

PROGRAMME MAB-UNESCO

ATELIER "BASES ECOLOGIQUES DU DEVELOPPEMENT RURAL INTEGRE ET DE LA LUTTE CONTRE LA DESERTIFICATION EN ZONES ARIDES ET SEMI-ARIDES D'AFRIQUE ET D'AMERIQUE LATINE"

(Coquimbo, IVème Région, Chili, 9-15 avril 1989)

## APPORTS DE LA TELEDETECTION SPATIALE SPOT A L'ETABLISSEMENT DES BASES ECOLOGIQUES POUR LE DEVELOPPEMENT RURAL INTEGRE DES ZONES ARIDES

*Cas concrets de la région côtière du Nord-Ouest-EGYPTE  
et de la Réserve de la Biosphère de Mapimi-MEXIQUE*

M. POUGET 1 A. CORNET 2 , E. LE FLOC'H 3, S. KAMAL 4

### INTRODUCTION

En zones arides, un besoin d'inventaire et de suivi des ressources renouvelables et des milieux se manifeste souvent de manière prioritaire. Dans le cadre d'une planification du développement il existe une demande d'informations actualisées et localisées sans cesse exprimée, quoiqu'imparfaitement formulée, en vue d'accroître les connaissances nécessaires à une gestion rationnelle des ressources.

Le développement rural intégré repose entre autre chose sur la connaissance des ressources naturelles (volume, distribution spatiale) et de la stratification du territoire en unités fonctionnelles (zonage agroécologique, inventaires des milieux, etc) et sur le suivi des systèmes écologiques en vue de déterminer leurs tendances évolutives à long terme.

De façon générale, la télédétection spatiale est de plus en plus fréquemment utilisée aux échelles moyennes et petites pour l'inventaire et le suivi de zones arides et semi-arides. Depuis quinze ans, de nombreuses études ont été réalisées à petite échelle à partir des données LANDSAT-MSS, NOAA et METEOSAT. Elles ont porté sur des reconnaissances ou des inventaires divers (occupation des sols, géomorphologie, végétation, ...), sur des essais de suivi des milieux et de contrôle continu de la désertification (WALKER et ROBINOVE, 1981; PONCET, 1985, 1986, COUREL, 1983, etc.) ou sur des évaluations périodiques de biomasse (TUCKER et al., 1983). Les limitations de ces études sont liées d'une part, au faible pouvoir de résolution au sol, aux difficultés de repérage et, d'autre part, au peu de représentativité des données de terrain très limitées dans l'espace par rapport à des données radiométriques intégrant de nombreux facteurs sur des territoires très étendus.

<sup>1</sup> Unité de Télédétection, Laboratoire Informatique Appliquée, Centre ORSTOM, Bondy, France

<sup>2</sup> ORSTOM, CEPE/CNRS, Montpellier, France

<sup>3</sup> CEPE/CNRS, Montpellier, France

<sup>4</sup> Botany Department, Faculty of Science, Alexandria University, Egypte

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : B 30039  
Cote : M 8-3-91 ex 1 P18

Les données de nouvelle génération (LANDSAT-TM et SPOT) grâce à leur meilleure résolution spatiale, permettent de se situer à un niveau de perception de l'ordre du secteur écologique (LONG, 1974). A ce niveau, variables géomorphologiques, couverture végétale et états de surface des sols, sont discernables non seulement par leur signature spectrale, mais également par leur structure (végétation contrastée, griffes d'érosion, placages sableux, implantations humaines, etc.) Le niveau de l'étude correspond alors presque à celui proposé par les méthodes "d'inventaire au sol", dont les finalités peuvent être : des cartes de végétation, d'occupation des terres, etc. Il en résulte une localisation plus précise des sites tests d'observation, une réalisation de mesures au sol en mode synchrone avec l'acquisition des données satellitaires, et une validation plus efficace des classifications obtenues.

Que peut apporter la télédétection spatiale et en particulier SPOT à l'établissement des bases écologiques pour un développement rural intégré des zones arides ?

L'utilisation opérationnelle des données satellitaires et les actions de recherche en cours s'inscrivent dans quatre axes principaux :

- aide à l'inventaire des ressources renouvelables et des milieux.- stratification de l'espace et intégration des données au sein de systèmes d'information géographiques
- analyse de la variabilité saisonnière du couvert végétal et de la production végétale annuelle
- suivi de l'évolution à moyen et long termes des paysages et des systèmes écologiques, détermination des tendances évolutives.

Le but du présent travail est de décrire succinctement les méthodologies utilisées et les résultats obtenus à partir de quelques exemples d'application en zone aride: la région côtière Nord-Ouest de l'Égypte, la réserve de la Biosphère de Mapimi dans le désert de Chihuahua au Mexique, et une zone sahélienne du Nord du Burkina Faso.

Nous aborderons d'abord l'aide à l'inventaire des ressources renouvelables en considérant d'une part l'inventaire et la cartographie des ressources et du milieu pour un territoire donné (Égypte, Mexique), d'autre part l'étude focalisée d'un thème précis: les ressources fourragères dans la Réserve de Mapimi. Le deuxième thème abordé sera le suivi des ressources renouvelables et du milieu à partir de l'étude diachronique de deux images (Égypte) et la détermination des unités dynamiques d'un paysage sahélien (Burkina Faso).

## **I- AIDE A L'INVENTAIRE DES RESSOURCES RENOUVELABLES ET DES MILIEUX (SURVEYING)**

L'objectif poursuivi est la définition, la délimitation, la description et la cartographie des unités fonctionnelles du paysage: régions écologiques, secteurs écologiques, unités géomorphologiques, systèmes écologiques, unités d'occupation des terres ainsi que la hiérarchisation des limites obtenues. Il s'agit en particulier, dans le contexte des zones arides, de permettre l'inventaire des systèmes écologiques et l'établissement des limites de généralisation des résultats. Cela nécessite une méthode applicable et reproductible permettant la stratification de l'image et la définition d'unités. Cela nécessite aussi que les

unités définies par télédétection satellitaire soient reconnues comme pertinentes par le thématique de terrain et interprétées.

Les données satellitaires, en intégrant l'ensemble des caractéristiques de la surface (situation géomorphologique, nature et état des couvertures végétale et minérale, infrastructures, etc), devraient faire éclater les démarches monothématiques en favorisant une approche multidisciplinaire pour l'étude des écosystèmes en zones arides. Comment utiliser les données SPOT, au-delà d'une simple problématique "occupation du sol", pour obtenir un zonage de l'espace qui serve de base à l'inventaire des ressources renouvelables et des milieux? Comment mettre en évidence des unités fonctionnelles, repérables par les naturalistes sur le terrain et susceptibles de servir de bases aux études de fonctionnement à partir de mesures physiques (unités de classification basées sur les valeurs de réflectance) représentant un aspect de la réalité à un instant donné.

L'approche retenue est *l'approche "état de surface"*, qui privilégie l'information spectrale, et se base sur les relations existant entre les états de surface et les valeurs radiométriques enregistrées par le satellite. Pour KILIAN "l'état de surface représente l'ensemble des caractères propres à la surface de la Terre susceptibles d'être détectés depuis un satellite ou un avion". L'image est la résultante de l'interaction du rayonnement avec les différents éléments constituant la surface de la terre. Outre les effets de l'atmosphère sur le rayonnement les paramètres qui interviennent peuvent se regrouper en deux ensembles :

- les paramètres en relation avec la géométrie du système : source du rayonnement (soleil)-surface de la terre-capteur. Ils conditionnent les phénomènes d'éclairement et d'ombres: exposition, pente, microrelief, rugosité (pierrosité, travaux du sol, végétation, constructions humaines), etc.
- les paramètres en relation avec les propriétés intrinsèques de réflexion et d'absorption de la surface. Ils concernent la nature et l'état des couvertures minérale (sols, roches, eaux, constructions humaines) et des végétale (végétation, débris et litière, etc.).

Cette approche implique la formulation d'hypothèses afin d'établir, pour chaque "état de surface" détecté par le satellite, une relation entre l'information terrain prenant en compte les paramètres précédents et l'information image, c'est-à-dire les valeurs radiométriques enregistrées par les capteurs. Il convient ensuite de traiter et d'analyser ces deux types d'information .

• *L'information terrain* est collectée essentiellement au niveau de *sites tests* (groupe de plusieurs pixels) repérables sans ambiguïté sur l'image et le terrain, l'échantillonnage pouvant être fait selon au moins deux approches différentes:

- *une approche analytique* (démarche dirigée) partant de zones bien définies, a priori, sur l'image et sur le terrain et dans lesquelles les sites tests sont choisis..
- *une approche globale* (démarche non dirigée) partant de l'analyse de l'image cette approche aboutit à la détermination de classes dont on recherche, a posteriori, la signification thématique sur le terrain en implantant et en étudiant des sites tests.

• *L'information image* est obtenue essentiellement par l'analyse de l'espace radiométrique. Chaque pixel ou chaque groupe de pixels (par exemple un site test) est situé à la fois dans l'espace radiométrique constitué par les axes correspondants aux canaux SPOT et dans l'espace géographique, c'est-à-dire l'image, La démarche consiste à isoler des portions du nuage (ensemble de



- zone côtière à l'Ouest d'Alexandrie
- climat de type méditerranéen aride avec une pluviométrie de 150 mm/an environ.
- géomorphologie : système de dunes consolidées (ridges) parallèles à la côte et séparées par des dépressions endoréiques.
- sols plus ou moins profonds sur sables et sur limons, sols salsodiques.
- occupation humaine:
  - pastoralisme
  - aridoculture : céréales sur limons et arboriculture (figuiers) sur sable.
  - localement zones irriguées par les eaux du Nil (extension vers l'Ouest du Delta depuis la mise en service du barrage d'Assouan).
  - urbanisation et implantation de complexes touristiques le long de la côte (dune côtière).

## • LA DEMARCHE UTILISEE

### 1- Préparation de l'étude

Un point important concerne le choix des données SPOT. Combien de scènes? Quelles dates 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-début avril) et l'autre en fin de saison sèche (octobre-novembre). Une programmation d'acquisition des données SPOT a donc été préparé pour 1987 avec ces deux créneaux de dates et pour deux scènes compte tenu de l'étendue de la zone d'étude. Ces deux scènes se trouvant sur la même orbite du satellite, l'acquisition des images a pu se faire simultanément par les deux capteurs H.R.V. (Haute Résolution dans le Visible) en mode multispectral. Les aléas climatiques n'ont pas permis d'obtenir de données en mars mais seulement début avril. Finalement nous avons pu disposer pour les deux scènes (KJ 107-288 et KJ 108-288) de deux dates: 10 avril 1987 et 30 novembre 1987 (même angle de prise de vue).

### 2- Analyse préliminaire de l'image du 10 avril 1987

Cette analyse, menée préalablement au travail sur le terrain, a été faite de deux façons différentes mais complémentaires:

- analyse visuelle des compositions colorées (échelle 1/200.000 et 1/50.000) réalisées à partir des films négatifs Noir et Blanc
- analyse numérique des données (bande magnétique CCT) effectuée à l'Unité de Télédétection de Bondy avec le logiciel PLANETES ( RAKOTO-RAVALONTSALAMA et al, 1988).

Il s'agit d'une démarche dirigée basée sur les connaissances déjà acquises sur la zone d'étude et la structure de l'image elle-même. Des zones (training areas) qui

apparaissent homogènes par leur couleur et leur texture et pour lesquelles on fait des hypothèses quant à leur signification thématique sont délimitées sur la composition colorée. L'extraction des caractéristiques radiométriques de ces zones, puis le regroupement de certaines de ces zones pour définir des classes radiométriques caractérisées par la moyenne et par l'écart-type des valeurs radiométriques dans chaque canal.

Chaque pixel de l'image est ensuite affecté à l'une des classes définies, à partir d'une méthode de classification de type barycentrique (classification de SEBESTEEN). Il s'agit d'une classification basée sur la distance minimale pondérée par l'inverse de l'écart-type. Chaque pixel est affecté à la classe avec laquelle sa distance radiométrique calculée est minimale.

Cette analyse préliminaire a pour objectif d'inventorier les principales unités qui apparaissent sur l'image et surtout de préparer l'étude de terrain par un plan d'échantillonnage (choix du nombre et de l'emplacement des sites tests). Des hypothèses sont formulées sur les paramètres les plus importants de la surface et leur influence sur les données SPOT. Sans entrer dans le détail des résultats on constate que, compte tenu d'une assez grande corrélation entre les 3 canaux, la brillance est un élément important à prendre en compte. Elle est en relation avec les paramètres humidité et surtout rugosité, eux-mêmes en étroite relation avec certains éléments composant les écosystèmes et l'activité humaine (profondeur de la nappe phréatique, travaux cultureux, etc).

### **3- Etude synchrone terrain/image SPOT (15 novembre/3 décembre 1987)**

L'étude est conduite au niveau des sites tests (50) où sont effectuées des observations précises de la surface du sol et les mesures radiométriques. La composition colorée à 1/50.000 (sur papier) s'avère être un document irremplaçable pour un repérage précis sur le terrain. Le choix de l'emplacement des sites tests se réfère à l'analyse précédente mais résulte surtout d'une confrontation terrain/image qui permet une localisation très précise et une appréciation de l'hétérogénéité. Chaque site a une superficie comprise entre 0.5 et 5 ha environ.

La description de la surface est facilitée par l'usage d'un formulaire adapté aux études utilisant les données satellitaires. Les 34 variables retenues concernent les principales rubriques :

- la situation dans le paysage: géomorphologie, pente, exposition etc.
- la caractérisation quantitative de trois ensembles de paramètres: microrelief, couvertures végétale et minérale.

Les mesures radiométriques ont été effectuées à l'aide d'un radiomètre CIMEL (3 canaux analogues à ceux de SPOT) sur les différents éléments composant la surface (ESCADAFAL 1989).

On dispose ainsi d'un ensemble de données comprenant:

- les variables terrain.
- les mesures radiométriques réalisées sur le terrain.
- les valeurs radiométriques SPOT pour les trois canaux aux deux dates d'acquisition.

Le traitement statistique de ces données (AFC, ACP, CAH) permet de préciser les relations terrain/image et de confirmer l'importance du facteur rugosité.

#### 4- Synthèse des relations terrain/image SPOT avec généralisation des résultats

Cette synthèse se traduit par une restitution cartographique (1/50.000): carte des états de surface pour les deux dates (avril et novembre 1987). Elle peut résulter:

- soit de la même démarche dirigée déjà utilisée pour l'analyse préliminaire des données d'avril. Les observations et mesures de terrain au niveau des sites tests permettent d'ajuster et de préciser la classification.
- soit d'une démarche non dirigée telle qu'elle sera exposée ultérieurement (MALEK, 1989). Les données terrain sont alors utilisées comme validation et permettent de donner une signification thématique aux classes.

Quoiqu'il en soit, la stratification de l'espace obtenue sert de base à l'élaboration de cartes thématiques: sols, végétation, occupation du sol, sensibilité à l'érosion, etc.

#### • RESULTATS

Cette étude débouche sur la restitution d'une carte radiométrique des états de surface au 1/50.000 interprétable en terme thématique selon la grille proposée au Tableau 1

Tableau 1- Résultats de la classification et thèmes identifiés  
Zone de burg el arab - (Egypte)

N°	IB	IVG	THEME
1	121	114	Dune côtière - Carrières - Surfaces très claires
2	103	114	Dune côtière - Surfaces très claires
3	93	118	Limons très battants
4	89	118	Limons battants
5	86	119	Limons à nodules
6	84	120	Limons à nodules et surfaces sableuses
7	84	118	plus ou moins rougeâtres
8	82	120	Sables labourés (aplanis)
9	80	119	Ridge (surfaces caillouteuses claires)
10	77	120	Sables avec végétation naturelle + limons labourés
11	74	119	Limons labourés : labour ancien
12	70	119	Limons labourés : labour récent
13	65	120	Limons labourés avec pseudosables (sels)
14	49	124	Solonchak ( <i>Halocnemum, Salsola</i> ) et sols irrigués
15	49	124	Salt marsh = Solontchak humides et parcelles irrigation récente
16	37	92	Eau libre : mer peu profonde
17	20	85	Eau libre : mer
18	47	155	Végétation active = Trèfle d'Alexandrie irrigué

$$\text{- Indice de brillance IB} = \sqrt{\frac{(XS_1)^2 + (XS_2)^2 + (XS_3)^2}{3}}$$

$$\text{- Indice de végétation IVG} = \frac{XS_3 - XS_2}{XS_3 + XS_2} \neq 128 * \frac{(1 + (XS_3 - XS_2))}{(XS_3 + XS_2)}$$

Afin de comparaison nous évoquons une étude menée dans la Réserve de la Biosphère de Mapimi et basée sur une démarche voisine (CORNET et al., 1988). Elle a conduit à la caractérisation de 31 classes radiométriques dont le regroupement a abouti à la distinction de 21 thèmes. La signification de ces thèmes a été déterminée après vérification sur 60 relevés de terrain, répartis dans différentes classes.

Le Tableau 2 donne l'importance relative des différents thèmes pour la partie de l'image traitée correspondant à 104.000 ha. Les formations herbeuses à intérêt fourrager correspondent aux thèmes 10, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 et représentent 58,3 % de la surface étudiée. La réalisation d'un masque permet d'extraire les classes radiométriques correspondant à ces thèmes et de les cartographier séparément.

Tableau 2 : Thèmes retenus après classification et regroupement des classes.  
Réserve de la Biosphère de MAPIMI -MEXIQUE.

n°	THEMES	Classes	% image
1	Etendues d'eau libre	1,2	0,07
2	Ombres orographiques	3	0,37
3	Reliefs volcaniques sombres	4	1,48
4	Pentes rocheuses	5	1,43
5	Hauts piedmonts caillouteux	6,10	5,45
6	Bas piedmonts et collines caillouteuses	7,8	4,44
7	Végétation arbustive sur sol pierreux	9	2,98
8	Fourrés denses	11	2,79
9	Formations arb. claires "Matorrals à <i>Larrea</i> "	12,15,14	11,82
10	Vég. ligneuse basse très claire + herb. claires	13	6,40
11	Vég. assez active ligneuse + herbacées	16,19 à 21	5,70
12	Fourrés avec ligneux actifs ( <i>Prosopis</i> )	17	0,74
13	Vég. basse active + champs irrigués	18	0,04
14	Zone à sols rougeâtres avec vég. peu couvr.	22	5,99
15	Formations herbeuses denses	23	7,94
16	Formations herbeuses pâturées dens. moyen.	25	6,25
17	Formations herbeuses claires	24,26	16,67
18	Zones dégradées couvert faible sol rougeâtre	27	0,25
19	Formations herbeuses dégradées très claires	28	10,88
20	Zones dénudées, quelques annuelles	24	3,40
21	Soils nus très réfléchants	30,31	4,40

## B- CLASSIFICATION DES FORMATIONS VEGETALES D'INTERET FOURRAGER

### REPARTITION DE LA BIOMASSE HERBACEE DANS LA RESERVE DE LA BIOSPHERE DE MAPIMI (DGO, MEXIQUE)

#### \* LOCALISATION DE LA ZONE D'ETUDE. OBJECTIFS.

La Réserve de la Biosphère de Mapimi est située dans les zones arides du nord du Mexique (Desert de Chihuahua); le climat est tropical aride d'altitude moyenne avec des précipitations estivales voisines de 250 mm. Elle appartient à une zone de vastes bassins endoréiques, le relief est constitué de plaines alluviales piquetées de Cerros rocheux d'origine ignée ou sédimentaire. La végétation est constituée sur les reliefs et les glacis par un matorral xérophylle et

dans les parties basses par des steppes à graminées vivaces parsemées d'arbustes.

La nécessaire augmentation de la production animale dans les zones arides du Nord du Mexique devra reposer sur l'optimisation de l'utilisation des ressources naturelles dans le cadre d'un développement durable pour lequel il est indispensable de réaliser une détermination correcte des potentialités de parcours et d'établir des plans d'exploitation rationnelle.

Sur cette base, l'Institut d'Ecologie et l'ORSTOM ont développé depuis 1981 une étude écologique intégrée des ressources naturelles faisant partie du Programme MAB-FRANCE dans la Réserve de la Biosphère de Mapimi et de son aire d'influence.

L'étude d'inventaire (BREIMER 1985, MONTANA, 1987) a permis de définir et de cartographier les grandes unités de géomorphologie et de végétation et d'identifier les principales formations d'intérêt fourrager. Par ailleurs des études stationnelles ont permis de suivre la dynamique de ces groupements et les cycles de production de biomasse.

L'objectif de notre étude (CORNET et al., 1988) est de relier les caractéristiques radiométriques des vues SPOT à des caractéristiques de végétation mesurées sur le terrain pour des sites tests, afin de répondre à deux questions principales :

- quels sont les paramètres mesurés, sur une végétation hétérogène de zone aride à différentes dates, qui sont les mieux corrélés aux caractéristiques radiométriques des images?
- peut-on à partir des données radiométriques et des mesures de terrain sur sites tests établir une typologie des groupements d'intérêt fourrager liée à leur niveau de productivité et cartographier la biomasse herbacée présente?

#### \* DONNEES ET METHODES

Les données concernent un échantillon de 17 parcelles décrites par des caractéristiques de milieu et de végétation relevées in situ et par des caractéristiques radiométriques extraites des images SPOT.

##### 1- Données de terrain :

Les données relatives aux états de surface du sol sont :

- le pourcentage de sol nu calculé par différence avec la couverture totale de la végétation,
- le pourcentage de croûtes de battance mesuré par une méthode de points quadrats,
- le pourcentage de bioderme, croûtes à cyanophycées, mesuré par la même méthode

En raison de la non coïncidence des dates de mesure et de certaines prises de vue, les mesures d'humidité et de couleur de sol n'ont pas été prises en compte.

Les mesures effectuées sur la végétation portent sur des relevés de 1 ha situés dans des zones représentatives plus vastes. Les paramètres relevés sont :

- la liste floristique,
- le recouvrement total de la végétation CTV,
- le recouvrement de la strate herbacée RSH,
- le recouvrement des annuelles RA,
- le recouvrement des graminées vivaces RGV,
- le recouvrement de la strate ligneuse RSL,  
(strate ligneuse basse < à 2 m)

## 2- Données radiométriques :

Après localisation des sites tests sur l'image, les valeurs radiométriques des différents pixels, représentant chaque parcelle, sont extraites. Les données prises en compte sont la moyenne et la variance dans chaque canal SPOT XS1 XS2 et XS3. (les trois valeurs sont très corrélées à > 0.95).

La réflectance de la végétation en milieu naturel est le résultat de nombreux facteurs. Cependant, les caractéristiques essentielles dépendent d'une part de la biomasse verte active, qui se traduit par des différences d'absorption dans le rouge (0.6 - 0.7  $\mu\text{m}$ ) et le proche infrarouge (0.8, 1.1  $\mu\text{m}$ ), et d'autre part de la rugosité de la surface liée à la quantité de végétation qui réduit la réflectance sur l'ensemble des canaux. Les indices suivants ont donc été calculés. On a donc calculé :

- indice de brillance IB
- indice de végétation IVG

## 3- Méthode d'analyse :

L'analyse des données a comporté différentes étapes:

- d'une part, le traitement des images complètes aboutissant à une classification des images (voir ci-dessus). La représentation cartographique des classes donne une carte de distribution des thèmes radiométriques interprétables après validation sur le terrain en termes d'occupation des sols. Les thèmes correspondant aux formations végétales à intérêt fourrager peuvent être extraits et cartographiés séparément.

- d'autre part, le traitement des données relatives aux sites tests suivant une démarche progressive :

- *Classification, des sites tests en fonction de caractéristiques de terrain* au moyen d'une analyse en composantes principales (ACP) pour chaque date afin de faire apparaître le regroupement des sites et la stabilité de ces regroupements dans le temps. La recherche de l'existence de relations entre sites et variables permet de détecter un éventuel mode ordonné de répartition des sites.
- *Etude des relations entre sites tests: variables de terrain/caractéristiques radiométriques.* La mise en évidence des relations entre les variables relatives à la description de la végétation et les grandeurs radiométriques, à

partir d'une ACP nécessite que l'on recherche la signification des axes et les relations entre variables à partir des matrices de corrélation.:

- Expression par des régressions des liaisons variables radiométriques/ caractéristiques de la végétation

L'information relative au couvert végétal peut être corrélée quantitativement aux caractéristiques radiométriques dans chaque canal ou à leur combinaison en indices de végétation ou de brillance. Il sera alors possible de créer des néocanaux à partir du calcul des régressions représentant des caractéristiques du couvert végétal : recouvrement de la végétation, biomasse herbacée, dont on pourra ensuite cartographier la répartition.

## \* RESULTATS

### 1- Analyse en Composantes Principales des données de terrain pour les sites tests:

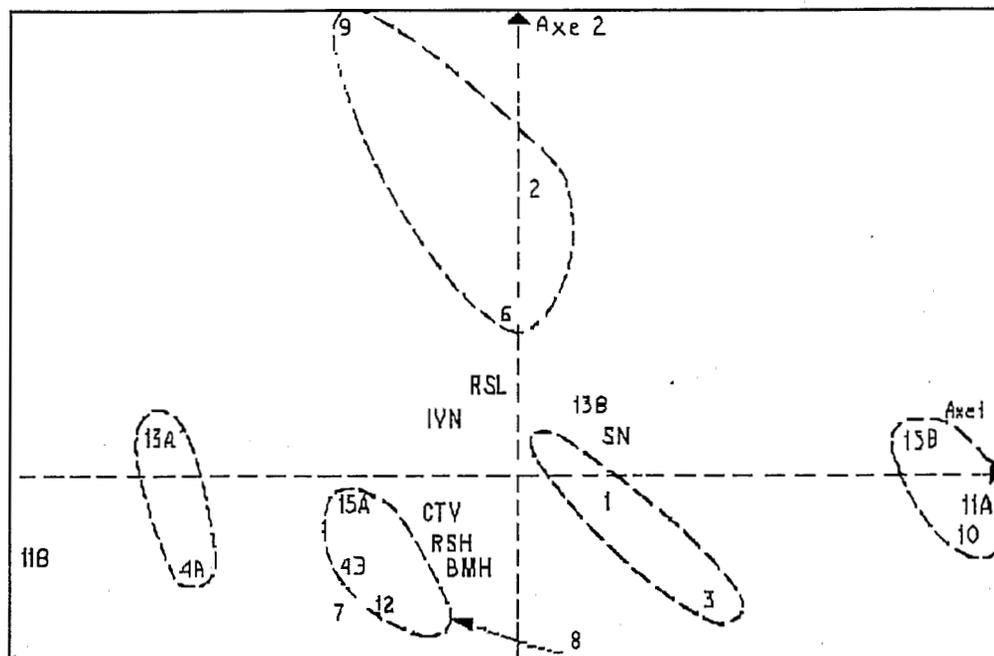


Figure 2 Classification des sites test en fonction des caractéristiques de terrain (CORNET et al., 1988)

La projection des sites sur le plan des axes 1 et 2 (Figure 2) permet leur classement en 6 groupes à partir des variables de terrain.

1. Formations ligneuses basses à strate herbacée peu couvrante 2, 6, et 9.
2. Formations à très faible couverture végétale 10, 11A, 15B.
3. Formations herbeuses à *Hilaria* de playa 1 et 3.
4. Formations herbeuses à *Hilaria* et *Sporobolus* 12, 4B, 8, 15A.
5. Formations herbeuses denses à *Hilaria* ou *Sporobolus* 4A, 7, 13A.
6. Formations herbacées à ligneux bas, ligneux hauts des arcs de végétation 11B

## 2- Analyse des corrélations : variables de terrain/variables radiométriques

Les analyses ont montré la forte corrélation des variables radiométriques entre elles et un certain nombre de variables de terrain entre elles, ce qui nous permet de réduire le nombre de variables à considérer.

Les plus fortes corrélations sont:

- entre Biovolume et Indice de végétation. De fait seuls les ligneux sont actifs en mai et leur contribution au Biovolume est importante (RSL est également corrélé à IVG)
- entre Couverture totale de la végétation et Indice de brillance. En effet, la couverture totale de la végétation toutes catégories confondues (verte et sèche), est un facteur de rugosité diminuant la réflectance (BVT est également corrélé aussi avec IB)

A noter que la corrélation entre Biomasse herbacée verte et Indice de végétation n'est pas significative, ce qui peut s'expliquer par la prédominance des ligneux actifs et par l'occultation de la biomasse herbacée verte par la matière sèche accumulée en saison sèche.

Etant donné la forte individualisation des groupements ligneux et la possibilité de les distinguer sur la classification de l'image, nous les avons retirés de l'analyse. Ce retrait modifie les corrélations dont les plus fortes sont alors:

- entre Indice de brillance Couverture totale de la végétation et Recouvrement de la strate herbacée (effet de la rugosité de la végétation sur la réflectance).
- entre Indice de végétation et Biomasse herbacée verte correspondant bien à la signification de cet indice.

Cependant la biomasse, herbacée constituée en grande partie par de la végétation latente plus ou moins desséchée, est plus corrélée à l'Indice de brillance qu'à l'Indice de végétation.

## 3- Etablissement des relations caractéristiques radiométriques des sites tests/descripteurs de la végétation.

Le but est d'établir des relations quantitatives permettant à partir des valeurs radiométriques de calculer certaines caractéristiques du couvert végétal et de le représenter cartographiquement.

Ainsi pour l'ensemble des sites, la couverture totale de la végétation estimée en saison sèche est exprimée par la relation:

$$\text{CTV} = -0,397 \quad \text{IB} - 3,043 \quad \text{IVG} + 556,175$$

avec  $R = 0,710$   $F_c = 7,108^{**}$

Pour la biomasse herbacée en ne considérant que les formations herbeuses, nous avons la relation:

$$\text{BMH} = -7,830 \text{ IVG} - 1,525 \text{ IB} + 1646,978$$

avec  $R = 0,767$   $F_c = 7,889^{**}$

dans laquelle BMH est la biomasse herbacée totale en g de M.S. m<sup>-2</sup>

A partir de cette relation, on calcule pour l'ensemble des pixels de l'image les valeurs de biomasse herbacée. Un masque réalisé à partir de la classification a permis d'extraire les formations herbeuses pour lesquelles cette relation est applicable. Un seuillage sur l'écran, suivi d'une validation de terrain ont permis de déterminer cinq classes de valeurs de biomasse et de les cartographier automatiquement.

La classe n°5 correspond à des formations très denses à *Sporobolus airoides*, confondues radiométriquement dans la classification avec les formations ligneuses. Ces zones ont pu être distinguées par leur position topographique et rajoutées aux formations herbeuses.

En conclusion, la comparaison entre les données radiométriques extraites des scènes SPOT les valeurs de recouvrement et les biomasses mesurées in situ montrent qu'en saison sèche:

- l'Indice de végétation n'est corrélé significativement ni avec la Couverture totale de la végétation, ni avec la Biomasse totale ou la Biomasse verte.
- l'Indice de brillance est corrélé de manière significative avec la Couverture totale de la végétation. Cette dernière jouant surtout sur la rugosité de la surface.
- Il est possible, même en saison sèche, après classification de l'image et stratification des zones, de trouver une relation satisfaisante entre Biomasse herbacée totale et la combinaison des indices de végétation et de brillance. Cette relation étant applicable aux formations herbeuses présentant un intérêt fourrager.

Les résultats recourent ceux de Mc DANIEL et HASS (1982) pour les zones voisines, où ces auteurs montrent que le suivi par télédétection de la production des terres de parcours est possible à condition de procéder par deux étapes :

- une classification préalable de l'image permettant l'identification de grandes unités de végétation/sols
- et ensuite la détermination, pour les unités identifiées, des corrélations radiométrie/ biomasse.

## II- SUIVI DES RESSOURCES RENOUVELABLES ET DES MILIEUX (MONITORING)

Dans ce cadre, l'utilisation de l'imagerie satellitaire prend une place croissante pour la connaissance des processus d'évolution et la prévision des modifications de l'environnement. La télédétection apparaît comme le principal outil, pour le suivi effectif de l'évolution des milieux arides.

On peut distinguer deux démarches :

**La détection des changements** à la surface de la terre, mise en évidence à partir d'étude diachronique de la dynamique des paysages sur l'influence de processus naturels (sécheresse, inondations, etc...) ou anthropiques (développement des cultures, défrichement, urbanisation, érosion, salinisation...). Se situent dans ce cadre les travaux d'étude diachronique de deux prises de vue rapprochées pour la région côtière Nord-Ouest d'Egypte et la détermination des unités dynamiques d'un paysage sahélien (ANDRIANASOLO et MALEK, 1988).

**Le suivi effectif** de ces processus par l'enregistrement d'un ou de plusieurs paramètres basés sur la connaissance de la nature et des facteurs qui conditionnent ces processus pour pouvoir intervenir si besoin était.

Il faut donc connaître les différentes phases de ces processus et connaître comment les paramètres qui les caractérisent se manifestent dans une séquence de données satellitaires. Ces paramètres devront être :

- observables et identifiables sur l'image, repérables et identifiables sur le terrain.
- significatifs d'une évolution écologique précise ou d'un seuil dans cette évolution.
- fiables.

Jusqu'à présent les travaux effectués concernent surtout la première démarche, détection des changements. Cependant on peut classer dans la seconde le suivi de l'évolution de la couverture ligneuse au Sahel (MERING et JACQUEMINET, 1988).

### A- METHODOLOGIE POUR LA DETECTION DES CHANGEMENTS

Ces études s'appuient sur la mise au point de méthodes d'analyse de séries temporelles. Il s'agit à partir de deux vues redressées et superposables de détecter et d'analyser les changements. Pour cela trois méthodes ont été ou sont utilisées:

- A partir des films, par *des traitements photochimiques appropriés* (addition et soustraction de densité) on obtient l'identification des zones de changement et la possibilité de les interpréter.
- A partir des données numériques, avec *l'analyse et le découpage d'histogrammes bidimensionnels* de néocanaux correspondant aux deux dates. Ces néocanaux pouvant être les indices de brillance ou de végétation.

Les changements intervenus entre deux dates se traduisent par un déplacement de pixels de part et d'autre de la bissectrice de l'histogramme. Un découpage de cet histogramme peut permettre de déterminer des classes de changement, de les cartographier et de les interpréter.

\*A partir des données numériques, *une approche globale* qui consiste à appliquer un modèle de décomposition de l'espace géographique à partir de données satellitaires, de manière non supervisée pour chaque date. On réalise ensuite une image multidate

Un tel modèle a servi de base à la mise en oeuvre d'une démarche globale de traitement des images satellitaires pour établir un diagnostic du paysage en région sahélienne (MALEK C., 1989). Il s'agit en fait d'une méthode d'approche de la dynamique du paysage sur une période du cycle annuel. Ainsi dans cet exemple, l'analyse des unités dynamiques du paysage a été faite en utilisant deux images SPOT acquises l'une en saison humide (maximum de végétation) et l'autre en saison sèche. La démarche comprend 3 étapes (figure 3)

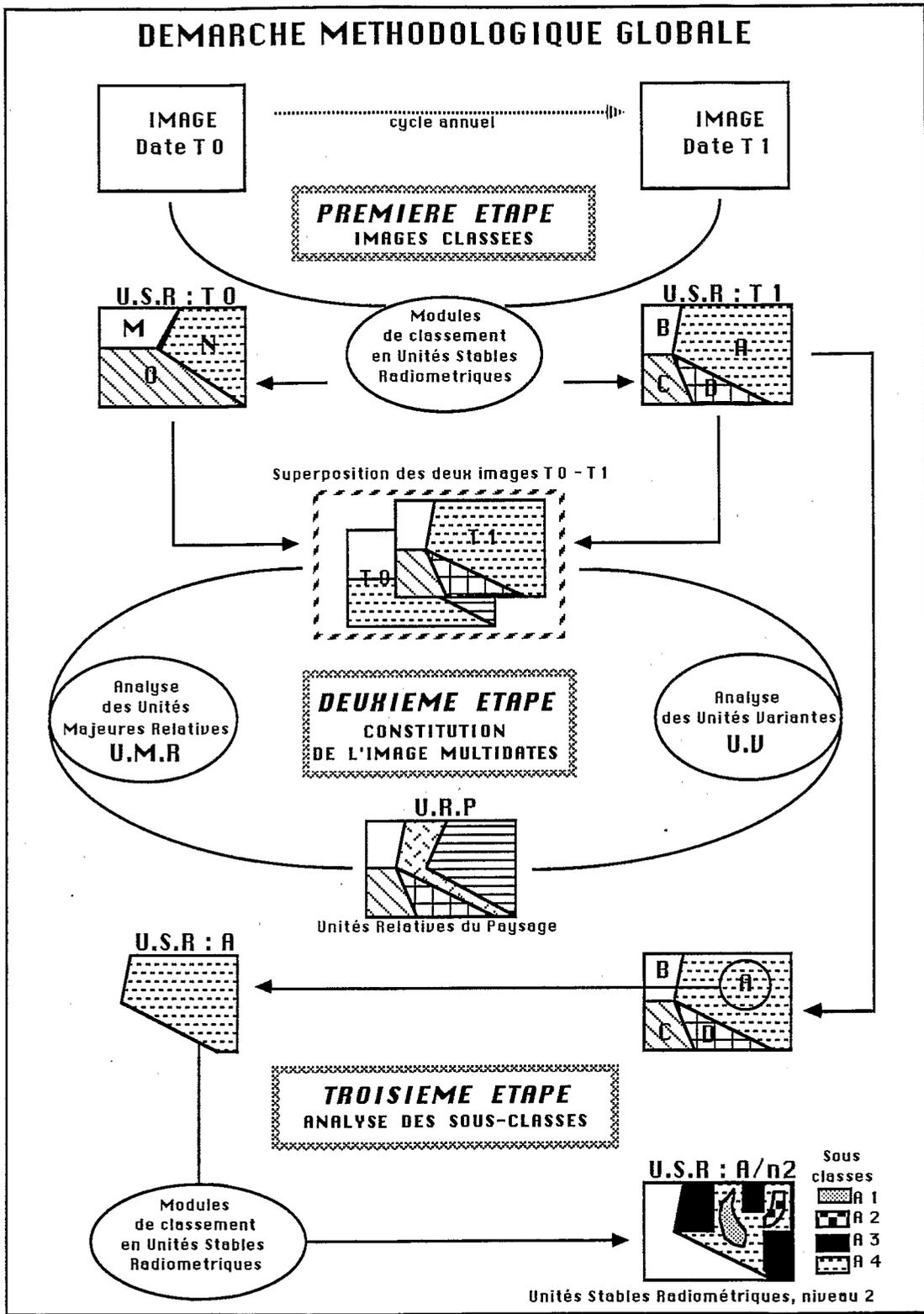


Figure 3 - Schéma de la démarche globale (MALEK, 1989)

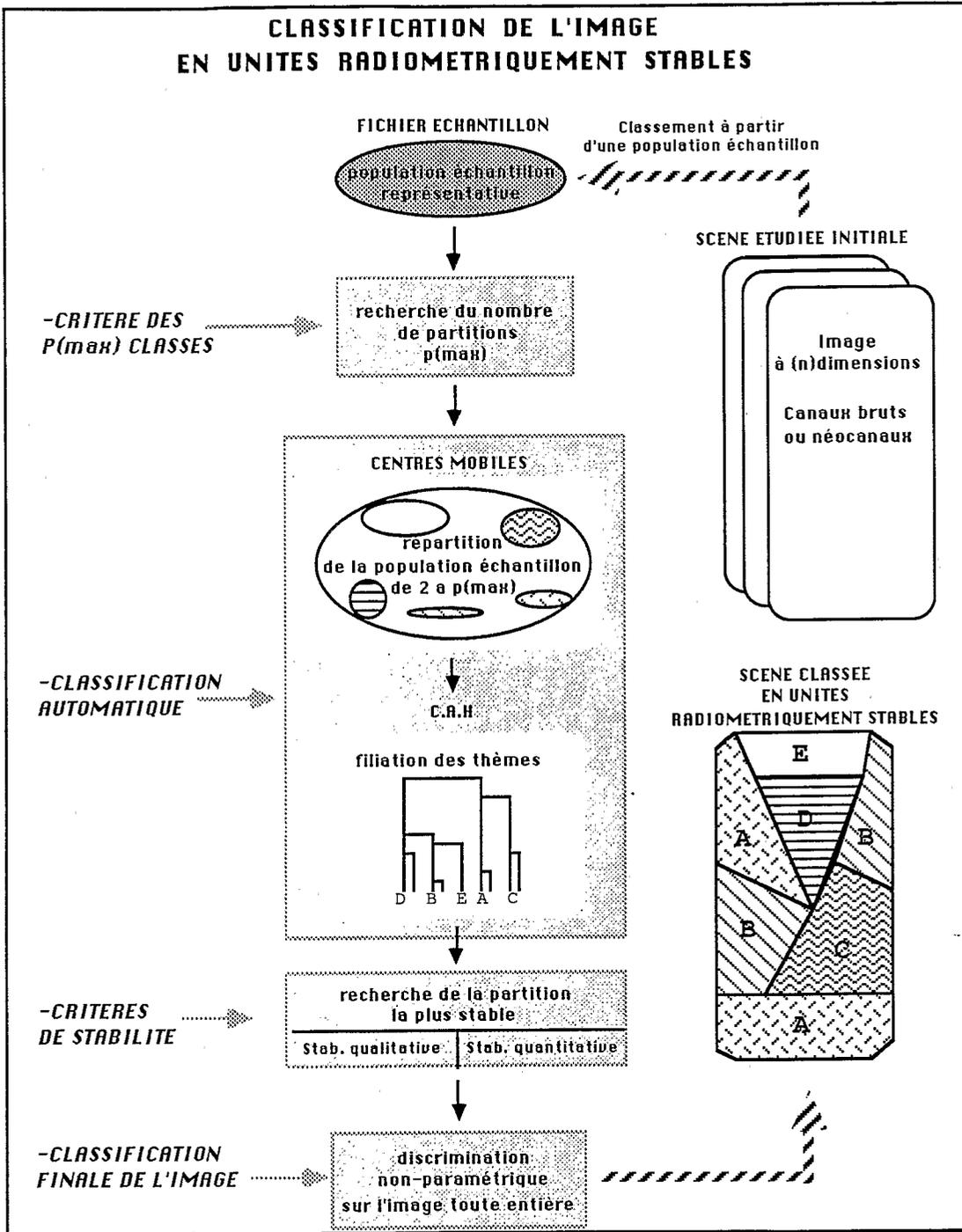


Figure 4 - Hiérarchisation du paysage en unités radiométriques stables (MALEK, 1989)

- Etape 1- Hiérarchisation du paysage, recherche de partitions sur chacune des deux images. (Figure4).

Etant donné le grand nombre de pixels contenu dans une image, l'analyse des données est faite à partir d'une population échantillon représentative. L'échantillonnage de la scène étudiée est un échantillonnage du type aléatoire systématique. L'effectif  $n$  de la population échantillon est déterminé par une relation fonction de la variance de la population totale et de la précision désirée.

La population échantillon est soumise à une classification automatique. Son but est de répartir à l'aide des critères de distance cette population en classes homogènes. La méthode utilisée est la méthode des centres mobiles.

Cette méthode permet de construire par itérations successives la partition d'une population quelconque en un nombre de classes choisies. La partition est réalisée en se fondant sur des critères de distance entre classes et entre individus (décomposition de la variance). La figure 5 montre les trois phases de l'algorithme des centres mobiles et son résultat pour une population donnée.

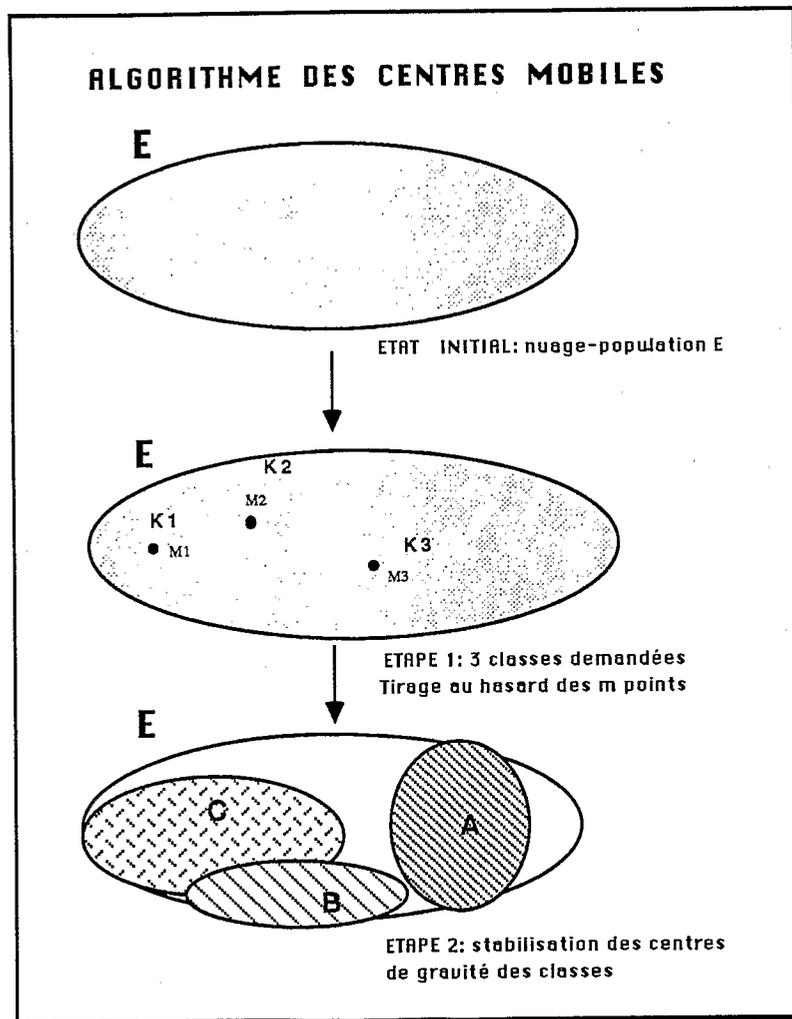


Figure 5 - Les 3 phases de l'algorithme des centres mobiles (MALEK, 1989)

L'utilisation de la classification en centres mobiles doit comporter un critère d'arrêt pour répondre aux exigences de fiabilité et d'efficacité énoncées plus haut. En effet en théorie le nombre de partitions qui peut être appliqué à une population échantillon est égal au nombre d'individus -1. La détermination du nombre maximum de classes au sein d'une population est un problème complexe. La détermination de ce critère d'arrêt peut reposer soit sur des considérations statistiques ou mathématiques de stabilité maximale des classes, soit sur des critères thématiques liés à la connaissance du milieu (ne pas scinder de thèmes identifiés comme homogènes).

L'application d'une classification hiérarchique ascendante au centre de classes obtenues 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.

Cette étape aboutit après classification de l'image à une stratification de la scène et à une image classée. Chaque unité peut ensuite être subdivisée si nécessaire par une classification pyramidale que nous verrons ensuite.

Dans le cadre des études d'inventaire des ressources cette méthode de classification peut être utilisée en début d'étude pour obtenir une restitution cartographique avec les différentes unités mises ainsi en évidence et dont il convient de rechercher à posteriori la signification thématique. Ce document est alors utilisé pour l'implantation des sites tests et l'étude de terrain. Il peut aussi servir de validation en fin d'étude dans le cas d'une approche analytique (démarche dirigée).

- Etape 2- Constitution de l'image multirates (Figure 6)

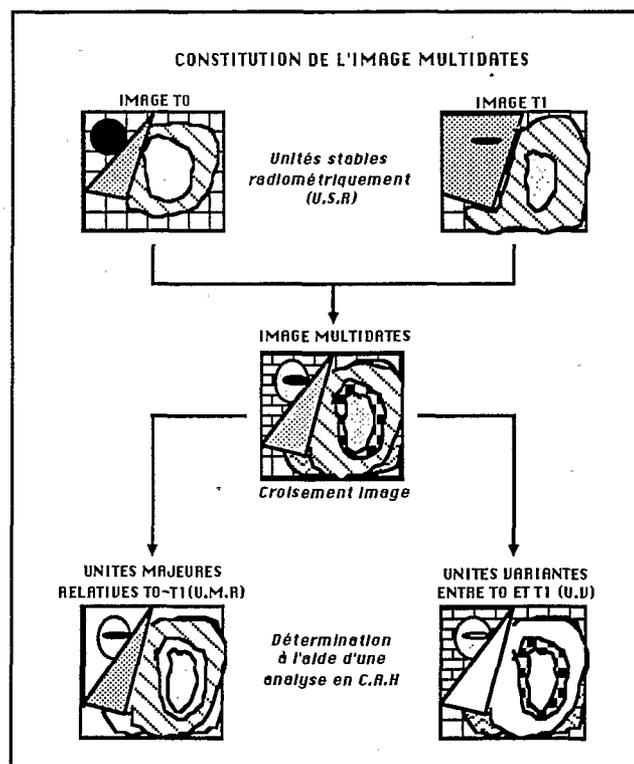


Figure 6 - Constitution de l'image multirates (MALEK, 1989)

Concrètement la construction d'une image des dynamiques du paysage se fait en superposant les deux images classées aux dates retenues. L'image générée contient toutes les unités multidates et mélange deux grands ensembles d'unités selon leur stabilité thématique:

\*Une unité qui, entre deux dates, ne varie pas thématiquement mais uniquement en superficie, sera qualifiée d'**Unité Majeure Relative (U.M.R.)**

- Majeure parce qu'elle témoigne d'une permanence thématique entre les deux dates.
- Relative parce que cette permanence n'est valable que dans l'intervalle de temps étudié.

\*A l'inverse, toute unité générée par l'image multidate possédant une signification thématique différente aux deux dates est appelée **Unité Variante.(U.V.)**

L'ensemble des U.M.R. et des U.V. compose l'image multidate toute entière. Cette image multidate permet un diagnostic de l'évolution du paysage entre deux dates et son interprétation thématique.

- Etape 3- Classification pyramidale pour l'analyse des sous unités (Figure 7)

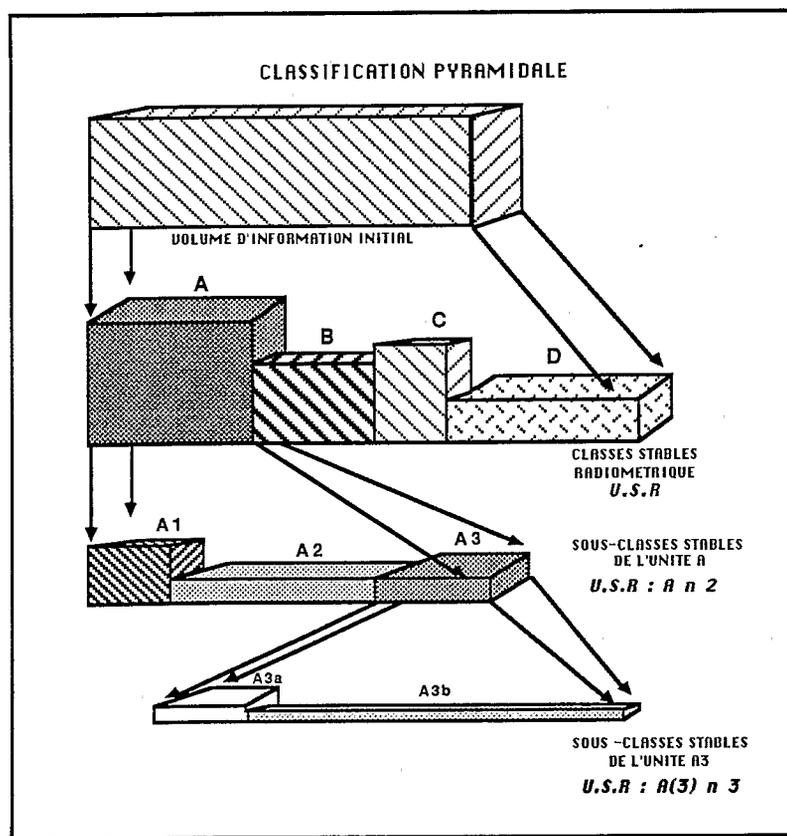


Figure 7 - Principe de la classification pyramidale (MALEK, 1989)

Les unités radiométriques stables sont quelquefois d'interprétation malaisée. Ces unités sont trop générales et n'apportent pas d'élément nouveau par rapport aux connaissances données par d'autres types d'analyse. Il est alors nécessaire de

scinder le volume information que possède ces classes en utilisant la même méthode de stratification en unités stables radiométriquement.

En appliquant le principe de la classification pyramidale aux unités radiométriques présentant des confusions, on réduit cette part d'erreur en discernant dans bien des cas les divers constituants de la classe qui s'individualise. Une classification issue de cette méthode produit un document fiable et exploitable pour comparer plus finement les données recueillies au sol à l'ensemble des classes radiométriques.

Cette approche en différents modules doit permettre d'obtenir à partir des données SPOT :

- un **diagnostic de l'évolution du paysage** entre deux dates, mettant en évidence la dynamique du paysage et des unités.
- une **stratification de l'espace** qui soit :
  - objective, sinon automatique
  - compatible avec la résolution spatiale du satellite
  - interprétable thématiquement

## B- APPLICATIONS

- **DEFINITION ET DETERMINATION DES UNITES DYNAMIQUES D'UN PAYSAGE SAHELIEU - MARE D'OURSU - BURKINA FASU (ANDRIANASOLO ET MALEK, 1988)**

Le bassin versant de la Mare d'Oursi est caractéristique des écosystèmes de mares sahéliennes, liées à la mise en place de grands cordons dunaires lors du quaternaire. Le climat est tropical semi-aride de type sahélien avec une pluviométrie moyenne annuelle de 400 mm concentrée en une courte saison de pluies estivales. La végétation qui présente une assez forte diversité à grande échelle se compose d'une strate arbustive très lâche d'arbres ou arbustes souvent épiphytes, et d'une strate herbacée éphémère constituée d'annuelles.

La détermination des dates d'étude prend en compte les facteurs climatiques et la phénologie de la végétation.

La date du 4 septembre 1986 se situe en fin de saison des pluies, date à laquelle la végétation chlorophyllienne est à son maximum. Il faut noter cependant, que la pluviométrie sur le bassin se révèle être très hétérogène sur des distances très rapprochées. La date du 17 décembre 1986 reflète des conditions générales de début de saison sèche. A cette période la végétation pérenne est sèche et les processus d'évaporation assèchent les mares et les bas-fonds humides.

La génération des classes de paysage pour les deux dates est réalisée suivant la démarche non supervisée et l'utilisation de la méthode des centres mobiles.

• Classes du paysage de l'image du 4 septembre 1986. La démarche ci-dessus exposée a généré 11 classes organisées en six ensembles, dont voici une première interprétation :

- *glacis*: avec végétation arborée (C1), colluvionnés (C3);
  - *roches sombres*: gabbros, buttes cuirassées, roches métamorphiques (C5);
  - *sables*: éoliens et arènes granitiques grossières et claires (C2), arènes granitiques glacées et épandages gravillonnaires latéritiques (C8), erg vif (C11);
  - *champs et végétation*: principalement sur piémonts sableux et le long des marigots (C6), sur cordons dunaires et arènes granitiques (C7);
  - *végétation dense et eau dominante*: avec moins d'eau (C4), avec plus d'eau (C9);
  - *végétation dense*: principalement dans les mares et les bas-fonds (C10).
- Classes du paysage sur l'image du 17 Décembre 1986 10 classes ont été générées organisées en cinq ensembles
- *glacis colluvionnés et bas-fonds argileux*: sans végétation chlorophyllienne active (C1), bas fond argileux avec végétation active (C8);
  - *classe sombre*: zone de retrait des eaux de la mare (C3), roches sombres et argiles de bas-fonds saturées en eau (C6);
  - *sables*: sables éoliens avec légère couverture graminéenne sèche et arènes granitiques perméables ou claires (C2), arènes granitiques glacées ou dégradées (C5), cordons dunaires et champs dénudés (C7), erg vif (C9);
  - *végétation dense*: végétation dense de mare avec eau dominante (C4), végétation dense de mare (C10).

La constitution d'une image multidade aboutit à l'individualisation des unités majeures relatives et des unités variantes. Il existe **sept unités majeures relatives** dont l'ensemble de la superficie représente 45,4% de la scène étudiée (660,6 km<sup>2</sup>).

- erg vif (C1);
- sables dunaires et arènes granitiques grossières (C2);
- roches sombres et argiles de bas-fonds saturés en eau (C3);
- végétation dense de mare et eau dominante (C4);
- végétation dense de mare (C5);
- glacis colluvionnés (C6);
- arènes granitiques glacées en surface et épandages gravillonnaires latéritiques (C7).

Les **unités variantes**, où se produit une dynamique saisonnière entre les deux dates considérées, sont essentiellement les zones de glacié siège d'une forte redistribution des eaux de surface et les zones sableuses peu couvertes où la couverture végétale varie beaucoup en fonction de la saison (localement zone de culture).

Cet exemple montre l'apport des données satellitaires pour l'établissement d'un diagnostic dynamique du paysage

La classification obtenue a évidemment fait l'objet de vérifications précises à la fois à partir de cartes établies et de vérités terrain effectuées durant les passages du satellite en 1986. La confrontation avec les cartes de géomorphologie dynamique et l'esquisse pédologique réalisées toutes deux à l'échelle du 1:50.000 montre une concordance très grande pour les faits permanents. La vérification, sur le terrain, des unités dynamiques du paysage sur l'image multitudes résultante a mis en évidence que des phénomènes, à peine perceptibles ou de façon très masquées au sol, sont caractérisés très nettement sur l'image multitudes.

• **ETUDE DIACHRONIQUE POUR 2 PRISES DE VUE (10/4/87 ET 30/11/87) :  
ETUDE DE CAS EN EGYPTE.**

La situation est celle évoquée au paragraphe I-A. L'analyse a été réalisée à partir des données numériques avec découpage d'histogrammes bidimensionnels de néocanaux (indices de végétation, et de brillance) correspondant aux deux dates

Les changements intervenus en l'espace de ces 8 mois mettent en évidence certains processus caractéristiques du fonctionnement saisonnier des écosystèmes soumis à l'action humaine.

**1- Variation du cycle hydrologique**

Sur l'image d'avril les zones inondées se caractérisent par un indice de brillance IB très faible car les luminances sont peu élevées dans tous les canaux et surtout le canal XS3 Proche Infra Rouge. Par contre, sur l'image de novembre l'indice de brillance peut augmenter considérablement en relation avec la fin de l'inondation et le dessèchement du sol en surface avec l'apparition fréquente d'efflorescences salines. Il est alors facile de localiser, sur l'histogramme bidimensionnel construit avec les deux néocanaux correspondant aux indices de brillance d'avril et de novembre, les pixels concernés. Il est non moins facile de les localiser sur l'image.

De même, pour un sol limoneux à surface battante en avril l'indice de brillance a des valeurs élevées. Si la nappe phréatique remonte (effet des irrigations dans les zones voisines irriguées et si le drainage est insuffisant) la surface du sol devient humide avec des pseudosables (effet de la salinisation) l'indice de brillance diminue en relation avec des luminances nettement plus faibles dans tous les canaux. Là encore ce type de comportement se localise sur l'histogramme bidimensionnel et sur l'image. Il a ainsi été possible, entre Burg El Arab et Hammam, de mettre en évidence une zone de plusieurs dizaines d'ha qui, en l'espace de 8 mois, a été touchée par ce phénomène de salinisation lié à la remontée de la nappe phréatique.

## 2- Manifestation de l'érosion éolienne

Elle affecte les sols sableux labourés récemment (printemps 87) et souligne la différence de comportement des sols labourés en fonction de la texture de l'horizon de surface:

- diminution plus rapide de la rugosité dans les sols sableux avec l'aplanissement du labour,
- glaçage de la surface des mottes pour les sols limoneux qui conservent plus longtemps une certaine rugosité.

Ces changements soulignent aussi l'activité humaine (infrastructure routière, aménagements hydroagricoles, urbanisation, carrières, etc) et différents stades phénologiques de la végétation naturelle (tapis très dense de *Plantago albicans* en avril mais totalement absent en novembre) et des cultures irriguées, annuelles ou arbustives.

## CONCLUSION

En zones arides, comme d'ailleurs d'une façon générale, la Télédétection SPOT-TM apparaît peut-être davantage comme un outil de recherche, que comme un outil opérationnel pour le développement.

### 1- UN OUTIL DE RECHERCHE

Son apport n'est pas négligeable pour l'étude des régions arides tant du point de vue conceptuel que méthodologique:

#### - Apport conceptuel.

La Télédétection spatiale se révèle peu à peu comme un outil d'investigation susceptible de générer des relations scientifiques nouvelles. A la vision synoptique et à la vision diachronique, classiques avec MSS, s'ajoute une vision synchrone avec SPOT et TM. Elle permet de compléter un ensemble de relations très étroites terrain-image et de réaliser une analyse encore plus précise et répétée d'une même région. Ceci conduit à un autre moyen de compréhension des phénomènes spatiaux par le biais de leur dynamique spatio-temporelle. On passe d'une vision statique à une vision dynamique et plus globale des milieux.

En outre une plus grande importance est maintenant accordée à certains éléments du milieu tels que la surface du sol, ou plus précisément à des paramètres comme la rugosité, la couleur, la nature physico-chimique, l'état d'humidité, etc. Ces paramètres "apparaissent" très nettement sur les images et l'on découvre leurs relations avec les processus d'évolution des milieux induits par l'activité humaine.

Paradoxalement, cette génération de capteurs, encore plus performants, relance la nécessité d'effectuer sur le terrain des observations et des mesures, encore plus précises et toujours mieux localisées, selon des méthodes généralement

nouvelles qu'il faut mettre en oeuvre: observations détaillées de la surface (couvertures minérale et végétale), mesures radiométriques, etc.

#### - Apport méthodologique

Le renouvellement des méthodes d'inventaire des ressources renouvelables et des milieux en est un exemple. L'introduction d'une composante dynamique redonne un intérêt évident à ce type d'information.

Les données SPOT-TM permettent de débiter la mise en oeuvre de méthodes pour le suivi des milieux arides, en particulier avec une première étape concernant la détection des changements.

Il reste nécessaire de développer de nouveaux champs de recherche relatifs à la Télédétection dans l'optique d'une certaine opérationnalité de l'utilisation des données pour le suivi des milieux arides: reconnaissance de formes, automatisation des traitements, systèmes d'informations géographiques, etc.

## 2 - CE N'EST PAS ENCORE UN OUTIL OPERATIONNEL POUR LE DEVELOPPEMENT

En effet la mise en oeuvre pratique de l'utilisation de SPOT se heurte à de nombreux problèmes parmi lesquels nous ne retiendrons que ceux qui nous concernent davantage en tant qu'utilisateurs thématiques:

- Nécessité de formuler en termes de données satellitaires les besoins en information. Il faut pour cela une bonne compréhension des besoins ainsi qu'une bonne connaissance de ce que ces données représentent et des appareils qui en permettent l'acquisition.
- Une fois les données acquises nécessité de les traiter, de les analyser de façon à extraire l'information demandée.

Il est important que les utilisateurs fassent l'investissement nécessaire pour connaître les principes et les méthodes de travail de la télédétection spatiale. Ceci devrait être un objectif pour les prochaines années. Ce serait aussi un bon investissement pour aborder les nouveaux enjeux liés à l'implantation et au développement de la Télédétection dans les régions arides d'Afrique et d'Amérique latine.

## 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.
- BREIMER (R.), 1985.- Soil and landscape survey of the Mapimi Biosphere Reserve. DGO-Mexico UNESCO 128p. + 1 carte au 1/100 000
- CORNET (A.), POUGET (M.), DELHOUME (J.P.), and MONTANA (C.); 1988.- Ordination and Classification of Plant Communities in the Chihuahuan Desert: the use of Spot Data. Third International Rangeland Congress, Vigyan Bhavan, New Delhi, November 7-11, 1988.
- COUREL (M.F.), 1983.- Etude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites. Thèse Doct. d'Etat, Paris I, 408 p. - annexes
- ESCADAFAL (R.), 1989.- Caractérisation de la surface des sols arides sur le terrain et par télédétection spatiale. Application à la région de Tataouine ( Sud tunisien). Etudes et Thèses ORSTOM, 317 p.
- LONG (G.), 1974.- Diagnostic phytoécologique et aménagement du territoire. Tome I : Principes généraux et méthodes, 256 p. et Tome II : Application du diagnostic phytoécologique, 222 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.).
- Mc DANIEL (K.C.), HASS (H.H.), 1982.- Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 48, :p 441-445.
- MERING (C.), JACQUEMINET (C.), 1988 - Use of SPOT satellite images for inventory and follow-up of ligneous resources in the Sahel. Acts of the 22th ERIM Symposium on Remote Sensing of Environment, October 20-26, 1988, Abidjan, 15p.
- MONTANA (C.), 1987.- Las formaciones vegetales de la reserva de la Biosfera de Mapimi. Instituto de Ecologia/UNESCO, 52 p. + 1 carte au 1/100 000
- PONCET (Y.), 1985.- "Zones sensibles au Sahel" Document provisoire : 1. Travaux 1985, 136 p. multigr., cartes
- PONCET (Y.), 1986.- Images spatiales et paysages sahéliens. Travaux et Documents ORSTOM 230 p.
- 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.
- TUCKER (G.U.), VANPRAET (C.L.), BOERWINKEL (E.), GASTON (A.), 1983.- Satellite remote sensing of total dry-matter production in the Senegalese SAhel. Remote Sensing of Environment 13 : 416-474
- WALKER (A.S.), ROBINOVE (Ch.J.), 1981.- Annotated bibliography of Remote Sensing Methods for monitoring desertification. Geological Survey circular 851, pp. 1-25