

UTILISATION DES DONNEES SPOT POUR LA CARTOGRAPHIE DES RESSOURCES RENOUVELABLES APPLICATION A LA REGION COTIERE NORD-OUEST DE L'EGYPTE

M. POUGET¹ E. LE FLOCH² S. KAMAL³ B. SALEM⁴

RESUME

Les données SPOT sont utilisées dans la région côtière Nord-Ouest de l'Egypte dans le cadre d'une opération mise en oeuvre grace à une subvention du ministère français de l'Environnement et avec la contribution de chercheurs égyptiens de l'Université d'Alexandrie et de chercheurs français (ORSTOM, CEPE/CNRS).

L'approche "état de surface" caractérise l'ensemble d'une démarche progressive qu'il est possible de décomposer en 4 étapes principales:

- préparation de l'étude, planning d'acquisition des données SPOT.
- inventaire des principales unités physiographiques.
- étude synchrone des relations états de surface/image SPOT au niveau de 50 sites tests.
- cartographie des états de surface .

Une typologie des principaux états de surface perçus par le satellite est établie en détaillant plus particulièrement la troisième étape de la démarche.

¹ Unité de Télédétection, LIA, Centre ORSTOM, Bondy.

² CEPE/CNRS, Montpellier.

³ Botany Department, Faculty of Science, Alexandria University, EGYPT).

⁴ Botany Department, Faculty of Science, Alexandria University, EGYPT).

I. INTRODUCTION

Le travail présenté ici se situe dans le cadre d'une convention avec le Ministère français de l'Environnement dans le prolongement du projet REMDENE (Régional Environmental Management of Mediterranean Desert Ecosystems of Northern Egypt). Il résulte d'une collaboration entre chercheurs égyptiens de l'Université d'Alexandrie et chercheurs français (ORSTOM et CEPE/CNRS) qui, voici quelques années avaient déjà coopéré dans ce même projet de cartographie des ressources renouvelables mais sans l'apport de la télédétection spatiale (AYYAD and LE FLOCH, 1983). La faible résolution spatiale des données Landsat MSS, les seules disponibles alors, restait insuffisante pour ce type de cartographie à moyenne échelle (1/50.000).

Par contre avec SPOT il devenait intéressant de mettre en oeuvre un nouveau projet qui s'appuierait, d'une part sur les résultats déjà obtenus et l'expérience de l'équipe et, d'autre part sur ce type de données beaucoup mieux adaptées.

Deux objectifs majeurs sont alors définis:

- actualisation des méthodes d'inventaire et de cartographie, à moyenne échelle, des ressources renouvelables en utilisant les données satellitaires et en particulier SPOT.
- préparation du suivi et de la surveillance par satellite de cette région fragile soumise à une très forte pression humaine. Cet objectif a été envisagé du fait que nous avons pu disposer de données SPOT acquises à 8 mois d'intervalle.

Dans cette note, nous n'aborderons que certains aspects relatifs à l'utilisation des données SPOT pour la cartographie des ressources renouvelables. Après une présentation très succincte de la zone d'étude nous exposerons dans une première partie les principales étapes de la démarche générale basée sur l'approche "état de surface" (ESCADAFAL, 1981, 1989; POUGET et al, 1984). Dans une seconde partie, nous développerons plus en détail l'une des étapes de cette démarche concernant l'aspect terrain, notamment l'étude des relations états de surface/image SPOT au niveau des sites tests.

II. 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 fig. 2).

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 (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 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).

PREMIERE PARTIE : 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 4 étapes principales:

- la préparation de l'étude avec établissement d'un planning d'acquisition des données SPOT et de prospection sur le terrain.
- l'inventaire des principales unités physiographiques sur image SPOT.
- l'étude synchrone des relations états de surface/image SPOT au niveau de sites tests.
- et enfin la cartographie des états de surface qui sert de base à la cartographie thématique.

I. PREPARATION DE L'ETUDE

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 (fig. 2).

II. INVENTAIRE DES PRINCIPALES UNITES 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 photochimique de Bondy.
- analyse numérique des données (bande magnétique CCT) effectuée à Bondy par l'ensemble de l'équipe en Juillet 1987.

Nous avons utilisé une démarche dirigée basée sur les connaissances déjà acquises sur la zone d'étude et sur les caractéristiques de l'image elle-même. Sur la composition colorée, on délimite 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).

On obtient une image classée et chaque classe correspond 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, soit 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**, 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).

Il n'est pas dans notre propos de détailler davantage cette étape de la démarche ni les résultats obtenus. Par contre, il convient de souligner l'importance de l'analyse préliminaire:

- elle permet d'**inventorier les principales unités spatiales ou unités physiographiques** (si) 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 et de même teinte (10 YR). 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.

III. L'ETUDE SYNCHRONE DES RELATIONS ETATS DE SURFACE/IMAGE AU NIVEAU DES SITES TESTS

L'objectif de cette étape est d'établir 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 sensiblement au même moment (30 Novembre 87). Autrement dit, est-il possible d'associer d'une façon biunivoque états de surface/caractéristiques radiométriques mesurées par les capteurs HRV de SPOT. Comment associer d'autre part 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, indispensables à connaître pour une utilisation effective et efficace des données satellitaires, ne peuvent évidemment être étudiées ici.

L'étude de terrain a été conduite au niveau de sites tests (50) où sont effectuées 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, 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 sur le site: 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.

IV. LA CARTOGRAPHIE DES ETATS DE SURFACE

Elle exprime la synthèse et la généralisation des relations états de surface/image et se traduit par une restitution cartographique à moyenne échelle (1/50.000) qui peut résulter:

- soit de la même démarche dirigée déjà utilisée pour la classification de l'image 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 d'une démarche non dirigée, les relations précédentes sont alors utilisées pour valider les classifications et pour donner a posteriori une signification thématique aux classes (RAKOTO, 1988).

Quoiqu'il en soit, on obtient une stratification de l'espace qui va servir de base à la cartographie des ressources renouvelables et d'une façon plus générale à l'élaboration de cartes thématiques: sols, végétation, occupation du sol, sensibilité à l'érosion, etc.

Le cadre de cette publication ne permet pas la présentation des résultats cartographiques qui seront intégrés dans le rapport final du projet. Par contre, nous allons développer la troisième étape de la démarche

DEUXIEME PARTIE: ETUDE SYNCHRONE DES RELATIONS ETATS DE SURFACE/IMAGE AU NIVEAU DES SITES TESTS

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.

I. DONNEES ET METHODES

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 1).

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)

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

indice de couleur (réflectance)

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

Tableau 1:
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																													
RV Recouvrement total (en %)	Végétation sur pied	RP* recouvrement (en %) VS* structure (4 classes) VH* hauteur moyenne de la classe dominante (5cl)																											
	Litière	RL* recouvrement (en %)																											
23 Couverture minérale																													
RM Recouvrement total (en %)	Affleurement rocheux Pierrosité (>7,5 cm)	RR* recouvrement (en %) RO* recouvrement (en %)																											
	Graviers (7,5 à 0,2 cm)	RG* recouvrement (en %) GN* nature (4 cl)																											
	Terre fine (<0,2 cm)	RT recouvrement (en %) TX* texture (3 classes) TH* humidité (3 classes) OC couleur (10 classes)																											
	Terre fine	Structure particulière Structure en agrégats Structure continue avec croûte	RS* recouvrement (en %) SN* nature (4 classes) RA* recouvrement (en %) AN* nature (4 classes) AD* diamètre (4 classes) 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-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="2">RV</th> <th colspan="5">RM</th> </tr> <tr> <th rowspan="2">RP</th> <th rowspan="2">RL</th> <th rowspan="2">RR</th> <th rowspan="2">RO</th> <th rowspan="2">RG</th> <th colspan="3">RT</th> </tr> <tr> <th>RS</th> <th>RA</th> <th>RC</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			RV		RM					RP	RL	RR	RO	RG	RT			RS	RA	RC									
RV		RM																											
RP	RL	RR	RO	RG	RT																								
					RS	RA	RC																						
Schéma récapitulatif montrant les différentes composantes de la surface (recouvrement total = 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: XS_1, XS_2, XS_3 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.

II. LES RESULTATS

II.1. Typologie des états de surface à partir de la description sur le terrain

Le tableau 1 indique les 18 variables actives retenues pour l'analyse. 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 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):

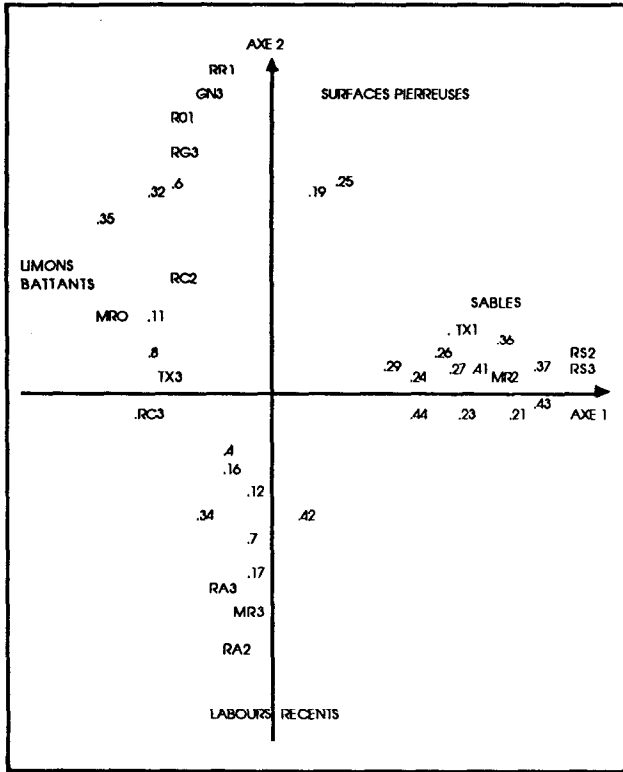


Figure 3. Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) sur les données de description de terrain.
Graphique Axe 1/Axe 2

- **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 (MRO).
- **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 "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).

II.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).

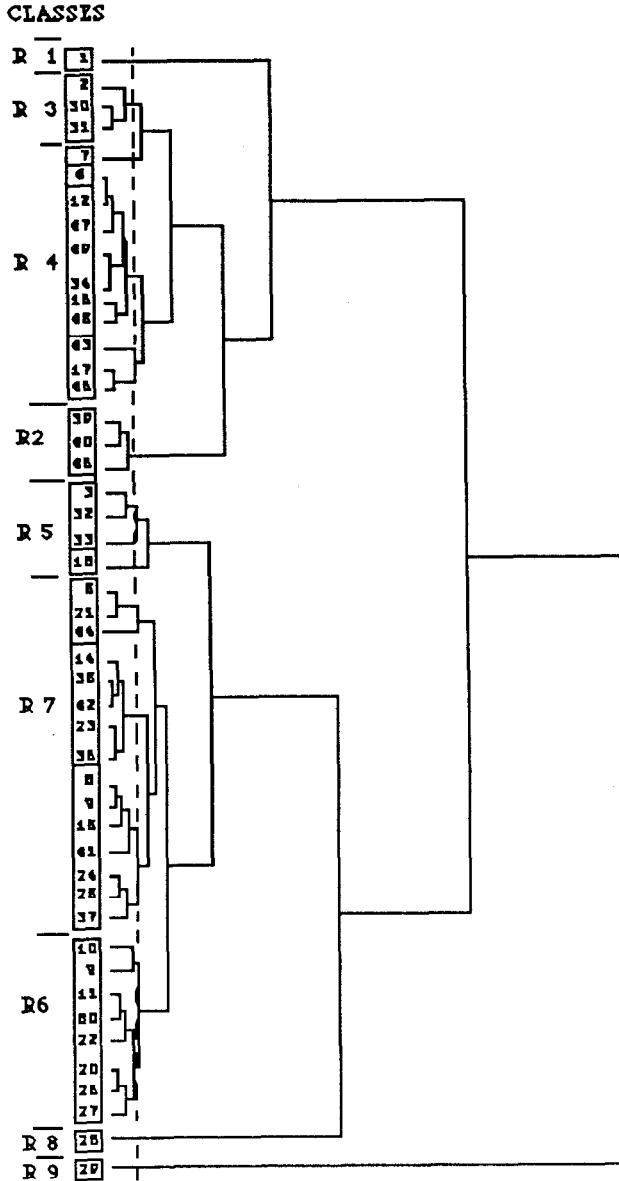


Figure 4. Arbre hiérarchique entre les sites tests (47) calculé par Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) sur les données radiométriques de terrain.

Pour chacune de ces classes, comprenant un ou plusieurs sites, on calcule les indices radiométriques moyens 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 2) qui correspondent soit à un type d'état de surface relativement bien défini (R1,R8,R9), soit à plusieurs types.

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 Trêfle 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 steppées-labours anciens, tout au plus permettent-elles de les situer dans un continuum où d'une façon générale la rugosité diminue.

II.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 3).

Classes	Etats de surface	IB	IV	IC
S1	Végétation active.	73	208	117
S2	"Salt marsh fonçés", steppes à halophytes.	75	158	135
S3	"Salt marsh clairs", steppes à halophytes.	91	141	133
S4	Labours récents (sables,limons) et labours anciens (limons).	110	138	135
S5	Steppes à végétation dense, lab. anciens	121	133	136
S6	Steppes, labours anciens (limons,sables)	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:

- **la végétation active** (S1).
- **les steppes à halophytes** des "salt marsh fonçés 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 et 11), 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%).

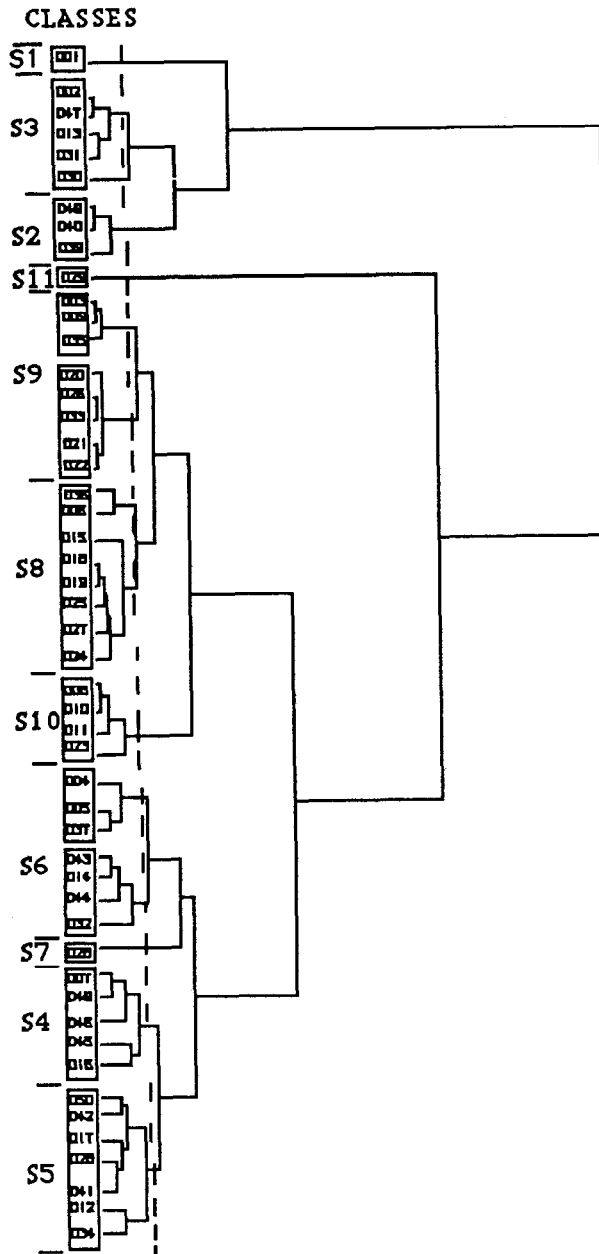


Figure 5. Arbre hiérarchique entre les sites tests (50) calculé par Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) sur les données radiométriques SPOT (30 Novembre 1987).

III. SYNTHÈSE: TYPOLOGIE DES ÉTATS DE SURFACE PERÇUS PAR SPOT

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 (évacuoirs) 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 foncés"** 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 applanies 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 *Limonium* (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 luminance 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

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.

CONCLUSION

Les données SPOT apportent une information importante sur les états de surface qu'il est possible de cartographier à moyenne échelle. Ces états de surface sont en relation plus ou moins directe avec les paramètres écologiques (sols, végétation, occupation humaine, hydrologie, etc) qui conditionnent les ressources renouvelables dans leur état présent, leur utilisation et leurs potentialités.

Les principaux milieux écologiques (dune côtière, dépressions salines, périmètres irrigués, zones labourées) se distinguent relativement bien sur l'image mais de nombreuses confusions subsistent. Pour une part, l'analyse diachronique devrait permettre de distinguer sans ambiguïté les zones d'aridoculture (sables ou limons) des zones sous végétation naturelle. De même, les variations saisonnières des états de surface dans les dépressions salines pourraient contribuer à une meilleure discrimination des différentes steppes à halophytes.

Le facteur rugosité joue un rôle primordial dans les milieux où subsiste une végétation steppique. Un seuil important semble correspondre à celui où le couvert végétal est compris entre 8 et 15%. A l'effet ombre créé par la végétation s'ajoute celui du microrelief (buttes sableuses). Pour des recouvrements plus faibles, la rugosité (microrelief, pierrosité) est le seul paramètre qui intervienne.

BIBLIOGRAPHIE

- AYYAD (M.G.), LE FLOCH (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.
- POUGET (M.), LORTIC (B.), SOUISSI (A.), ESCADAFAL (R.), and MTIMET (A.), 1984.- Contribution of Landsat data to mapping of land resources 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.
- 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)

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	

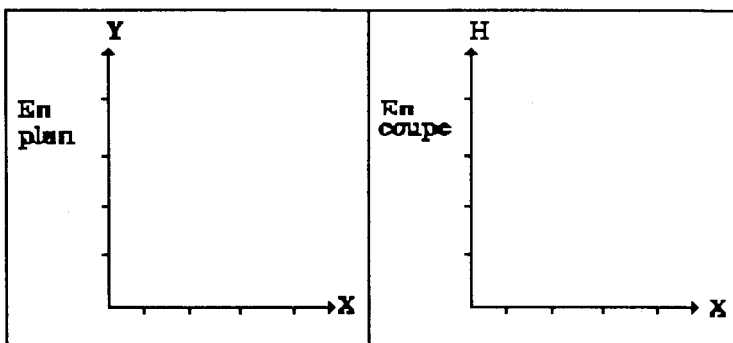
I.3.3. Unité géomorphologique	Type	
	Dimension	hectares
	Emplacement du site sur l'unité:	
	Distance du site par rapport à l'amont:	mètres

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	
	Amplitude	Verticale
	Avec ondulations	moyenne en mètres
	Orientation	-

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

SCHEMAS ET OBSERVATIONS DIVERSES



I.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	Etat 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	
Haies	
Talus	
Terrasses	

II.2.6. Techniques agricoles

Drainage (type)	
Irrigation (type)	
Labour	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 MOSAIQUE SURFACES ELEMENTAIRES ("MOSAIQUE SE") AU MOMENT DE LA DESCRIPTION DU SITE-TEST

III.1. Aire du site test décrit

III.1.1.. Superficie hectares 111

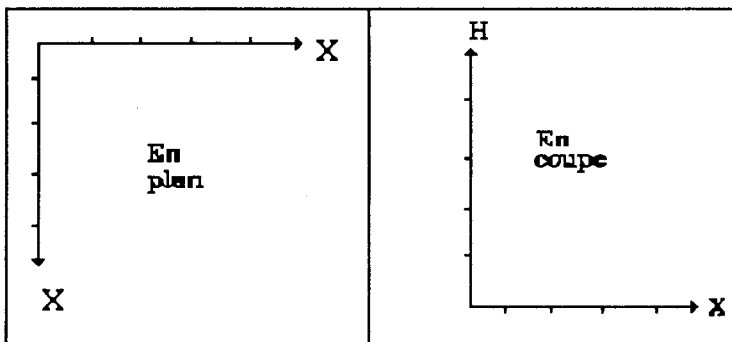
III.1.2. Nombre surfaces élémentaires décrites (SE) 111

III.2. Composition de " la mosaïque SE "

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

* Type de méthode utilisé

SCHEMAS DE LOCALISATION DES SE



IV.2.1.2. Caractérisation des strates

STRATES							
Caractérisation							
Identification	Estimé						
	Mesuré						
Recouvrement %	Estimé						
	Mesuré						
Recouvrement "Visible" %	Estimé						
	Mesuré						
"Activité"	Couleur domin.						
	Autre couleur						
	sec %						
	vert %						
	Éternité						
Structure	Hauteur moyenne en mètres						
	Distance moyenne						
	Durabilité						
	Taille moy. des courbes						
	Transparence						
Composition	Épave						
	Écroulement						

IV.2.2. Litières 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 +pierreosité+ terre fine)

Recouvrement en % Couverture minérale	TOTAL		"VISIBLE" par le satellite	
	Estimé	Mesuré	Estimé	Mesuré
A ffleurements rocheux				
Pierreosité				
Terre fine				
Couverture minérale (affl. +pierreosité +terre fine)				

IV.3.1. Affleurements rocheux

Types		I	II	II	
Caractérisation					
Identification					
Recouvrement %	Estimé				
	Mesuré				
Recouvrement "Visible" %	Estimé				
	Mesuré				
Couleur					
Hauteur myenne 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°	XR ₁	XR ₂	XR ₃	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	471	514	604	532	8	4
19	344	470	646	502	16	15
20	441	507	632	532	11	7
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°	XS ₁	XS ₂	XS ₃	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