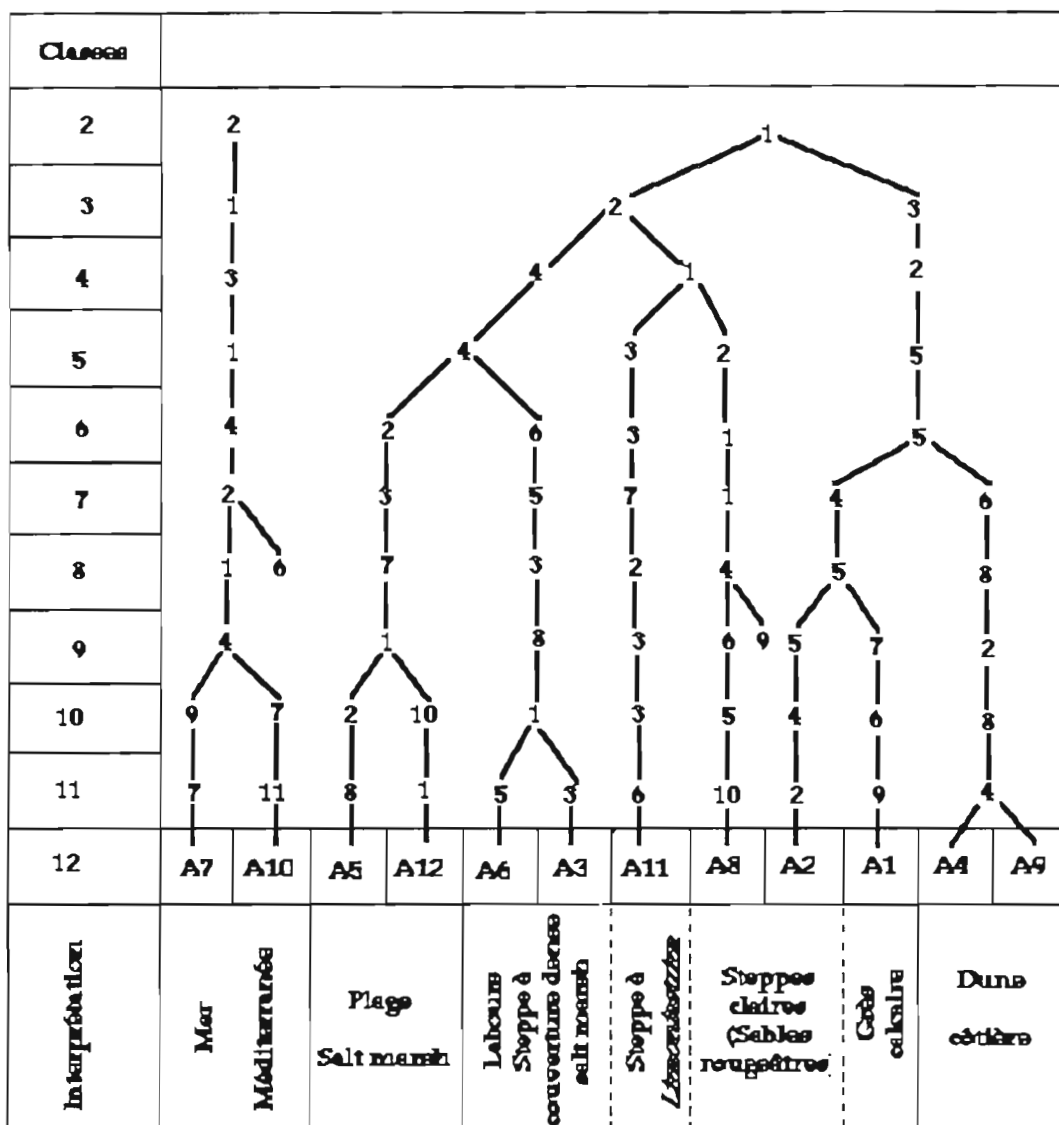
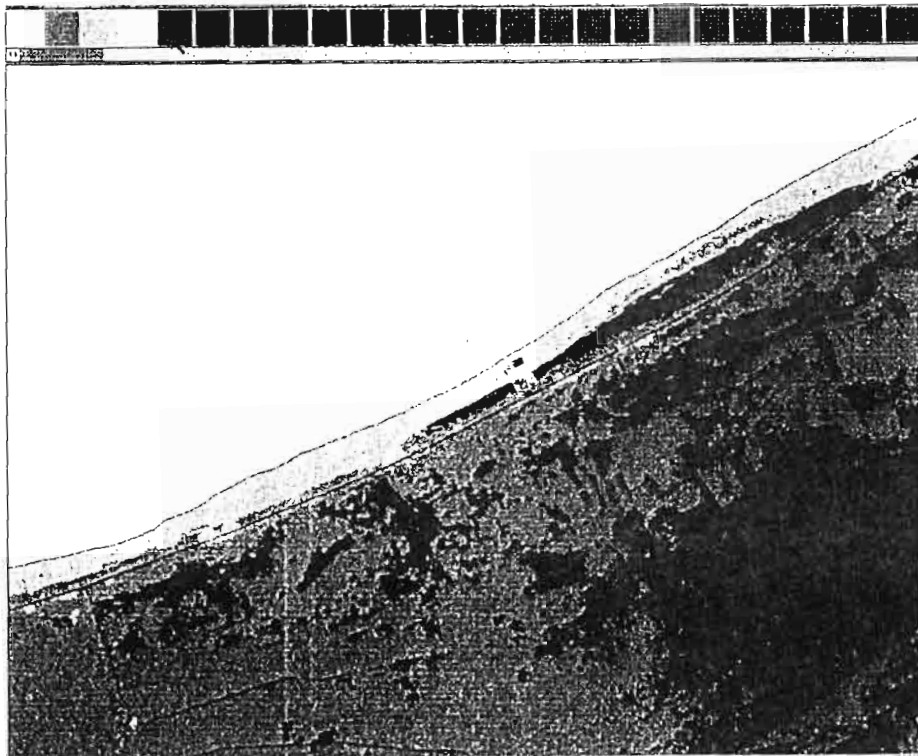
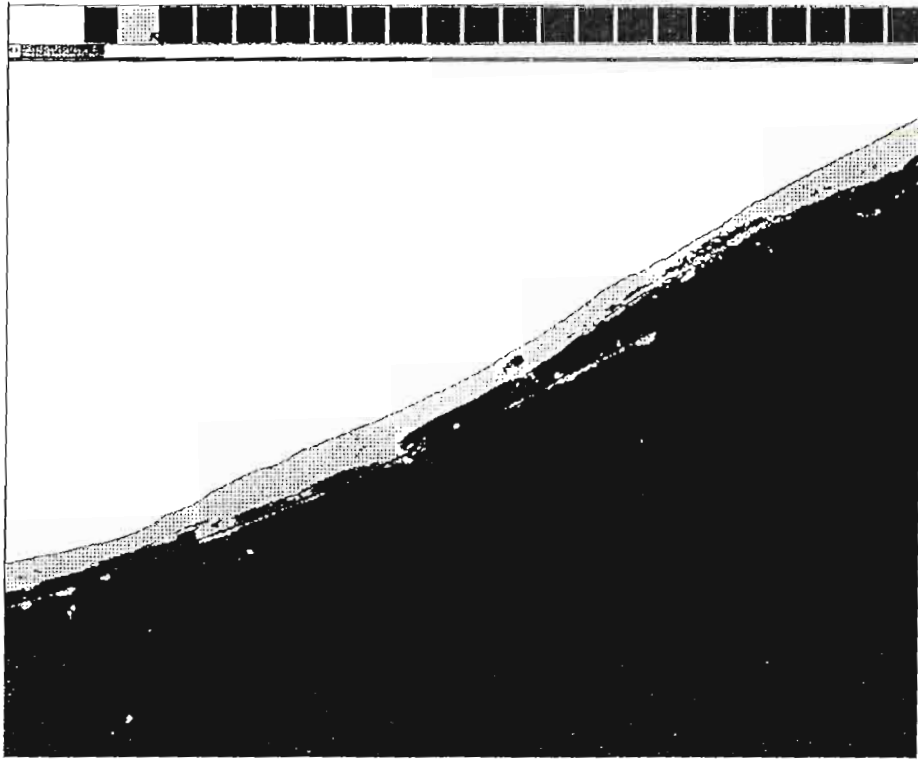


Figure 6 - Filiation des classes obtenues par les différentes itérations (2 à 12 classes) SPOT 10 avril 1987



L'image à 2 classes distingue bien évidemment la mer (2) et les milieux terrestres (1).

L'image à 3 classes conduit à subdiviser les milieux terrestres en deux ensembles: la dune côtière (3) et le reste (2) qui à son tour se subdivise à l'étape suivante (4 classes).

L'image à 12 classes comprend en réalité plusieurs ensembles qui s'organisent selon des luminances croissantes depuis la mer jusqu'à la dune côtière:

- A7 et A10: mer Méditerranée.
- A5 et A12: plage et salt marsh.
- A6 et A3: labours et steppe à couvert dense, salt marsh.
- A11: steppe à *Limoniastrum* sur nebkas et glaçis à surface caillouteuse (croûte calcaire).
- A8 et A2: steppes claires (sables rougeâtres).
- A1: dunes consolidées de grès calcaire.
- A4 et A9: dune côtière.

Cette interprétation est basée, pour une large part, sur les sites tests et les néocanaux créés à partir des indices radiométriques (IB, IV, IC).

1.2 - Classification et interprétation de l'image du 30 novembre 1987.

Une démarche analogue permet d'obtenir une image avec 13 classes, à la date du 30 novembre 1987, et dont l'interprétation devrait être facilitée par les sites tests observés au moment de la prise de vue. La partie ouest de l'image est plus délicate à interpréter en raison de la présence de quelques nuages.

Le tableau 5 indique, pour chaque site test, le pourcentage de pixels appartenant à chaque classe. Il est donc possible de valider, au moins qualitativement, l'interprétation que l'on peut faire, pour chacune des classes échantillonnées.

Depuis la mer jusqu'à la dune côtière l'interprétation des 13 classes est la suivante:

- N13 et N1: mer Méditerranée.
- N6: plage et salt marsh.
- N7: salt marsh, labours et steppes à couvert dense.
- N4 et N5: steppes à couvert dense, steppe à *Limoniastrum*.
- N9: dune consolidée de grès calcaire.
- N10 et N11: dominance steppes claires (sables rougeâtres).
- N8 et N12: steppes claires.
- N2 et N3: dune côtière.

En réalité l'interprétation de cette image reste peu précise. Les sites tests se répartissent très souvent dans plusieurs classes (cf Tableau 5) malgré leur homogénéité sur le terrain, ou du moins telle qu'elle nous était apparue au moment de l'observation. Il est probable que la présence de nuages et de brumes perturbe les valeurs radiométriques enregistrées par le satellite et ceci plus particulièrement dans la partie ouest de la zone étudiée.

N°	N13	N1	N6	N7	N4	N5	N9	N10	N11	N8	N12	N2	N3
30			100										
31			73	25									
16				100									
45				100									
43				60	40								
44				60	40								
38				66	54								
41				50	50								
42				47	50								
23				20	80								
32				15	70		15						
14						86		14					
24						45		10	45				
28			50				50						
15								100					
25								69	23	5			
18								32	67	9	1		
19								23	50	25			
27								21	61	18			
21									89	1	10		
22									86		14		
33									28	50	22		
26									2	65	33		
29									3	2	95		
29													100

Tableau 5- Distribution en pourcentage de pixels, des sites tests dans les 13 classes de l'image du 30 Novembre 1987.

1.3 - L'image multidate (planche III et IV).

La construction de cette image se fait en "croisant" les deux classifications précédentes. L'image générée comporte au maximum 156 classes possibles (les 12 classes d'avril A1 à A12 multipliées par les 13 classes de novembre N1 à N13) que l'on peut visualiser sur l'écran. En fait, la quasi totalité des pixels se distribue dans une cinquantaine de classes qui, après regroupement, se subdivisent en deux grands ensembles (Figure 8): 11 unités permanentes (P1 à P11) et 6 unités variantes (V1 à V6).

Ainsi l'unité P1 correspond à la mer Méditerranée et à la plage (A7,A10,A5 pro parte et N13,N1 et N6 pro parte); l'unité P2 correspond aux dépressions salines (salt marsh), etc.

Le tableau 6 indique pour chaque site test le pourcentage de pixels appartenant soit aux unités permanentes, soit aux unités variantes. On identifie ainsi "a posteriori" la signification thématique des unités ainsi que les changements intervenus entre avril et novembre. Le site test n°18 illustre de tels changements (unité V2).

Chaque unité, permanente ou variante, peut être caractérisée par les valeurs moyennes des 3 indices radiométriques aux deux dates considérées (IB indice de brillance, IV indice de végétation, IC indice de couleur). La construction de diagrammes bidimensionnels en combinant ces indices précise encore l'interprétation des différentes unités:

- IB (avril)/IB (novembre): les unités permanentes se localisent sensiblement sur une même droite alors que les unités variantes s'en écartent (Figure 9).

- IC (avril)/IB (avril): les unités permanentes P6,P7,P8 s'individualisent nettement avec les valeurs les plus élevées de l'indice de couleur caractéristique des sables siliceux rougeâtres (Figure 10).

L'interprétation thématique de chacune des unités permanentes et variantes, sera précisée au paragraphe suivant au moment d'aborder l'exploitation de l'image multidate pour la cartographie.

A9							V6						P11
A4													P10
A1							P9						
A2							P7		P8				
A8							P6						
A11							P5		P5	V4	V5		
A3							P4		P4				
A6			P3				V2		V3				
A12			P2								V1		
A5													
A10	P1												
A7													
	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
	13	1	6	7	4	5	9	10	11	8	12	2	3

Figure 8 - Distribution des unités permanentes (P) et variantes (V) dans les classes de l'image d'avril (A1 à A12) et de l'image de novembre (N1 à N13)

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	V1	V2	V3	V4	V5	V6
30		100															
31		86	14														
16			100														
17			100														
42			100														
44			100														
41			92	8													
45			91	9													
38			83	17													
23			40	50	10												
43			37	42	10	1											
28				50	25								25				
14					100												
25					54	23											
32					70						30				23		
24			8	2	80	6											
22					92	4	4								1		
27					98	2											
21					32	57	11								4		
26					2	96	2										
20					3	3	92								1	1	
33						9	56	3							32		
15										100							
21								16	84								
29											100						
18													96			4	
19					25											75	

Tableau 6 - Distribution en pourcentages de pixels des sites tests, dans les unités permanentes (P) et variantes (V)

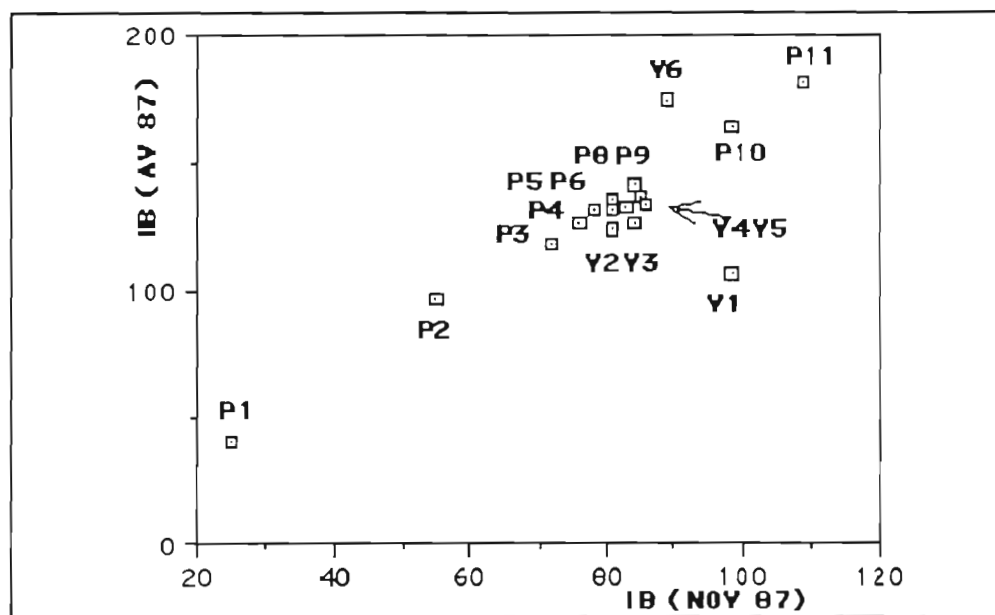


Figure 9 - Distribution des unités permanentes (P) et variantes (V) sur le diagramme IB (AV 87)/IB (NOV 87)

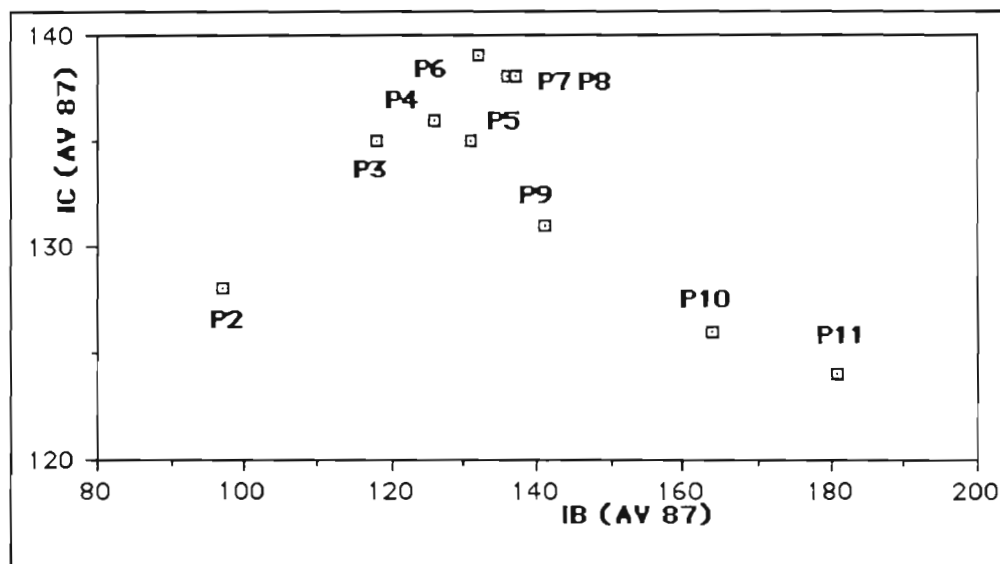


Figure 10 - Distribution des unités permanentes (P) sur le diagramme IC (AV 87)/IB (AV 87)

PLANCHE III

LES UNITES PERMANENTES

PHOTO 1: Salt marsh: Steppe à *Halocnemum strobilaceum*
(unité permanente P2).

PHOTO 2: Steppe claire à Halophytes (*Limoniastrum guyonianum*) sur nebkas
(unité permanente P5).

PHOTO 3: Steppe claire sur sables siliceux rougeâtres
(unité permanente P7).



1



2



3

PLANCHE IV

**IMAGE MULTIDATE D'EL OMAYED:
UNITES VARIANTES (UV) ET
UNITES PERMANENTES (P1 à P11)**

UV : Unités variantes.

UP : Unités permanentes.

1 : mer Méditerranée (P1).

2 : Salt marsh (P2).

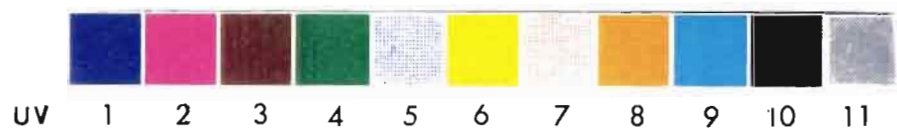
3 et 4 : Labours récents sur sables, steppes à couvert végétal dense à moyennement dense (P3 et P4).

5 : Steppes claires à halophytes (*Limoniastrum guyonianum*) sur nebkas, steppes claires sur substrat caillouteux (P5).

6, 7 et 8 : Steppes claires à très claires sur sables siliceux plus ou moins rougeâtres (P6, P7, P8).

9 : Sols nus à surface pierreuse (P9).

10 et 11 : Dune côtière (P10 et P11).



Pl. IV

2 - VERS UNE CARTOGRAPHIE THEMATIQUE A MOYENNE ECHELLE.

Parmi les documents résultant traditionnellement du diagnostic écologique on relève:

- La carte d'occupation des terres dont les bases conceptuelles et méthodologiques ont été maintes fois publiées.

- la carte des sols.

- la carte phytoécologique.

Est-il possible de reproduire ce schéma et de parvenir partant des données satellitaires, et plus précisément à partir des données SPOT, à l'établissement des mêmes documents?

Unités permanentes	% de l'image	Sites Tests	Unités physiographiques	Sols	Végétation	Utilisation par l'Homme	Observations
P1	23,9		mer Méditerranée				
P2	0,4	30,31	salt march	solonchaks, inondables croûte saline localisée	steppe à halophytes de couvert de 0 à 20%		
P3 et P4	11,5	17,42	dépression non salée et	sols sableux profonds	débris végétaux (1 à 2%)	labours récents	La distinction entre P3 et P4 est liée à un gradient de rugosité en relation soit avec une variation du couvert végétal de 15% (P3) à 10% (P4) soit à un aplatissement des labours
		44,45	glacis sableux		végétation steppique	parcours	
		41,43					
		23					
		16	dépression salée	sols sablo-limon. faiblement salés	débris végétaux	labours anciens ou récents	
		38	axe de drainage alluvionné Inland Plateau	sols sablo-limoneux sur encroûtement calcaire	steppe dense (10-15%)	parcours	
P5	9,1	14	dépression salée	sols salins sablo-limoneux	steppe (5 à 8%) à <i>Limoniastrum guyonianum</i> sur nebkas	parcours	
		32	dune consolidée	lithosols sur grès calcaires	steppe rase et claire (3%) à chamephyte		
		25	glacis encroûté Inland Plateau	sols peu profonds sur croûte calcaire peu profonde			
P6 à P8	46,1	24	Inland Plateau	Sables siliceux profonds rougeâtres	steppe à chamephytes (<i>Thymelaea hirsuta</i> (couvert 3-12%))	parcours et localement	
		20,21,22	Glacis sableux et dépres. non salée		arboriculture et débris végétaux (couvert 8%)	anciennes cultures	
		26,27					
		33					
P9	2,0	15,21bis	dune côtière dune consolidée et glacis encroûté	lithosols très calcaires sur grès ou sur croûte calcaire	steppe rase et très claire (couvert < 3%) zone de déflation	parcours et extraction de pierres	localement accumulation de coquilles en surface
P10 et P11	1,9	29	dune côtière	régosols excessivement calcaires sur sables et calcaires oolithiques	steppe très claire (< 3%)	parcours, installations touristiques	

Tableau 7 - Tableau récapitulatif de l'interprétation thématique des unités permanentes (94,9% de l'image)

L'image multidate a permis (cf paragraphe précédent) de distinguer et de localiser 11 unités permanentes et 6 unités variantes. Le thématicien de son coté reconnaît des types d'unités (milieu, action de l'homme) dont il est capable de déterminer l'intérêt en tant qu'unité significative pour le développement. Ces types d'unités reconnus sur le terrain peuvent être précisément localisés sur les données satellitaires et donc sur l'image multidate. La localisation précise sur les données satellitaires permet également de déterminer la répartition (en %) des différents pixels des sites tests (28 sites pour la zone d'El Omayed) dans les unités permanentes et variantes de l'image multidate. La lecture du tableau des résultats (Tableau 7) suggère que la plupart des sites tests sont effectivement situés et strictement situés dans des unités précises de l'image multidate ou dans 2 unités voisines. Certains d'entre eux sont largement échantillonnés (unités permanentes P3, P5, P6) alors que d'autres ont été "oubliés" ou volontairement omis car peu représentatifs de la zone étudiée.

A partir du tableau il est possible d'identifier les unités repérées sur l'image multidate.

* Unités permanentes

Au tableau 7 nous avons rapproché les unités permanentes, les sites tests qui s'y rapportent ainsi que les unités physiographiques concernées. Les unités physiographiques et les descriptions des sites tests nous fournissent les éléments d'interprétation des unités permanentes et nous permettent de les caractériser par le sol et/ou la végétation et/ou l'utilisation par l'homme:

- *l'unité P1* correspond à la **mer Méditerranée**, la reconnaissance de cette unité est évidente dès les premiers stades de l'analyse.

- *l'unité P2*, est assez bien définie comme étant les "salt marsh" surtout occupés par une steppe à halophytes (Planche III photo1).

- *les unités P3 et P4* sont relativement proches. Ici sont confondus les **labours récents sur sables** (sites 17,42,44,45), les **labours récents et anciens sur limons sableux** (site 16) et les **steppes à couvert végétal dense à moyennement dense** sur sables profonds (sites 41, 43, 23) ou sur sols sablo-limoneux (site 38) Le fait marquant est la rugosité de la surface. Le relief des labours anciens sur sable est plus vite émoussé par le vent et ce type de pratique culturale n'est plus discernable au bout de quelques mois . Ainsi les labours effectués au printemps 1987 ne sont plus "visibles" en novembre. On passe d'une surface rugueuse à une surface lisse. Pour les steppes, à couvert relativement dense (entre 8 et 15%), la végétation est installée sur des nebkas dont la hauteur atteint souvent 50 centimètres et qui occupent de 20 à 80% de la superficie des unités.

- *Unité P5* . Sont regroupées dans cette unité des **steppes claires à halophytes** (couvert de végétation de 3 à 8%) sur nebkas (groupements à *Limoniastrum guyonianum*) (Planche III photo 2) et des **steppes claires sur substrat caillouteux** (pierrosité de surface 50 à 80 %). De toute évidence cette confusion gênante est très aisément levée par la simple lecture d'une carte topographique ou l'examen de la géomorphologie: les steppes à halophytes se localisent dans la dépression saline, les steppes claires sur le glacis encroûté en bordure du plateau de Krechem El Aich.

- *Les unités P6,P7 et P8* caractérisent les **steppes sur sables siliceux plus ou moins rougeâtres** (10 à 7,5YR 7/6). La végétation est claire à très claire (3 à 10% de couvert) avec des nebkas relativement basses (moins de 20 centimètres), couvrant 20-80% de la superficie des unités (Planche III photo3). Localement, les steppes correspondent à d'anciennes surfaces labourées, en fait des plantations de figuiers, où la végétation steppique est à même de se réinstaller.

- *Unité P9*. Il s'agit en tous les cas de **sols quasiment nus** (couleur 10YR 7/3 à 8/3) avec présence en surface, soit d'affleurements de grès calcaire ou d'encroûtement calcaire, soit de débris de coquilles (jusqu'à 70% de recouvrement). La végétation est très rare ou absente (0 à 3% de couvert).

- *Les unités P10 et P11* couvrent l'ensemble de la **dune côtière** plus ou moins consolidée et constituée de calcaire oolithique (couleur 10YR 8/2). La végétation est ici très rare (couvert<3%).

* Unités variantes

Les parentés entre les unités sont retrouvées grâce à la similitude d'évolution en particulier des indices de brillance:

- *Unité V1*. L'accès aux implantations touristiques sur la dune côtière a nécessité le comblement d'une partie du "salt marsh" par du matériau calcaire oolithique entre avril 1987 et novembre 1987. Il y a donc eu transformation d'une unité P2 en une unité P10.

- *Unités V2 et V3* Il s'agit d'unités qui étaient, en avril, des labours récents sur sables (indice de brillance faible), mais dont la rugosité de la surface du sol était complètement estompée en novembre. Ces zones , classées P4 et P5 en avril sont devenues P8 en novembre.

- *Unités V4 et V5*. Dans les unités de labours anciens sur sables le temps a effacé la rugosité de surface sans qu'elle soit compensée par un accroissement rapide du couvert de la végétation. L'unité est alors de plus en plus marquée par la réflectance des sables siliceux rougeâtres.

- *Unité V6*. L'implantation de complexes hôteliers sur la dune littorale modifie le comportement radiométrique des surfaces construites qui réagissent alors comme des sols nus à affleurement de grès calcaire. Une unité initialement P11 s'est transformée en unité P9.

Une telle interprétation synthétique de l'image multidate peut donner lieu à la délimitation de zones plus ou moins homogènes et fournir un document cartographique.

Il est bien entendu que la délimitation d'unités sur l'image reste marquée d'une certaine subjectivité. Cette subjectivité est liée en particulier au niveau de précision requise et au souhait, ou au refus, de conserver des unités en mosaïques. Il est aisé au tableau 7 de constater que le sol, la végétation et l'utilisation par l'homme sont, conjointement et alternativement, à évoquer au niveau de l'interprétation des unités. Chacun de ces paramètres est susceptible de contribuer à cette définition mais il reste possible de les utiliser séparément et, à partir de ce document synthétique, d'élaborer un certain nombre de documents cartographiques thématiques tels que:

- la carte de pédo-géomorphologique.
- la carte de la végétation naturelle.
- la carte de l'action de l'homme.

L'on retrouve donc ici une partie au moins des documents proposés dans un diagnostic écologique traditionnel. La démarche cependant est différente.

CONCLUSIONS

Ainsi que cela a déjà été évoqué il existe des possibilités d'améliorer les qualités des produits obtenus. Ces possibilités sont liées soit à des modifications de la procédure de travail soit à la nécessité de consacrer plus de moyens, tout particulièrement en temps, aux prolongations éventuelles du projet.

Nous avons insisté sur le souhait de pouvoir utiliser les possibilités offertes par les performances actuelles de la télédétection pour affiner, voire renouveler, la démarche cartographique. Pour être réellement au service des thématiciens la télédétection satellitaire doit démontrer son **opérationnalité dans la partition d'un espace en unités reconnaissables, pertinentes et utiles** pour ce même thématicien. L'un des apports originaux de la télédétection est de permettre, en particulier, l'étude des relations fonctionnelles et dynamiques entre unités homogènes.

Le recours à la télédétection satellitaire requiert, pour le thématicien, de faire référence sur le terrain aux **facteurs** susceptibles d'agir sur les paramètres commandant la luminance, à savoir dans le cas présent (Tableau 8) :

- l'**humidité** du sol.
- la **rugosité** liée soit à des caractères permanents ou quasi permanents de la surface du sol (pierrosité, microtopographie, touffes de végétation installées sur des nebkas, débris de coquilles, etc), soit à des caractères transitoires en relation avec les travaux cultureux (labours, hersage, etc).
- la **couleur du sol** intervient très largement compte tenu d'une densité de couvert végétal généralement inférieure à 10-15%. Les capteurs de SPOT permettent de discriminer des unités de milieu en fonction de la couleur de la surface des sols, elle même en relation avec la nature minéralogique des constituants du sol, depuis un matériau excessivement calcaire très blanc (dune côtière sur calcaire oolithique) jusqu'à des sables siliceux rougeâtres d'origine éolienne et plus ou moins mobiles.
- l'**activité chorophyllienne** reste bien évidemment un facteur déterminant discriminant au niveau des zones irriguées. Ce facteur peut intervenir à certaines périodes de l'année et souligner, après les pluies, la présence d'une couverture végétale éphémère (espèces annuelles) mais suffisamment dense pour être perçue par le satellite. A cet égard, il est probable que la présence d'un tapis très dense de *Plantago albicans* ait pu "marquer" certaines zones sur l'image SPOT du 10 avril 1987 (indice de végétation plus élevé).
- la **présence de sels**, en particulier sous forme de croûtes ou d'efflorescences salines, détermine des signatures spectrales spécifiques et donc très facilement repérables sur l'image.

UNITES SURFACE		P1	P2	P3 P4	P5	P6 P7 P8	P9	P10 P11	
		HUMIDITE		Eau libre	Très humide				
RUGOSITE	Labours			100-80%					
	Microrelief Nebka			60-10%	20%	60-5%			
	Couvert végétal			15-10%	8-3%	10-3%	<3%	<3%	
	Pierrosité Coquilles			30-10%				30-10%	
COULEUR				10YR7/4	10YR7/5 à 7,5YR7/6	10YR7/3 à 8/3	10YR8/2		

Tableau 8 - Les principales caractéristiques de la surface du sol commandant la luminance (image SPOT El Omayed)

La prise en compte de ces facteurs conduit le thématique à compléter, sinon modifier, la démarche cartographique classique notamment en ce qui concerne:

- les méthodes d'investigation sur le terrain: observation et description détaillée de la surface des sols, mesures radiométriques de terrain.
- les nomenclatures habituellement utilisées.
- les stratégies qu'il convient d'adopter pour l'utilisation des données satellitaires:

* *choix des dates* pour les images en fonction des objectifs, c'est-à-dire en tenant compte du calendrier agricole, des stades phénologiques, de la "hauteur" du soleil, etc.

* *choix des données satellitaires*. Cette étude montre l'intérêt des données SPOT dans le cadre d'une cartographie thématique à moyenne échelle. L'excellente résolution spatiale des capteurs HRV est un atout non négligeable pour la précision cartographique et le repérage sur le terrain, permettant ainsi une étude précise des relations états de surface/image. Par contre certains problèmes, tels que la qualité des images (effet interbarrettes notamment), constituent des facteurs limitants sinon des obstacles importants, pour envisager une cartographie thématique opérationnelle dans le contexte d'instituts ou d'organismes ne disposant que d'un équipement classique de traitement informatique. Par ailleurs l'utilisation d'autres capteurs tels que TM devrait permettre, dans certains cas, une meilleure discrimination des états de surface (gypse, types de végétation).

* possibilités d'études synchrones terrain/image avec la programmation d'acquisition de données satellitaires aux périodes adéquates.

* possibilités d'études diachroniques pour mettre en évidence des processus d'évolution des milieux induits par l'action de l'homme. De ce point de vue l'exemple d'El Omayed montre qu'il est possible, pour un intervalle de temps de 8 mois, d'identifier des changements importants: constructions et infrastructures diverses (routes, hydraulique agricole, etc.), travaux culturels (labours). Dans la région de Burg El Arab (El Hammam) la présence d'une zone en voie de salinisation a été repérée sans difficulté en comparant les deux images acquises en avril et novembre 1987. En effet le mauvais fonctionnement d'un drain a entraîné une remontée de la nappe phréatique modifiant ainsi l'état d'humidité de la surface du sol avec apparition d'efflorescences salines.

Le choix des thèmes à cartographier et leur formulation doit prendre en compte le fait que tous les phénomènes n'ont pas la même persistance dans le temps. Les relations de fonctionnalités ou les rapports dynamiques entre unités ne sont pas évidents à déceler dans un contexte géographique comme celui de la zone côtière nord-ouest de l'Egypte où la topographie est peu marquée. D'autre

part, la mise en évidence de telles relations nécessite de pratiquer des comparaisons à diverses dates sur d'assez longues périodes. Des phénomènes tels par exemple que les conséquences de la mise en culture, ou de l'irrigation, d'une unité de l'espace sur les unités avoisinantes ne sont pas nécessairement perceptibles sur des périodes de 8 mois. Par ailleurs la durée et la répétition des études s'avère également impérative pour distinguer dans les changements entre ceux qui coïncident avec une saisonnalité d'évènements (labours) et ceux, plus permanents et progressifs, qui sont réellement des **indicateurs** d'une dynamique des milieux (désertification, réhabilitation, etc.).

La notion d'**observatoires** pour le suivi et la surveillance par satellite de cette région se trouve posée. A notre avis, il ne s'agit pas de retenir des sites tests particulièrement bien choisis visant à démontrer l'intérêt de la télédétection satellitaire pour l'étude des problèmes liés à l'évolution des milieux. Il s'agit plutôt de zones tests judicieusement choisies pour leur représentativité vis à vis des problèmes que l'on veut étudier et pour lesquels il est possible, ou commode, d'appliquer au mieux toutes les étapes d'une approche télédétection. Il est évident que ces zones tests et même la démarche télédétection, ne seront pas les mêmes pour suivre des phénomènes tels que la désertification, l'état des périmètres irrigués, l'impact des infrastructures sur l'environnement, etc.

Par ailleurs il conviendrait de développer des champs de recherche dans l'optique "opérationnalité" de l'utilisation des données satellitaires pour le suivi des milieux arides: systèmes d'informations géographiques, reconnaissances de formes, automatisation des traitements.

BIBLIOGRAPHIE

- ANDRIANASOLO (H.), MALEK (C.), 1988.- Définition et détermination des unités dynamiques d'un paysage sahélien (Oursi) pour un diagnostic des facteurs de dégradation et de régénération des ressources naturelles et renouvelables. Congress of I.S.P.R.S., Kyoto, 1988
- AYYAD (M.G.), LE FLOC'H (E.), 1983.- An Ecological Assessment of Renewable Resources for Rural Agricultural Development in the Western Mediterranean Coastal Region of Egypt . Case study : El Omayed test- area. REMDENE. project, Alexandria, Montpellier, Paris. 103 p.
- 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.), 1989.- Caractérisation de la surface des sols arides par observation de terrain et par télédétection. Applications: Exemple de la région de Tataouine (Tunisie). Paris, Thèse de Doctorat Université Paris 6, 317 p.
- MALEK (C.), à paraître 1989.- Diagnostic du paysage à partir des données satellitaires. Applications au Sahel. Oudalan.Burkina Faso., Thèse ORSTOM/UNIV. PARIS VII.).
- POUGET (M.), LORTIC (B.), SOUISSI (A.), ESCADAFAL (R.), and MTIMET (A.), 1984.- Contribution of Landsat data to mapping of land ressources in arid regions. ("Tataouine" and "Zarzis" sheets of 1/200.000 soil map of Tunisia). 18th Internat. Symp. on Remote Sensing of Env., Paris, 1-5 October 1984, 9 p.
- POUGET (M), MULDER (M.A.), 1988. Report of the ISSS working group "Remote sensing of the soil surface". Description of the landsurface for correlation with remote sensing data. 5th ISSS Symposium of the Working group Remote Sensing, Budapest, 11-15/04/88.
- POUGET (M.), LE FLOC'H (E.), KAMAL (S.), SALEM (B.), 1989. - Utilisation des données SPOT pour la cartographie des ressources renouvelables. Application à la région côtière de nord-ouest de l'Egypte. Colloques et Séminaires "ORSTOM Paris "Journées de Télédétection": Images satellite et milieux terrestres en régions arides et tropicales, pp 103-143.
- POUGET (M.), CORNET (A.), LE FLOC'H (E.), KAMAL (S.), 1990. - Apport de la Télédétection spatiale SPOT à l'établissement des bases écologiques pour le développement rural intégré des zones arides. Cas concrets de la région côtière du nord-ouest - Egypte - et de la Réserve de la Biosphère de Mapimi - Mexique. Atelier MAB/UNESCO, Coquimbo (Chili), avril 1989, Terra arida, n°7, Coquimbo-Chile, pp 127-154..
- RAKOTO-RAVALONTSALAMA (M.) and al, 1988.- Guide de l'utilisateur de PLANETES. Unité de Télédétection / L.I.A., Centre O.R.S.T.O.M., Bondy, 130p.

ANNEXE I

FORMULAIRE DE DESCRIPTION DE LA SURFACE DU SOL
(POUGET and MULDER, 1988)

FORMULAIRE DE DESCRIPTION DE LA SURFACE DES SOLS

I. LOCALISATION GEOGRAPHIQUE ET SITUATION DU SITE-TEST DANS LE PAYSAGE

I.1. Identification

I.1.1.. Numéro provisoire		
	Numéro du site-test	
I.1.2. Numéro	Numéro d'ordre dans le temps	

I.2. Localisation géographique

I.2.1. Lieu-dit		
	Nom:	
	N°:	
I.2.2. Feuille topographique	Echelle: 1 / / /	
	Date	Année:
	Editeur:	
I.2.3. Coordonnées géographiques	Longitude:	° ' "
	Latitude:	° ' "
I.2.4. Altitude	mètres	
	Numéro	
I.2.5. Photo aérienne de référence	Echelle: 1 / / /	
	Date	J M A
	Editeur	

I.2.6. Coordonnées sur les documents satellites

Nature	Réf. Scène	Date					
		Lignes	Colonnes	Lignes	Colonnes	Lignes	Colonnes
MSS		L: L:	C: C:	L: L:	C: C:	L: L:	C: C:
TM		L: L:	C: C:	L: L:	C: C:	L: L:	C: C:
HRV (Spot)		L: L:	C: C:	L: L:	C: C:	L: L:	C: C:

I.3. Situation dans le paysage

I.3.1. Contexte géomorphologique général: | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

I.3.2. Substratum géologique	Nature:	
	Est-il apparent?	oui / non
	Pendage	%
	Orientation en surface	-
	Couverture sédimentaire Type	
	Epaisseur mètres	

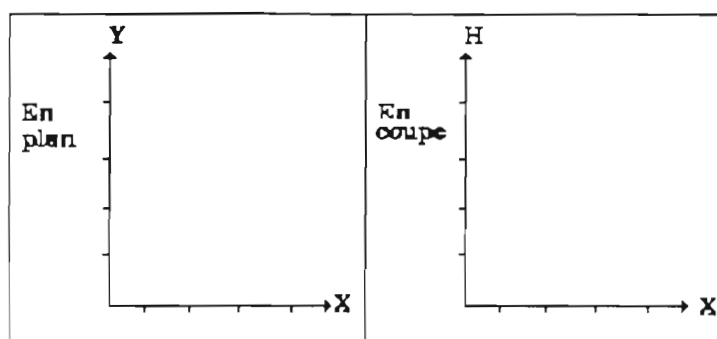
I.3.3. Unité géomorphologique	Type	
	Dimension	hectares
	Emplacement du site sur l'unité:	
	Distance du site par rapport à l'amont:	mètres

I.3.4. Pente de l'unité géomorph.	Pente moyenne	%
	Exposition:(N-NE-E-SE-S-SW-W-NW)	
	Longueur:	mètres
	Forme:	

I.3.5. Ondulations de la surface (> 1m)	Sans ondulation		
	Nature		
		Forme	
	Avec ondulations	Amplitude	Verticale
		moyenne	Horizon.
		en mètres	
	Orientation	-	

I.3.6. Erosion	Pas d'érosion		
	Erosion	Type	
		Forme	
		Intensité	
		Pourcentage de surface affectée	%

SCHEMAS ET OBSERVATIONS DIVERSES



1.4. Type de sol

	CPCS	
1.4.1. Classification	Soil Taxonomy	
	FAO	
1.4.2. Unité cartographique de référence		
1.4.3. Matériau originel		
1.4.4. Description (cf. schéma)		

0	Profondeur cm	Couleur	Texture	MO	Co ₃ Ca %	Gypse % %
	100cm					
	200cm					

II.2.3. Sylviculture et agriculture

Observations Types de cultures	Espèces	Date de plantations ou semis	Stade végétatif	État général	Estimations Rendements Divers
Reboisement					
Cultures pérennes					
Cultures annuelles					
Pâturages et prairies artific.					

II.2.4. Sols nus

OUI / NON

II.2.5. Eléments
d'aménagement
du paysage
agricole

Superficies moyennes des parcelles en hectares	
Hales	
Talus	
Terrasses	

II.2.6. Techniques

Drainage (type)	
Irrigation (type)	
Labour agricoles	J M A
Hersage	J M A
Ados	J M A
Planches	J M A

II.2.7. Feux

Date	J M A
Extension Hectares	
Végétation brûlée	%
Repousse	%

II.2.7. Zone urbaine

|||||

II.2.8. Eau libre

|||||

II.2.9. Faune

Espèces	
Types de construction	

III. IDENTIFICATION DE LA MOSAÏQUE SURFACES ELEMENTAIRES ("MOSAÏQUE SE") AU MOMENT DE LA DESCRIPTION DU SITE-TEST

III.1. Aire du site test décrit

III.1.1.. Superficie hectares 111

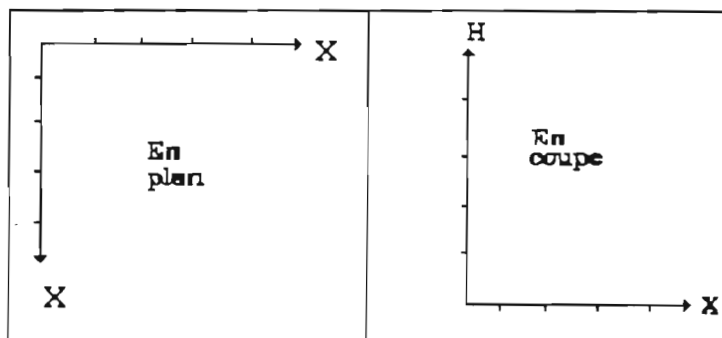
III.1.2. Nombre surfaces élémentaires décrites (SE) 111

III.2. Composition de " la mosatque SE "

Code des SE	DESCRIPTION - IDENTIFICATION des SE	Pourcentage %		Observations
		superficie Estimé	site-test Mesure*	
1				
2				
n				

* Type de méthode utilisé

SCHEMAS DE LOCALISATION DES SE



IV. CARACTERISATION QUANTITATIVE DE CHAQUE SURFACE ELEMENTAIRE (SE)
AU MOMENT DE LA DESCRIPTION

SURFACE ELEMENTAIRE

Code

IV.1 Mesorelief et microrelief (affleurement rocheux et terre fine)

Type		MESORELIEF (ordre métrique)	MICRORELIEF (ordre centimétrique)
Caractérisation			
Présence		OUI / NON	OUI / NON
Pourcentage de la surface			
Nature et Forme			
Hauteur moyenne			
Largeur moyenne			
Longueur moyenne			
Orientation préférentielle	Pas d'orientation		
	Orientation préf.		

IV.2. Couverture végétale (végétation + litière et débris organiques)

Couverture Végétale	Recouvrement en %	TOTAL		"VISIBLE" par le satellite	
		Estimé	Mesuré	Estimé	Mesuré
Végétation					
Litières et Débris					
Couverture végétale (végétation + litières)					

IV.2.1. Végétation

IV.2.1.1. Principales
espèces
végétales

Espèce 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
Espèce 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
Espèce 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
Espèce 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

IV.2.1.2. Caractérisation des strates

STRATES							
Caractérisation							
Identification							
Recouvrement %	Estimé						
	Mesuré						
Recouvrement "Visible" %	Estimé						
	Mesuré						
"Activité"	Couleur dominante						
	Autre couleur						
	rose %						
	vert %						
	Pérennité						
Structure	Hauteur moyenne en mètres						
	Distance moyenne						
	Durabilité						
	Taille moy. des courbes						
	Transparence						
Composition	Espèces dominantes						

IV.2.2. Littères et débris organiques

Types		Litières	Brindilles	Algues et lichens	Divers
Recouvrement %	Estimé				
	Mesuré				
Recouvrement "visible" %	Estimé				
	Mesuré				
Nature					
Couleur					

IV.3. Couverture minérale (= affleurement rocheux + pierrosité+ terre fine)

Recouvrement en %	TOTAL		"VISIBLE" par le satellite	
	Estimé	Mesuré	Estimé	Mesuré
Couverture minérale				
A ffreuments rocheux				
Pierrosité				
Terre fine				
Couverture minérale (affl. + pierrosité + terre fine)				

IV.3.1. Affleurements rocheux

Types		I	II	II	
Caractérisation					
Identification					
Recouvrement %	Estimé				
	Mesuré				
Recouvrement "Visible" %	Estimé				
	Mesuré				
Couleur					
Hauteur moyenne en mètres					
Nature minéralogique					

IV.3.2. Pierrosité

Classes de pierrosité		Blocs > 25 cm	Pierres 25-7,5 cm	Cailloux 7,5-2cm	Graviers 2-0,2cm
Caractérisation					
Recouvrement %	Estimé				
	Mesuré				
Recouvrement "Visible" %	Estimé				
	Mesuré				
Diamètre moyen					
Couleur					
Nature minéralogique					
Revêtements					

IV.3.3. Terre fine (< 0.2 cm)

Etat structural de la surface		Structure particulière	Structure fragmentaire avec agrégats et/ou mottes	Structure continue avec croûte (surface lisse battante)	Autre état
Caractérisation					
Identification					
Recouvrement %	Estimé				
	Mesuré				
Recouvrement "Visible" %	Estimé				
	Mesuré				
Texture					
Couleur	Sec				
	Humide				
Diamètre moyen en cm des agrégats et/ou mottes bien individualisées ou encroûtées					
Réseau de fente de retrait	Présence d'un réseau	OUI / NON	OUI / NON	OUI / NON	OUI / NON
	Diamètre de la maille en cm				
	Forme				
	Largeur des fentes en cm				
	Profondeur des fentes en cm				
Caractéristiques physico-chimiques					
Humidité	Appréciation de l'état d'humidité				
	Pondérale en %				
	Volumique en g/cm ³				

V. DIVERS

- Photographies
- Mesures radiométriques
- Mesures diverses
- Résultats d'analyses de sol

ANNEXE II

**LES DONNEES RADIOMETRIQUES DE TERRAIN (CIMEL)
(15 Novembre-3 Décembre 1987).**

N°	XR1	XR2	XR3	IBR	IVR	ICR
1	99	74	601	354	78	-14
2	233	335	431	343	13	18
3	460	590	599	553	1	12
4	278	393	483	394	11	17
5	373	509	516	471	1	15
6	-	-	-	-	-	-
7	326	335	418	338	11	10
8	341	463	557	465	9	15
9	349	482	561	472	8	16
10	399	477	654	521	16	9
11	374	491	622	506	12	13
12	277	387	477	405	11	17
13	-	-	-	-	-	-
14	324	434	556	448	12	15
15	350	466	577	473	11	14
16	256	368	453	368	11	18
17	281	412	514	413	11	19
18	371	514	604	532	8	26
19	344	470	646	502	16	15
20	3 41	507	632	532	11	19
21	364	516	535	478	2	17
22	369	523	617	513	8	17
23	295	437	556	442	12	19
24	333	499	616	496	10	20
25	342	498	594	489	9	18
26	348	505	638	510	12	18
27	352	528	659	528	17	20
28	842	667	614	641	1	-12
29	860	1003	1175	1020	8	8
30	237	322	380	319	8	15
31	230	317	401	324	12	14
32	472	605	637	576	3	12
33	406	567	633	544	6	16
34	268	392	442	375	6	19
35	314	438	543	442	11	16
36	288	429	559	439	13	20
37	311	473	593	473	11	21
38	-	-	-	-	-	-
39	148	245	362	266	19	25
40	155	216	364	260	26	16
41	309	483	549	458	6	22
42	308	454	564	454	11	19
43	284	436	442	394	1	21
44	370	432	540	453	11	8
45	256	360	476	375	14	17
46	267	411	507	407	10	21
47	268	408	473	393	8	21
48	143	214	336	249	22	20
49	274	388	448	371	7	17
50	364	506	630	512	11	16

ANNEXE III

LES DONNEES SPOT: 30 NOVEMBRE 1987

N°	XS1	XS2	XS3	IB	IV	IC
1	41	34	64	73	208	117
2	53	59	56	85	156	135
3	81	96	83	132	149	139
4	69	83	73	113	150	140
5	72	87	75	118	150	140
6	75	88	77	121	150	137
7	65	77	67	106	149	139
8	86	103	89	141	148	140
9	80	97	84	132	149	141
10	86	102	88	140	150	139
11	84	101	87	138	149	140
12	65	79	69	107	150	140
13	56	62	54	87	149	135
14	76	81	78	136	126	132
15	79	83	79	139	125	132
16	65	69	66	116	124	132
17	68	75	73	125	126	133
18	77	86	83	142	126	135
19	78	86	83	114	126	135
20	79	89	87	148	127	136
21	77	88	85	144	126	137
22	77	88	86	145	126	137
23	69	76	74	127	126	135
24	74	85	83	141	126	136
25	77	85	82	141	126	134
26	80	87	86	146	127	134
27	78	85	84	142	127	134
28	80	77	65	128	117	126
29	117	117	106	197	122	128
30	57	55	49	93	121	127
31	59	62	57	103	123	131
32	76	78	72	130	123	129
33	79	87	86	146	125	134
34	66	80	71	110	151	140
35	78	96	84	131	150	141
36	73	91	82	124	152	142
37	70	86	77	118	152	141
38	70	76	72	126	125	143
39	44	49	51	73	164	135
40	47	54	50	76	155	137
41	70	75	73	126	126	133
42	68	78	74	126	126	135
43	74	81	78	134	126	134
44	72	80	78	133	126	135
45	65	72	71	120	128	134
46	62	74	66	102	151	139
47	54	60	56	85	155	135
48	48	52	48	75	155	133
49	66	77	66	105	148	139
50	85	96	90	157	124	136

ANNEXE IV

COMPOSITION COLOREE
(Poster)

Remarque:

Les minutes correspondant aux descriptions détaillées des sites tests ainsi que les mesures radiométriques de terrain sont consultables soit à l'ORSTOM Bondy (M. POUGET) soit au Département de Botanique de l'Université d'Alexandrie (S. KAMAL).