

UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE
(PARIS VI)

UNIVERSITE NANCY I

UNIVERSITE DE FRANCHE-COMTE

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS-GRIGNON

ECOLE NATIONAL SUPERIEUR
AGRONOMIQUE DE RENNES

**D . E . A .
DE
PEDOLOGIE**

José L . GONZALEZ BARRIOS

CORRESPONDANCES ENTRE CARACTERES
DE SALINITE DU SOL ET LEUR EXPRESSION
SUR IMAGE SATELLITE SPOT :
exemple dans un bassin endoreique
de la reserve de Mapimi (Mexique)

SEPTEMBRE 1988

UNITE DE TELEDETECTION
LABORATOIRE D'INFORMATIQUE APPLIQUEE
CENTRE ORSTOM - BONDY

AVANT - PROPOS

Je tiens ici à remercier tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

- Mr. M. POUGET, qui a suivi mon travail avec attention, et m'a guidé avec patience. Ma reconnaissance et gratitude.

- Mr. A. CORNET, qui non seulement a apporté de nombreuses idées mais également m'a accueilli chaleureusement et encouragé.

- Mr. J.P. DELHOUME, qui m'a fait parvenir depuis le Mexique les documents nécessaires pour ce travail.

- Mr. ROUX qui m'a conseillé dans la partie de traitement de données.

- Toute l'équipe de l'unité de télédétection du centre ORSTOM - Bondy, particulièrement MM. AING et RANNOU qui ont élaboré les documents de support photographiques.

- Enfin, V. BARAHONA et Mme. ZURETI qui m'ont aidé pour achever et mettre en forme ce rapport.

RESUME

Notre étude concerne l'aval d'un bassin endoréique en milieu aride où l'on a étudié, pendant la saison sèche 1984, la salinité du sol sur 143 sites en se basant essentiellement sur des profils de conductivité électrique.

Nous avons recherché les correspondances qui peuvent exister entre ces caractères de salinité et leur expression sur une image SPOT acquise deux ans plus tard pendant cette même saison sèche.

Dans une première étape on a complété la caractérisation analytique en prenant en compte l'environnement immédiat des sites pour mettre en évidence les paramètres d'état de surface susceptibles d'être perçus par le satellite. On définit ainsi 9 états de surface en relation avec la situation géomorphologique, le recouvrement végétal et le groupement de similitude floristique. Il n'y a cependant pas de relations biunivoques salinité-état de surface.

L'analyse de l'image SPOT permet d'individualiser un certain nombre d'entités spatiales. L'étude de la distribution des sites dans ces unités montre que là aussi il n'y a pas de relation biunivoque avec les types de salinité. Seules les surfaces minérales à efflorescences salines semblent présenter une signature spectrale spécifique.

On conclue qu'une étude multitemporelle serait nécessaire pour caractériser la salinité qui est essentiellement un phénomène très dynamique.

Des propositions sont formulées pour envisager une étude plus pertinente de cette salinité qu'il conviendrait de définir d'une façon plus précise, particulièrement les états de surface et leur évolution dans le temps.

SUMMARY

Our study concerns the bottom of a endoreic bassin in the arid zone. We have studied the soil salinity in the dry season (1984) by profils of electrical conductivity over 143 sites.

We have searched the correspondances that might exist between salinity characteristics and the 1986 SPOT's image features of the same season.

In a first part, we have completed the analytical characterization of the soil salinity by considering the site's immediate surrounding in order to characterise the "surface's state". It might be discerned by the satellite. Therefore, we have defined 9 "surface's states" that are related with the geomorphologic situation, the plant cover and the group of similarity floristic.

We have found no biunivocal relations between soil salinity and "surface's state".

In a second part, the analysis of the SPOT image have helped to separate the spacial entities. The study of site's distribution into these entities has shown that there is no biunivocal relations between entities and soil salinity. Only the "minerals surfaces" with salins efflorescences seem to present a specific spectral signature.

These statements make us conclude that a multidade study would be necessary for a better characterization of soil salinity because of the importance of its dynamics.

Propositions are made in order to undertake a more pertinent study of the soil salinity for wich a more precise definition would be convenient and this mostly for the "surface's state" and their evolution along the time.

SOMMAIRE

INTRODUCTION

Chapitre I PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

1. Localisation géographique et climat
2. Les grandes unités de paysages

Chapitre II LES TECHNIQUES ET LES METHODES UTILISEES

1. L'information terrain
 - 1.1. Analyse de sols au laboratoire
 - 1.2. Les états de surface.
2. L'information satellite
 - 2.1 Traitements photochimiques et analyse visuelle de la composition colorée
 - 2.2. Analyse numérique
 - 2.2.1. Analyse radiométrique des sites
 - 2.2.2. Classification de l'image

Chapitre III CARACTERISATION DE LA SALINITE DES SOLS.

1. Caractérisation analytique
 - 1.1. Profils de conductivité électrique
 - 1.2. Profils de teneur en gypse
 - 1.3. Indicateur de sodicité
2. L'environnement des sites: les états de surface
 - 2.1. Organisation de l'information état de surface
 - 2.1.1. Localisation du site dans le paysage
 - 2.1.2. La couverture végétale
 - 2.1.3. La surface du sol
 - 2.2 Analyse du tableau sites/états de surface

**Chapitre IV EXPRESSION DES CARACTERES DE SALINITE
SUR L'IMAGE SPOT**

- 1. Analyse radiométrique des sites**
- 2. Classification de l'image SPOT**
- 3. Les relations états de surface/classes
radiométriques/isophènes au niveau des sites**

Chapitre V DISCUSSION ET CONCLUSION

PERSPECTIVES

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Ce sujet s'insère dans le cadre du projet ORSTOM - Institut d'Ecologie de México intitulé "Etude intégrée des ressources en végétation, eau et sol dans la réserve de la biosphère de Mapimi" (Mexique).

Il s'agit de la continuation, sous l'aspect Télédétection, d'une étude réalisée voici quatre ans dans la partie la plus basse de la réserve. Au cours de la saison sèche 1984 la salinité de sols a été en effet étudiée par des observations de terrain et par l'analyse au laboratoire de très nombreux échantillons (GONZALEZ BARRIOS, 1986). Le principal résultat de l'étude est une caractérisation de la salinité par la mise en évidence de types (15) de profils de conductivité électrique. Il est probable que la salinité se manifeste aussi par des aspects de surface, peut être spécifiques, qui peuvent être enregistrés dans les images satellite.

Notre objectif est de rechercher les correspondances qui peuvent exister entre les caractères de salinité du sol et leur expression sur des images satellites.

La problématique générale sera donc:

- d'une part, d'établir des relations entre caractères de salinité du sol et "état de surface", l'état de surface étant "l'ensemble des caractères propres à la surface de la terre susceptibles d'être détectés depuis un satellite ou un avion" (KILIAN J. et BRUNEAU M., 1987).

- d'autre part d'établir des relations entre états de surface et image satellite.

- il sera alors possible de préciser les relations éventuelles entre caractères de salinité et image satellite.

La recherche de ces correspondances se fera au niveau de l'environnement immédiat du site, mais aussi au niveau de l'ensemble de la zone en étudiant la distribution des sites dans les entités spatiales mises en évidence par l'image satellite.

Notre étude comprendra les phases suivantes:

Après une présentation succincte de la zone d'étude, nous aborderons les techniques et les méthodes employées pour la collecte, le traitement, l'analyse et l'interprétation de deux types d'information dont nous disposons, l'information terrain et l'information satellite. Elles concernent la pédologie, le traitement de données et la Télédétection.

Puis nous étudierons comment caractériser la salinité des sols du point de vue analytique, mais surtout du point de vue "état de surface".

2

Finalement, l'analyse de l'image SPOT permettra d'effectuer une cartographie pour l'ensemble de la zone d'entités spatiales (isophènes, classes radiométriques) dont on interprétera la signification thématique et dans lesquelles on replacera les sites pour analyser les relations entre états de surface définies précédemment et les unités spatiales révélés par le satellite.

e

Chapitre I

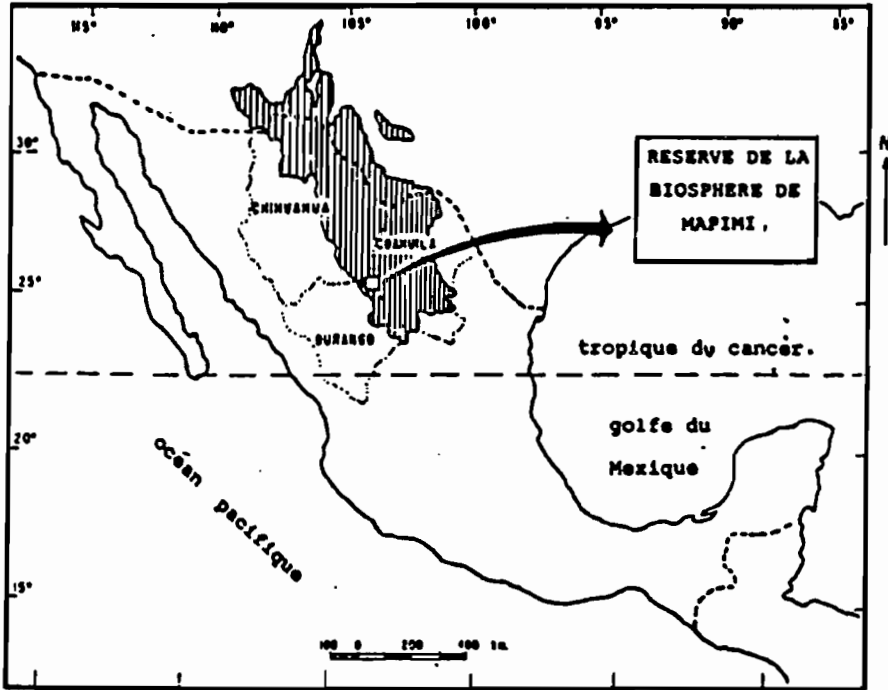


figure 1 localisation géographique de la réserve de la biosphère de mapimi

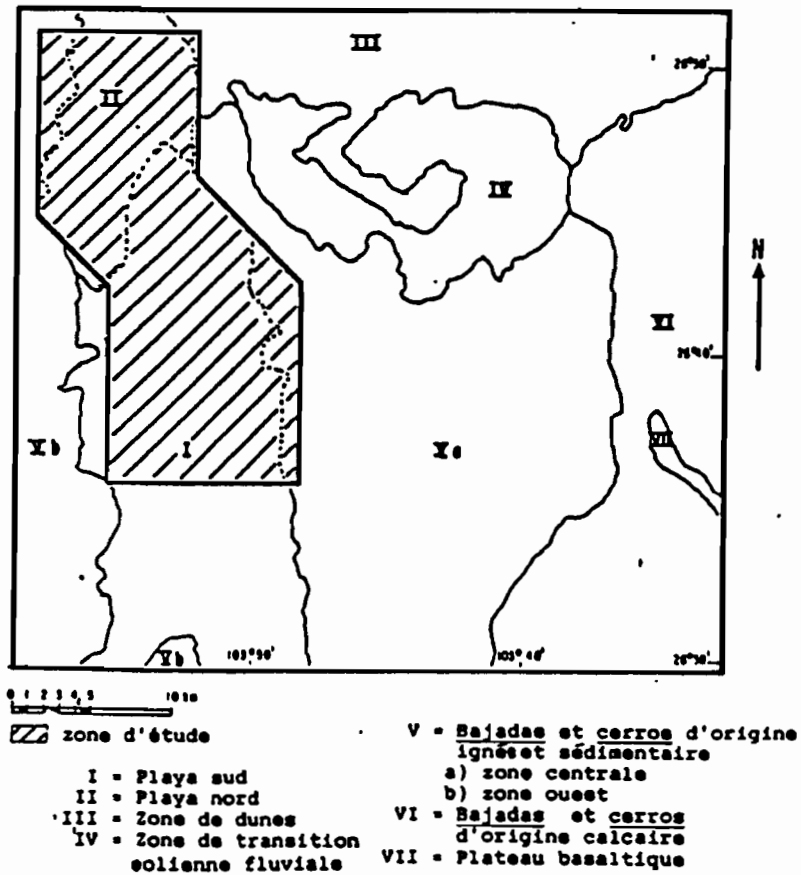


figure 2 localisation de la zone d'étude dans la réserve de la biosphère de mapimi

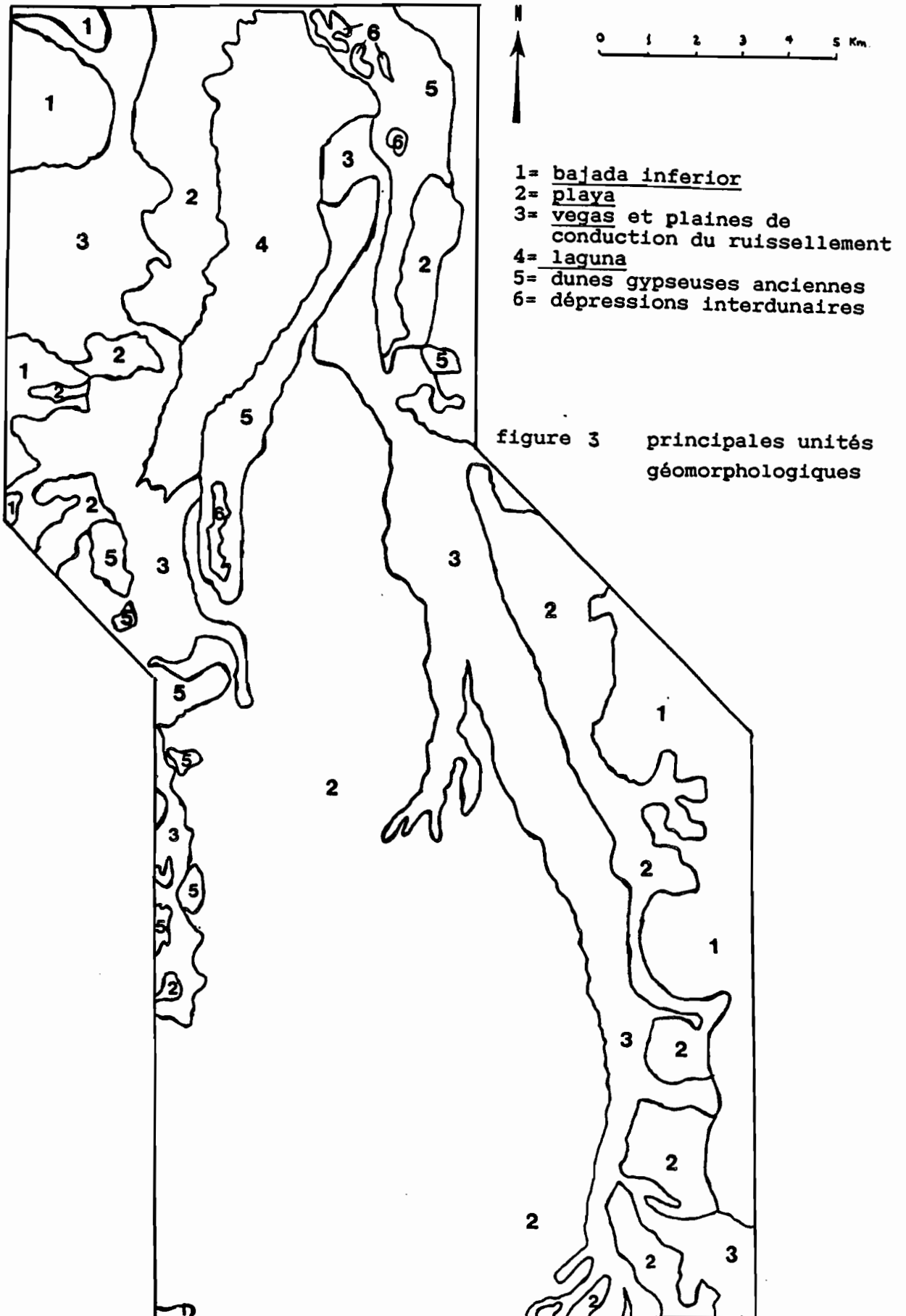


figure 3 principales unités géomorphologiques

Chapitre I PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

1. Localisation géographique et climat

La zone d'étude se localise dans la réserve de la biosphère de Mapimi au Nord du Mexique (fig. 1). Elle constitue la partie aval d'un bassin endoréique et s'étend sur environ 33000 ha.; l'altitude étant comprise entre 1130 et 1100 mètres.

Le climat de type aride et continental, se caractérise par une saison des pluies estivale (juin à septembre) et par une saison hivernale fraîche et sèche. (CORNET, 1984) La pluviométrie et la température annuelles moyennes sont respectivement de 272 mm/an et 20,6 °C

2. Les grandes unités de paysages

La figure 2 montre les grandes unités du paysage de la réserve de la biosphère de Mapimi (MONTANA C. et BREIMER R., 1981) et la situation particulière de la zone d'étude qui correspond essentiellement aux unités I et II, très marginalement les unités III, Va et Vb:

- Unité I et II: reliefs plats (pente plus petite que 1%) dont l'origine est due à l'accumulation de sédiments alluviaux. La végétation y est formée de steppes sub-arbustives à halophytes, les sols étant de texture argileuse ou limonoargileuse avec des teneurs en sels plus ou moins importantes (BREIMER R., 1985).

- Unité III: paysage éolien à relief dunaire avec des dépressions interdunaires.

- Unité V: paysage de cerros d'origine ignée et sédimentaire avec leur bajadas (piedmont plus glacis). La zone d'étude n'est concernée que par la partie inférieure des bajadas ou bajada inferior à pente faible (plus petite que 2%) avec des sols plus ou moins caillouteux et de texture limoneuse à argileuse. La végétation est souvent du type contractée, prenant l'aspect d'une "brousse tigrée". (CORNET A. et al., 1983; DELHOUME J.P., 1988)

Chapitre II

Chapitre II LES TECHNIQUES ET LES METHODES UTILISEES

Les techniques et les méthodes utilisées concernent la collecte, le traitement, l'analyse et l'interprétation de deux types d'information, l'information terrain et l'information satellite qu'il convient ensuite de comparer. (fig.4 schéma général de la démarche)

1. L'information terrain.

L'information terrain a été acquise pendant la saison sèche 1984 (Janvier à Mai). L'examen des photos aériennes à 1/25000 a permis le choix de sites représentatifs des six principales unités géomorphologiques (fig 3). L'estimation visuelle de la grandeur et de la variabilité de chaque unité a déterminé le nombre de sites, 143 au total.

Pour chacun des sites:

- Un prélèvement de sol à la tarière a été fait à six profondeurs systématiques:

0 - 15 cm	60 - 75 cm
20 - 35 cm	80 - 95 cm
40 - 55 cm	120 -150 cm

soit au total environ 850 échantillons pour l'analyse au laboratoire.

- Une description de l'environnement du site (50x50 = 2500 m²) a été effectuée et permet d'avoir une information sur les états de surface au moment de cette description.

SCHEMA GENERAL DE LA DEMARCHE

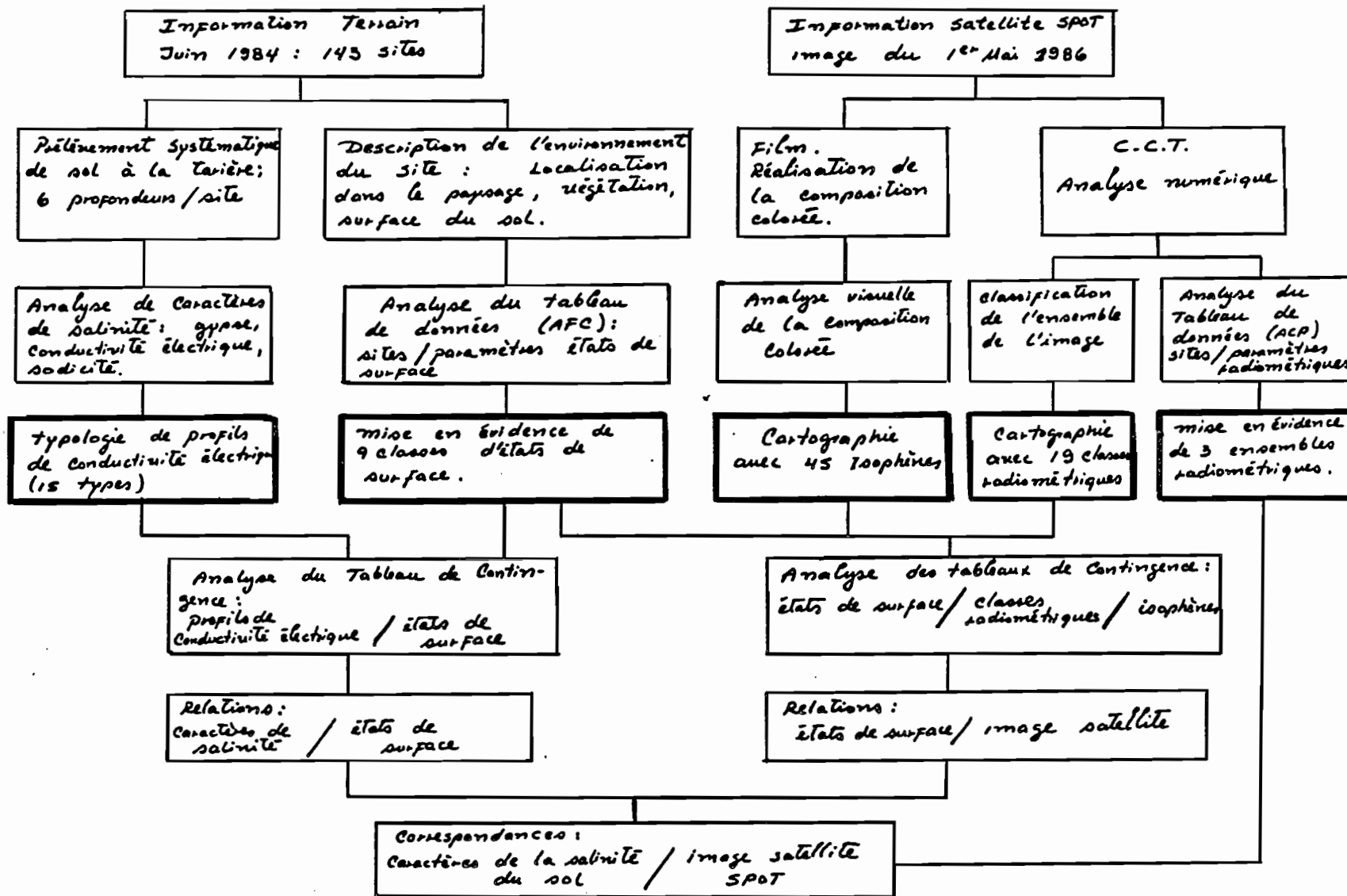


figure 4 schéma général de la démarche.

1.1. Analyses de sols au laboratoire

Sur chaque échantillon, il a été mesuré:

- la conductivité électrique (extrait de la pâte saturée à 25°C) pour déterminer le degré de salinité.

- le pH (rapport sol/eau = 1:2,5) pour avoir un indicateur de sodicité selon le seuil classique (8,5) cité par RICHARDS (1951).

- la teneur en gypse total par la méthode de différence de poids de NELSON.(1978)

L'analyse de ces trois paramètres analytiques (GONZALEZ BARRIOS op cit.) permet d'établir une typologie de profils de conductivité électrique, de teneur en gypse et d'indicateur de sodicité.

On obtient ainsi une première caractérisation analytique de la salinité des sols au niveau de chacun des sites.

1.2 Les états de surface

Toutes les données concernant la description de l'environnement des sites n'ont pu être retenues. Plusieurs critères ont guidé notre sélection compte tenu que les données SPOT disponibles, et que nous avons utilisées, sont de Mai 86, c'est à dire, deux ans après les observations de terrain soit à une même période de l'année, en fin de saison sèche.

- les données retenues sont des données stables dans le temps, par exemple la situation du site dans le paysage; les caractéristiques du micro-relief, le recouvrement de la végétation perenne (les espèces annuelles sont très peu importantes à cette période de l'année), etc.

- les données retenues doivent être pertinentes par rapport à l'information satellite, c'est à dire qu'elles doivent être susceptibles d'être détectées.

- Les données doivent avoir été relevées systématiquement sur tous les sites.

On retient ainsi trois ensembles de données caractérisant la localisation du site dans le paysage, la végétation et la surface du sol soit dix variables qualitatives avec pour chacune un certain nombre de modalités.

Il en résulte un tableau de données: sites/états de surface.

L'analyse du tableau par l'analyse factorielle de correspondance (AFC sur logiciel STATITCF) permet notamment:

- d'étudier la structure des variables c'est à dire les relations existants entre ces variables.

- et d'étudier surtout la répartition des individus (sites), c'est à dire de savoir comment ils se regroupent entre eux et quelles sont leurs relations avec les variables état de surface et avec les types de profil de conductivité électrique définis dans l'étape précédente et introduits dans l'AFC comme variables supplémentaires.

2. L'information satellite.

Nous avons pu disposer de données acquises par le satellite SPOT le 1er Mai 1986 en mode multispectral c'est à dire, avec les trois canaux:

XS 1	500 - 590 nm (vert)
XS 2	610 - 680 nm (rouge)
XS 3	790 - 890 nm (proche infra rouge)

La zone d'étude se situe sur une même orbite (trace) du satellite mais sur deux scènes: K= 595 J= 296 (Nord) et K= 595 J= 297 (Sud).

Les deux scènes ont donc été acquises le même jour (1er Mai 86) avec le même angle de visée soit une visée quasi verticale.

Nous disposons donc de deux scènes SPOT sous deux formes différentes:

- films négatif noir et blanc de chaque canal à l'échelle du 1/400 000
- bandes magnétiques (CCT).

2.1 Traitements photochimiques et analyse visuelle de la composition colorée.

A partir des films négatifs une composition colorée sur support papier à 1/50 000 a été réalisée au laboratoire de traitement photochimique pour MM AING et RANNOU. En réalité, il s'agit d'un assemblage de deux compositions colorées, correspondant aux scènes Nord et Sud, qui présentent une dynamique de couleurs comparable car elles ont été acquises le même jour par le même capteur HRV 1.

Nous avons ensuite fait une analyse visuelle de la composition colorée avec délimitation d'isophènes codées sur la base de la méthodologie proposée par DEWISPELAERE (1983) et BABIKER S.(1985). Chaque isophène est distinguée par un code à trois chiffres:

- le premier chiffre indique la teinte de la couleur dominante
- le second caractérise l'homogénéité ou l'hétérogénéité de la teinte en précisant le ou les teintes secondaires.
- Le troisième, caractérise l'organisation spatiale (texture et structure) à l'intérieur de l'isophène.

Il est possible d'interpréter ces isophènes, c'est à dire de leur donner une signification thématique en se basant:

- sur des clés d'interprétation dont certaines sont maintenant classiques pour les compositions colorées standard (couleur rouge liée à un couvert végétal actif, etc.)

- sur la connaissance du terrain. A ce sujet, le simple report des 143 sites échantillonnés avec l'indication de leur profil de conductivité électrique fournit un document intéressant pour visualiser une certaine expression de la salinité sur les images satellites. (planche hors texte)

De plus, il est possible d'établir le tableau de données: isophènes-états de surface. Comme nous le verrons l'analyse statistique de ce tableau n'est pas possible (problème d'échantillonnage).

2.2 Analyse numérique

Cette analyse a été effectuée au laboratoire de traitement informatique de l'unité de télédétection à l'aide du logiciel PLANETES (RAKOTO et al., 1988) sur station MATRA-SUN, vidéo restitution THETASCAN, etc.

Une première opération a été la création d'un fichier unique en assemblant la partie Nord (scène KJ 595 - 296) et la partie Sud (scène KJ 595 - 297). On a pu vérifier dans la zone de superposition que, pour un même pixel les valeurs radiométriques sont très légèrement différentes d'une scène à l'autre. Cette différence est trop faible pour être prise en compte, au moins dans le cadre de cette étude. Elle n'apparaît d'ailleurs pas visuellement dans la classification qui a été réalisée aussi bien sur l'écran que sur la restitution (cf. planche hors-texte).

L'analyse numérique a comporté deux démarches distinctes:

- l'analyse radiométrique des sites
- la classification de l'ensemble de la zone avec pour résultat une carte infographique des états de surface (classes radiométriques).

2.2.1 Analyse radiométrique des sites

Le repérage des sites sur l'image a constitué une première étape. Pour cela on a visualisé sur l'écran la composition colorée standard qui est évidemment très comparable à celle réalisée par procédés photochimiques à partir de films.

Chaque site est matérialisé par un ensemble de pixels, une vingtaine en moyenne, que l'on délimite avec un marqueur.

Le logiciel PLANETES permet d'effectuer des statistiques sur les valeurs radiométriques de cet ensemble de pixels et ceci pour chaque canal: minimum, maximum, moyenne, écart-type, etc.

Il peut s'agir des canaux d'origine XS1, XS2, XS3 ou de neocanaux. Ces neocanaux correspondent à des indices radiométriques calculés en combinant plusieurs canaux et en rééchantillonnant la dynamique pour se ramener à des valeurs comprises entre 0 et 255.

Nous avons utilisé deux indices très classiques en télédétection:

- L'indice de végétation (IV) = $(XS3 - XS2) / (XS2 + XS3)$ qui est en relation avec l'activité chlorophyllienne d'un couvert végétal. Plus la végétation est "active", c'est à dire verte, plus cet indice est élevé

- Un indice de brillance (IB) = $\sqrt{(XS1)^2 + (XS2)^2 + (XS3)^2}$ qui exprime la radiance totale émise dans les trois canaux. Plus les surfaces sont réfléchissantes dans ces trois canaux, sols nus clairs à surface battante par exemple, plus cet indice est élevé.

Chaque site est donc caractérisé par plusieurs paramètres radiométriques parmi lesquels nous avons retenu:

- 1M, 2M, 3M : moyenne des valeurs radiométriques dans les trois canaux : XS1, XS2, XS3.

- VM: moyenne des valeurs de l'indice de végétation.
BM et BV, respectivement moyenne et variance des valeurs de l'indice de brillance

On aboutit ainsi à un nouveau tableau de données avec ici des variables quantitatives, les paramètres radiométriques, que l'on peut étudier par une analyse en composantes principales (ACP). L'analyse de ce tableau devrait permettre d'apporter des éléments de réponse sur deux points (PHILIPPEAU G., 1986):

- Comment s'effectue le regroupement des sites et quelles sont leurs relations avec les paramètres radiométriques?.

- Existe-t-il des ensembles de sites ayant une signature spectrale spécifique et quelle est sa signification thématique?

Un autre résultat de l'analyse serait de préciser, au niveau de sites, les relations qui existent entre les variables c'est à dire les paramètres radiométriques.

2.2.2 Classification de l'image

Il est enfin possible d'effectuer une classification de l'image, c'est à dire de regrouper les pixels en classes en fonction de la ressemblance des valeurs radiométriques. Nous avons utilisé une classification de type supervisé nécessitant de choisir sur l'image des zones d'entraînement (training area). Pour cela on visualise sur l'écran la composition colorée standard dont toutes les nuances de teintes traduisent des différences radiométriques. On délimite des zones qui apparaissent homogènes par leur couleur et leur texture. On procède ensuite à un regroupement de ces zones pour définir des classes radiométriques caractérisées par:

- la moyenne des valeurs radiométriques dans chacun des canaux.
- l'écart-type

Le principe de cette classification supervisée est d'affecter chaque pixel de l'image à une classe k qui est la plus proche au sens de la distance de SEBESTEN $D(k)$ soit:

$$D(k) = \sum_{i=1}^h (x_i - m_{k,i}) / \sigma_{k,i}^2$$

où :

$D(k)$ = distance radiométrique du pixel à la classe k

x_i = valeur radiométrique du pixel dans le canal i

h = nombre de canaux pris en compte dans le calcul

$m_{k,i}$ = moyenne des valeurs radiométriques de la classe k dans le canal i .

$\sigma_{k,i}$ = écart type des valeurs radiométriques de la classe k dans le canal i

En définitive il s'agit d'une classification basée sur le critère de la distance minimale pondérée par l'inverse de l'écart type qui contribue à augmenter l'attraction des classes à forte variance.

Le résultat est une image à p classes radiométriques qu'il convient d'interpréter et sur laquelle on positionne les sites pour analyser visuellement leur distribution. Une analyse plus précise est possible au niveau des sites en étudiant comment se classent les pixels qui le composent (pourcentages de différentes classes par exemple). Ceci permet notamment une étude des relations avec les états de surface en analysant le tableau de contingence; classes radiométriques/états de surface.

Les techniques et les méthodes se réfèrent donc à trois domaines:

- la pédologie
- le traitement de données
- la télédétection

Chapitre III

Chapitre III CARACTERISATION DE LA SALINITE DES SOLS

1. Caractérisation analytique

1.1 Profils de conductivité électrique

On a reconnu 15 types de profils de conductivité électrique (GONZALEZ BARRIOS, 1986) qu'il est possible de regrouper dans cinq grandes familles d'après leur allure (figure 5a et 5b):

- verticale droite: C1, C2
- en échelon simple: C4; C5, C6, C7, C13
- en échelon multiple: C3, C8, C9, C11
- à ventre d'accumulation: C10, C12
- verticale descendante: C14, C15

Par ailleurs ces 15 types de profils peuvent être classés en fonction de leur degré de salinité en surface (0-30 cm) d'après les seuils classiques (RICHARDS, 1951) (tableau 1)

- non salins (inférieur à 4 ^{ms} ~~mm siemens~~/cm):
C1, C2, C3, C4, C5, C8
- peu salins (de 4 à 8 mm siemens/cm): C6, C9
- moyennement salins (de 8 à 16 ^{ms} ~~mm siemens~~/cm):
C7, C10
- fortement salins (de 16 à 32 ^{ms} ~~mm siemens~~/cm):
C11, C13, C15
- extrêmement salins (au delà de 32 ^{ms} ~~mm siemens~~/cm):
C12; C14

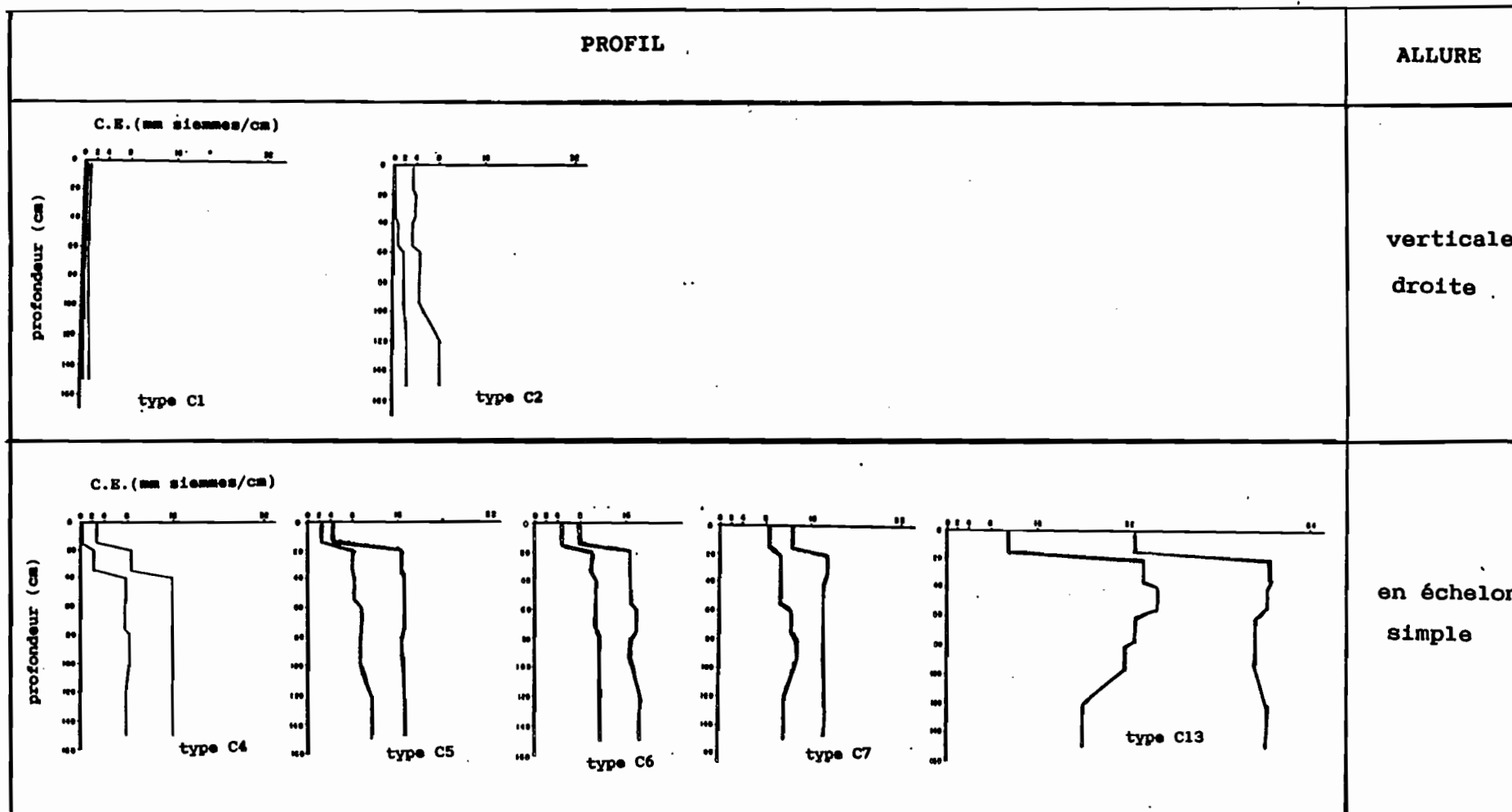


figure 5a typologie de profils de conductivité électrique (C.E.)

PROFIL

ALLURE

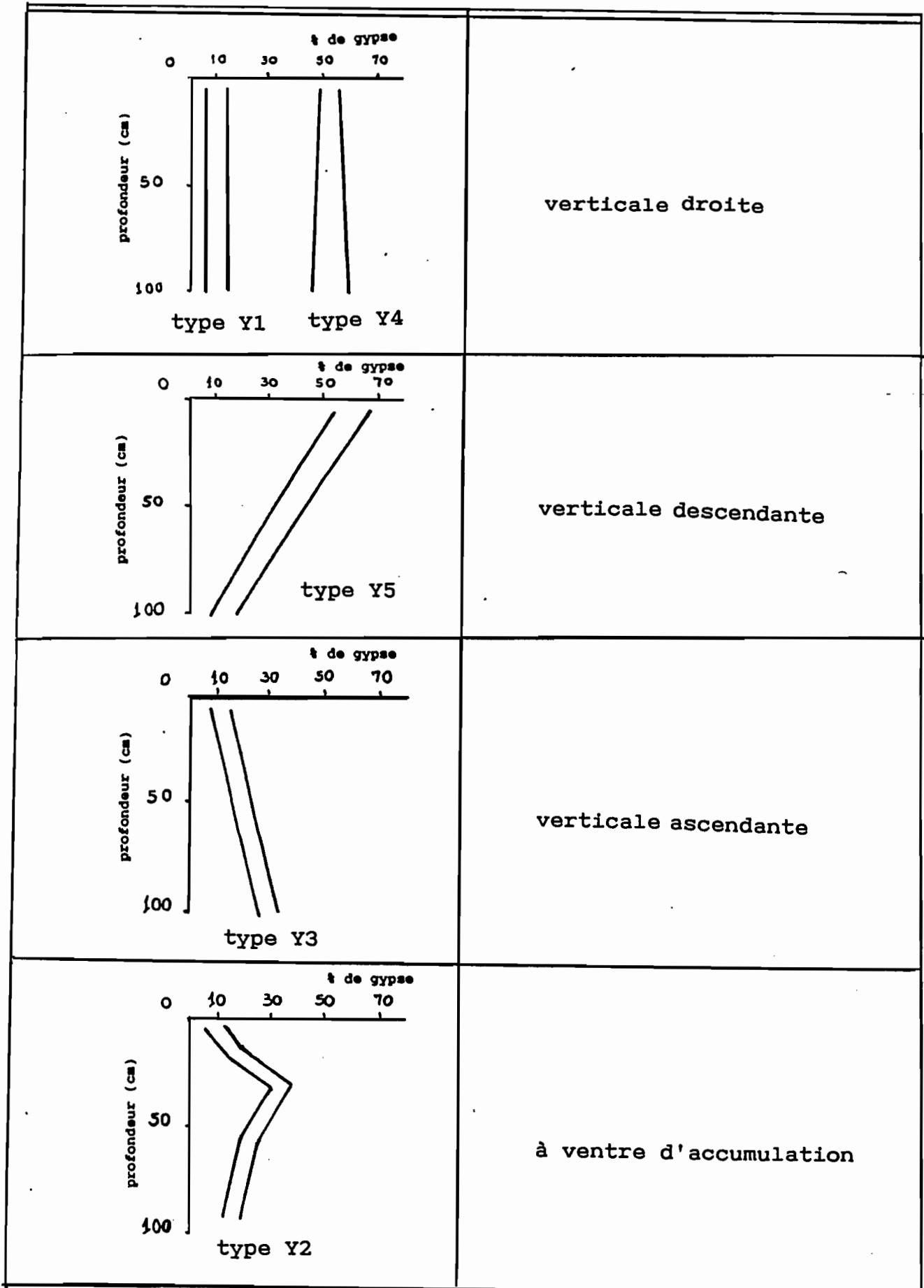


figure 6 typologie des profils de gypse

Conclusions

Du point de vue analytique la salinité se caractérise essentiellement par le type de profil de conductivité électrique modulé par la salinité de l'horizon de surface: au total 15 types repartis en 12 ensembles profils de conductivité électrique, salinité de surface.

La teneur en gypse permet d'individualiser 4 types de profils de teneur correspondant à des sols soit non ou peu gypseux en surface soit à des sols très gypseux.

2. L'environnement des sites : les états de surface

2.1 Organisation de l'information état de surface

Trois ensembles de paramètres permettent de prendre en compte "l'état de surface" au niveau de chaque site: la localisation dans le paysage, la couverture végétale et la surface du sol (POUGET et MULDER 1988).

2.1.1 Localisation du site dans le paysage

* Unité géomorphologique: 6 modalités (fig 3)

- U1= Bajada inferior

- U2= Playa, unité la plus importante en extension. Elle se présente comme une surface plane à pente très faible (inférieure à 0,5%). Planche I photo 1 et 2

- U3= Vega et plaines avec conduction du ruissellement. Il s'agit essentiellement d'un axe de drainage qui recoupe l'unité précédente pour déboucher au Nord dans la laguna

- U4= Laguna lac à submersion temporaire correspondant au niveau de base du bassin endoréique (planche II photo 3, planche III photo 5)

- U5= Dunes gypseuses anciennes en bordure Sud et Est de la laguna. Elles forment un cordon atteignant vingt mètres de hauteur et s'étirant d'une façon plus ou moins continue, sur une quinzaine de kilomètres de longueur pour une largeur moyenne de 500 mètres (dune de type "lunette", DELHOUME J.P. 1988)

- U6= Dépressions interdunaires: micro - bassins formés entre les dunes gypseuses anciennes

PLANCHE I



photo 1 Paysage de playa: formation à Hilaria mutica -
et Prosopis glandulosa (G8), taux de recouvrement
végétal R4 (25 à 50 %), distribution de la
végétation type F4



photo 2 Paysage de la playa: formation à Atriplex canescens
Hilaria mutica et Prosopis glandulosa (G7), taux de
recouvrement végétal R4 (25 à 50 %), distribution de
la végétation type F1

PLANCHE II



photo 3 vue générale de la laguna



photo 4 Végétation typique de solonchak: formation à Allenrolfea occidentalis (Gill). Noter les efflorescences salines en surface.

PLANCHE III

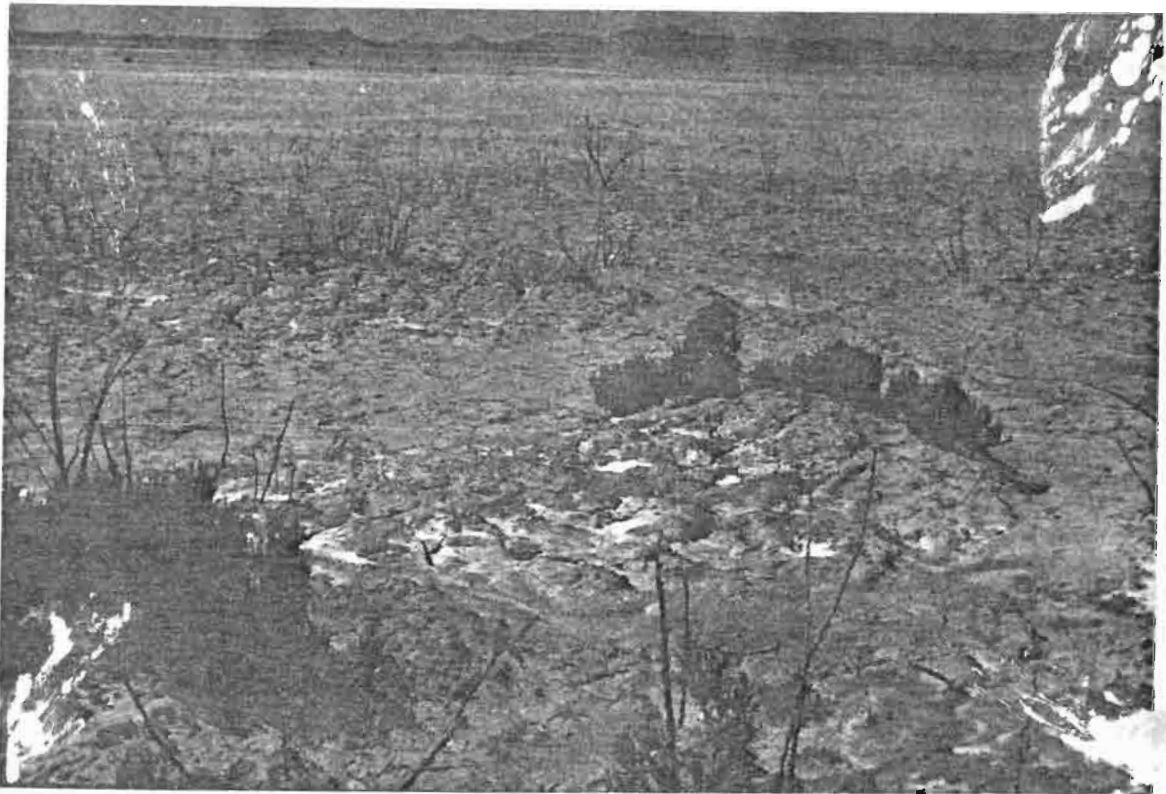


photo 5 Bordure de la laguna : formation très dégradée à Allenrolfea occidentalis (G11) avec efflorescences salines.



photo 6 Paysage de la playa: formation à Prosopis glandulosa (G6), taux de recouvrement végétal R1 (0 à 5 %) "peladero" distribution de la végétation type F1

* Emplacement du site sur l'unité géomorphologique
3 modalités:

- E1 = en amont
- E2 = au milieu
- E3 = en aval

* Pente = 3 modalités:

- P1 = < 2%
- P2 = 2 à 5%
- P3 = 5 à 15%

* Micro relief = 5 modalités: M1 à M5 (fig 7)

2.1.2 La couverture végétale

* Taux de recouvrement végétal = 5 modalités:

- R1= < 5% (planche III, photo 6)
- R2= 5 à 10%
- R3= 10 à 25%
- R4= 25 à 50% (planche I, photo 1 et 2)
- R5= > 50%

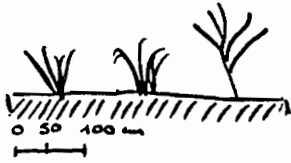
* Formes de distribution de la végétation = 5 modalités.

La figure 8 décrit les différentes formes F1 à F5; exemples sur les planches I (photo 1 et 2) et III (photo 6).

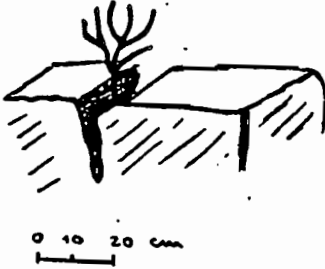
* Dimension de l'homogénéité dans la distribution de la végétation = 2 modalités:

- H1= métrique
- H2= décimétrique

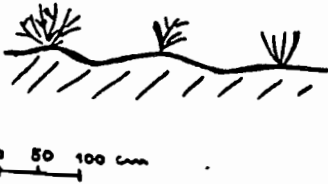
* Groupement de similitude floristique: onze modalités, résultant d'une étude en cours et qui met en évidence les relations type de profils de conductivité électrique/groupement de similitude floristique (CORNET A. et GONZALEZ BARRIOS, en préparation).



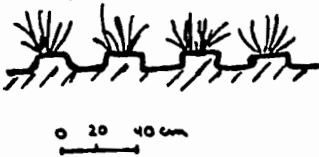
M1 = absence de micro-relief, surface plane



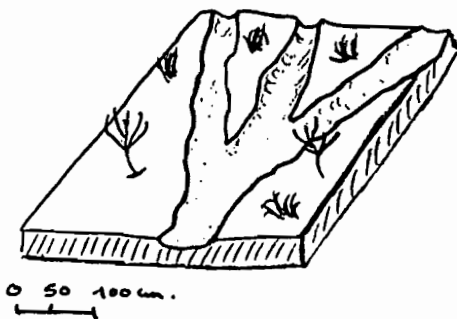
M2 = enfoncement décimétrique de la surface du sol, en lignes formant un réseau polygonal de 30 mètres de côté.



M3 = ondulé, décimétrique



M4 = à "tourador" ou crénelé centimétrique, au niveau de touffes de végétation



M5 = chenaux discontinus de profondeur centimétrique

figure 7 principaux types de micro-reliefs



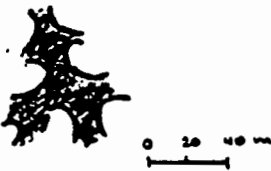
F1= individus isolés



F2= individus groupés en
"tâches" plus ou moins
circulaires (flots de végétation).



F3 = individus groupés en lignes
formant un reseau polygonal
de 30 à 40 mètres de côté



F4= individus groupés en
"tâches" anastomosées.



F5 = individus groupés en bandes allongées
plus ou moins anastomosées

figure 8 principales formes de distribution de la végétation.

espèce végétale	groupement de similitude floristique	modalités										
		G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	G11
<i>Allenrolfea occidentalis</i>				X								X
<i>Suaeda suffrutescens</i>											X	X
<i>Sesuvium verrucosum</i>												X
<i>Suaeda nigrescens</i>									X	X	X	
<i>Sporobolus airoides</i>				X		X	X	X		X	X	
<i>Prosopis glandulosa</i>		X	X	X		X	X	X	X	X		
<i>Hilaria mutica</i>		X		X		X	X	X	X			
<i>Atriplex acanthocarpa</i>				X	X	X	X				X	
<i>Atriplex canescens</i>		X	X	X			X					
<i>Sida leprosa</i>				X					X	X		
<i>Lycium berlandieri</i>			X		X							
<i>Larrea tridentata</i>		X	X	X								
<i>Haplopappus heterophyllus</i>		X	X	X								

Tableau 2: Les groupements de similitude floristique

Cette donnée est un très bon indicateur des conditions de milieu et prend indirectement en compte de nombreux facteurs qui influencent les luminances enregistrées par le satellite (nature et structure du couvert végétal, recouvrement, nature de la surface des sols, etc.)

2.1.3 La surface du sol

* Pierrosité:

- N1= Pierrosité nulle
- N2= Présence de cailloux

* Taux de recouvrement par la terre fine = 5 modalités redondantes avec R : de T1 à T5 (< 50%).

Des données telles que la couleur ne sont pas retenues car elles n'ont pas été notées d'une façon systématique ou d'une façon suffisamment précise.

2.2 Analyse du tableau : sites/état de surface

Le tableau analysé (AFC) comporte donc:

- 143 sites (individus).
- 10 variables qualitatives avec 47 modalités.
- 3 variables supplémentaires: profils de conductivité électrique, profil de teneur en gypse, indice de sodicité.

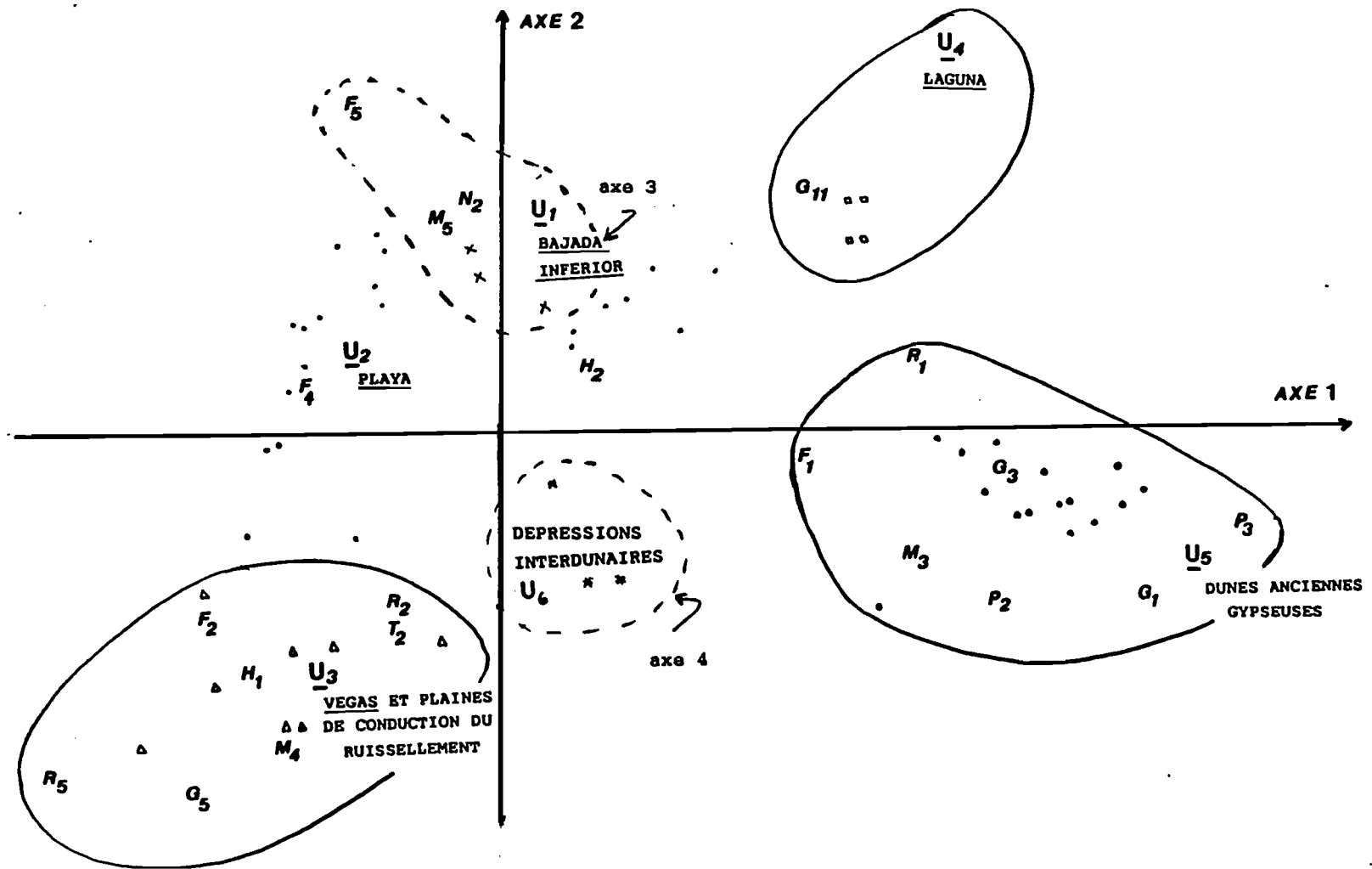


figure 9 carte factorielle: axe 1 et 2 (AFC total).
 Mise en evidence des ensembles de sites en fonction
 de leur état de surface

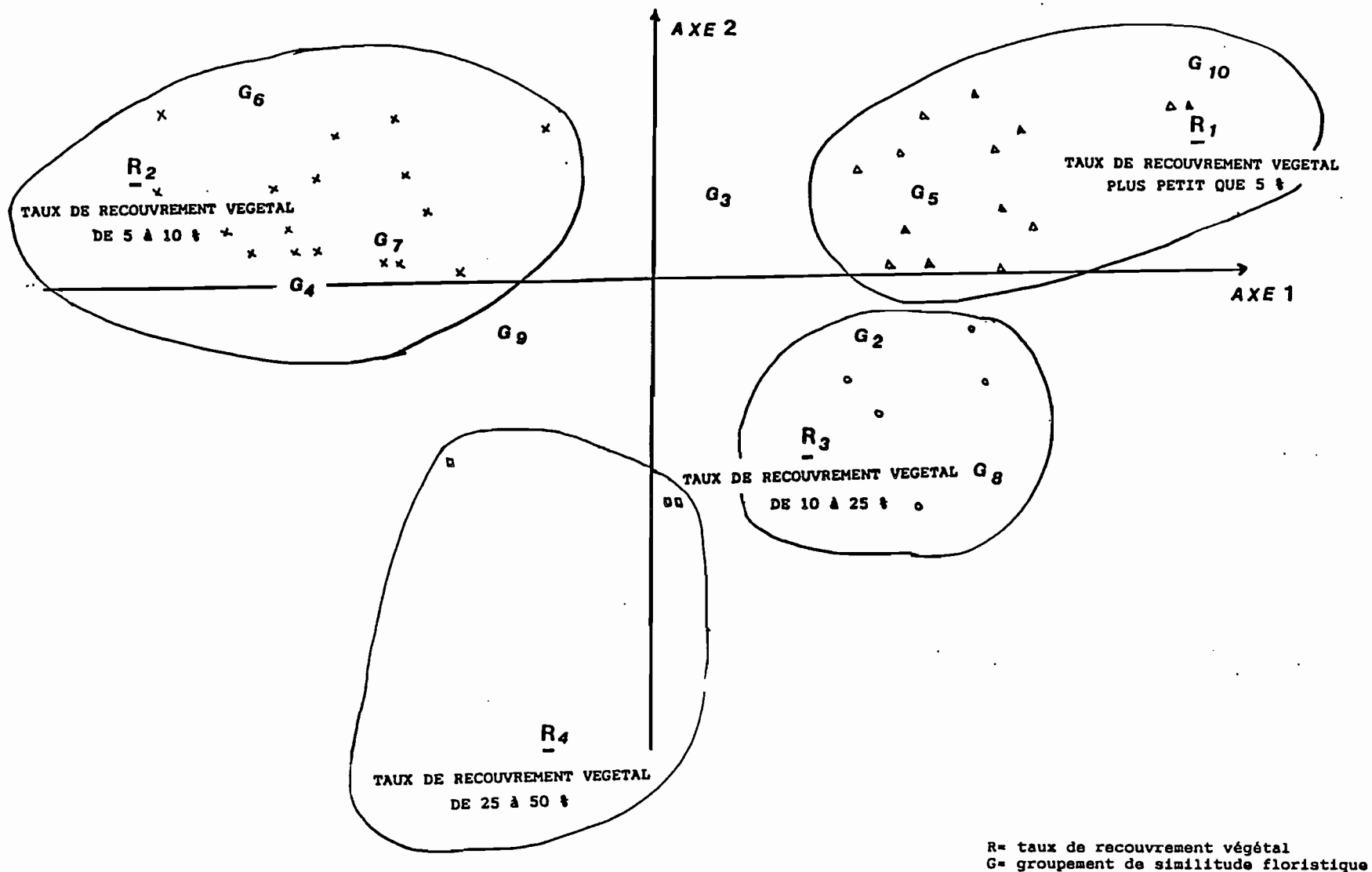


figure 10 carte factorielle: axe 1 et 2 (AFC playa)

		modalités des paramètres décrivant l'environnement aux sites																												
		Localisation dans le paysage										Couverture végétale										Surface du sol								
		U		E		P		M		G					R		F		H	N		T								
États de surface		1	2	3	4	5	6	1	2	3	1	2	3	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	1	2	3	4	5
AFC TOTAL	1	x							x	x	x	x	x	x										x		x	x	x		
	2		x						x	x	x	x			x	x	x	x						x	x	x	x	x	x	x
	3			x				x					x											x						
	4				x			x	x	x	x	x												x						
	5					x		x	x	x	x	x												x						
AFC PLAYA	6	x							x	x	x		x	x	x	x	x							x	x	x				
	7	x							x	x	x				x	x	x	x						x	x	x				
	8	x							x	x	x				x	x	x	x						x	x	x				
	9	x							x	x			x											x						

x = présence

figure 11 les 9 classes d'états de surface: tableau récapitulatif de leurs principales caractéristiques.

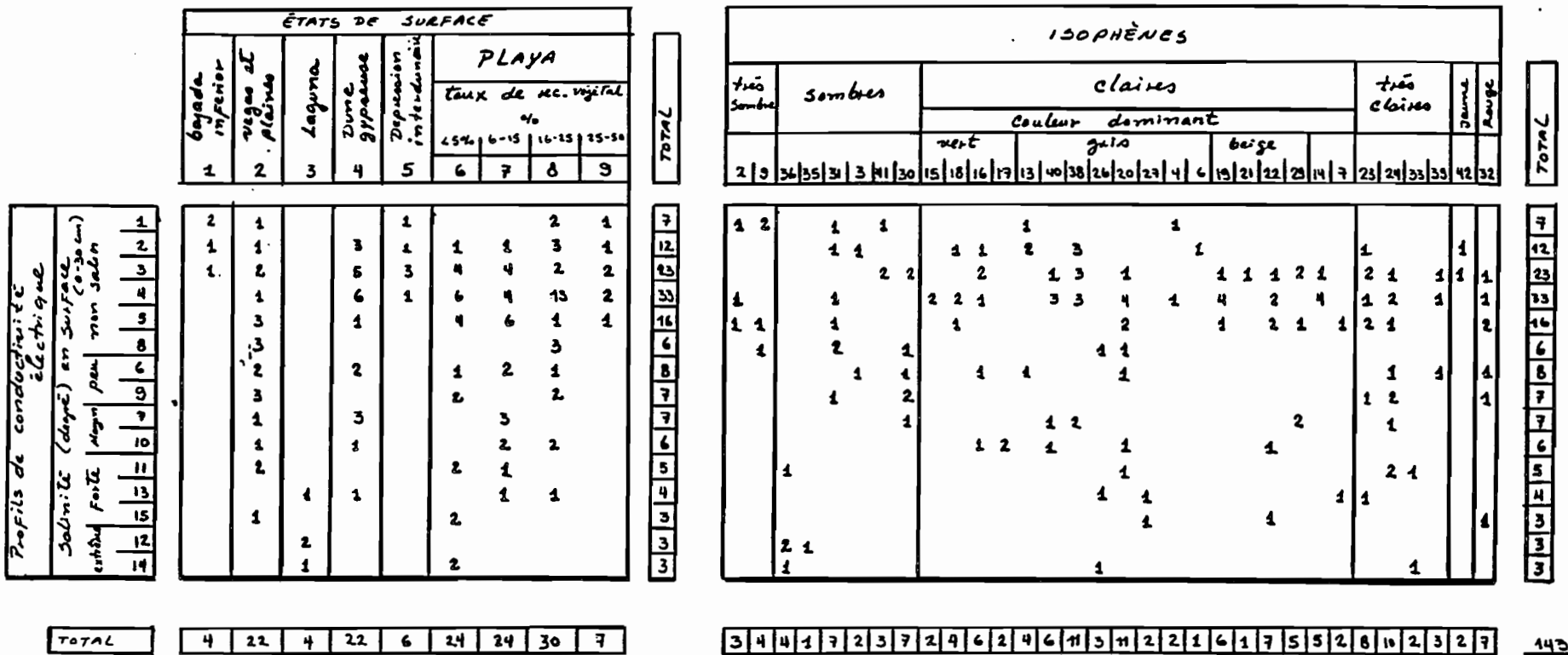


figure 12 tableaux de contingence :

- profils de conductivité électrique / états de surface
- profils de conductivité électrique / isophènes

Nous avons considéré pour chaque variable active: la contribution relative à l'inertie expliquée par l'axe, les coordonnées graphiques et leur qualité de représentation.

La carte factorielle: axes 1 et 2 (fig. 9) montre l'importance de la variable unité géomorphologique avec l'individualisation de 6 ensembles de sites:

- dunes anciennes gypseuses
- vegas et plaines de conduction du ruissellement
- laguna
- bajada inferior (axe 3)
- dépressions interdunaires (axe 4)
- et enfin un groupe de sites dont la plupart se localise dans la playa et que l'analyse ne permet pas de distinguer.

Il est nécessaire de refaire une analyse en ne considérant que les sites de la playa (fig. 10): 4 ensembles s'individualisent en fonction de la variable R (taux de recouvrement végétal) et de la variable G (groupement de similitude floristique).

La figure 11 présente sous forme de tableau récapitulatif les principales caractéristiques des 9 classes état de surface.

Conclusion

Le tableau de contingence (fig. 12) établi sur les bases de l'analyse précédente montre que:

- Aucun caractère analytique, profil de conductivité électrique et degré de salinité en surface n'apparaît spécifique d'une classe d'état de surface telle que nous les avons définies. Pratiquement cela signifie que l'on ne peut pas associer d'une façon biunivoque un profil de conductivité électrique à une unité géomorphologique ni à un taux de recouvrement végétal.

- Par contre certaines situations géomorphologiques sont associées à des groupes de profils de conductivité électrique différents mais présentant le même degré de salinité en surface. Ceci est le cas notamment pour les extrêmes: non salins en surface (bajada inferior, dépressions interdunaire, playa avec taux de recouvrement végétal > 25%) et extrêmement salins à fortement salins (laguna).

Il en est de même pour les profils de teneur en gypse, en particulier les sols très gypseux en surface, qui caractérisent deux unités geomorphologiques par ailleurs très distinctes: dunes gypseuses anciennes et laguna.

Chapitre IV

Chapitre IV EXPRESSION DES CARACTERES DE SALINITE SUR L'IMAGE SPOT

On envisagera successivement les deux niveaux:

- l'environnement immédiat des sites en recherchant s'il existe des regroupements possibles de sites en fonction de leurs caractéristiques radiométriques (analyse radiométrique des sites).

- la distribution des sites dans les entités spatiales mises en évidence sur l'image SPOT (classification de l'image et cartographie: classes radiométriques et isophènes).

1. Analyse radiométrique des sites

L'analyse en composantes principales (ACP) du tableau: sites/paramètres radiométriques (fig. 13) fournit deux ensembles de résultats:

* Concernant les paramètres radiométriques

- l'axe 1 explique 76,7% de la variance totale et matérialise la très forte corrélation des trois canaux SPOT et bien évidemment aussi de l'indice de brillance.

- l'axe 2, 16,2% de la variance totale, souligne l'importance au niveau des sites de l'hétérogénéité spatiale (texture) qui est prise en compte ici par la variance de l'indice de brillance.

- pour l'axe 3, 6,5% de la variance totale, c'est l'indice de végétation VM qui a très largement la plus forte contribution. Ceci indique la présence de végétation active sur un certain nombre de sites le 1er Mai 1986.

* Concernant la répartition des sites on distingue 3 ensembles correspondants aux 3 axes:

- un groupe de 109 sites repartis de part et d'autre de l'axe 1 depuis les faibles radiométries (valeurs négatives) jusqu'aux fortes radiométries (valeurs positives). Il s'agit en fait d'un axe de brillance allant des surfaces très sombres aux surfaces très claires.

1M = valeur moyenne, canal 1
 2M = valeur moyenne, canal 2
 3M = valeur moyenne, canal 3
 BM = valeur moyenne, indice de brillance
 BU = variance, indice de brillance
 UM = valeur moyenne, indice de végétation

DIAGONALISATION

1E LIGNE : VALEURS PROPRES (VARIANCES SUR LES AXES PRINCIPAUX)
 2E LIGNE : CONTRIBUTION A LA VARIATION TOTALE (POURCENTAGES EXPLIQUES PAR LES AXES PRINCIPAUX)

4.6046	0.9711	0.3887	0.0346	0.0009
76.7 %	16.2 %	6.5 %	0.6 %	0.0 %

ETUDE DES VARIABLES

CORRELATIONS

	1M	2M	3M	BM	UM	BU
1M	1.000					
2M	0.975	1.000				
3M	0.956	0.985	1.000			
BM	0.986	0.997	0.989	1.000		
UM	-0.779	-0.783	-0.668	-0.755	1.000	
BU	0.166	0.159	0.134	0.155	-0.192	1.000

1E COLONNE : CORRELATIONS ENTRE LES VARIABLES ET LES AXES PRINCIPAUX ✓
 2E COLONNE : CORRELATIONS AU CARRE

VARIABLES	COMPOSANTES PRINCIPALES									
	AXE 1		AXE 2		AXE 3		AXE 4		AXE 5	
1M **	0.9855	0.9713	0.0472	0.0022	-0.0516	0.0027	0.1555	0.0242	-0.0048	0.0000
2M **	0.9937	0.9875	0.0573	0.0033	-0.0663	0.0044	-0.0640	0.0041	0.0159	0.0003
3M **	0.9662	0.9335	0.0880	0.0077	-0.2289	0.0524	-0.0758	0.0057	-0.0213	0.0005
BM **	0.9917	0.9836	0.0636	0.0040	-0.1115	0.0124	0.0035	0.0000	0.0134	0.0002
UM **	-0.8270	0.6839	0.0544	0.0030	-0.5590	0.3125	0.0237	0.0006	0.0046	0.0000
BU **	0.2118	0.0449	-0.9751	0.9508	-0.0655	0.0043	-0.0015	0.0000	-0.0001	0.0000

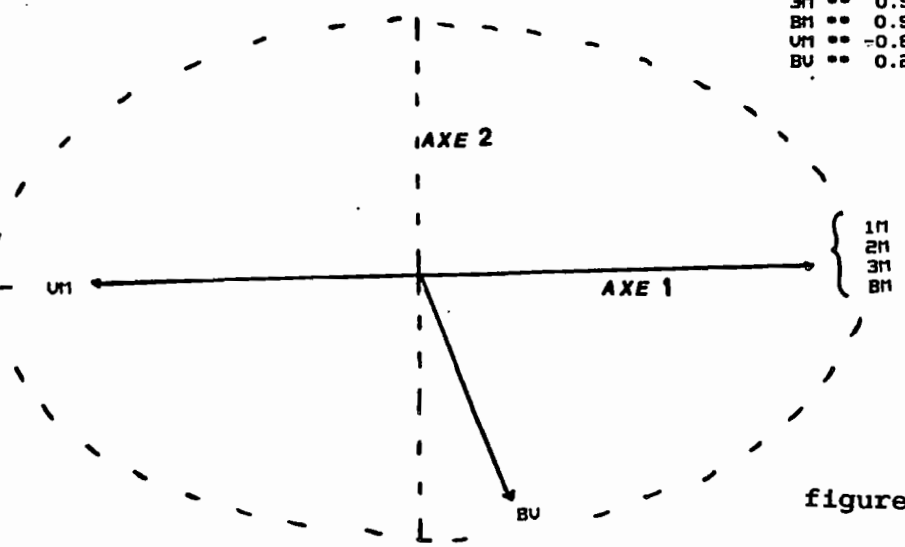


figure 43 cercle de corrélations: axes 1 et 2 (ACP sites-paramètres radiométriques)

- un groupe de 28 sites (axe 2) caractérisés par leur hétérogénéité radiométrique qu'il est difficile d'expliquer par la distribution de la végétation (variables F et H notamment).

- un groupe de 6 sites (axe 3) caractérisés vraisemblablement par une certaine activité de la végétation le 1er Mai 1986.

En définitive, au niveau des sites, il n'existe pas de signature spectrale particulière en relation avec la salinité.

2. Classification de l'image SPOT

- Analyse de la composition colorée (image-intérpretation)

La combinaison de 12 couleurs et de 7 types d'organisation spatiale conduisent à distinguer et cartographier 45 isophènes, dont 32 contiennent au moins un site (cf. annexes 1 et 2, et transparent de la planche hors-texte).

- Classification numérique de l'image (distance de SEBESTEN)

La classification a été initiée avec 19 classes radiométriques dont les centres sont reportés sur les histogrammes bidimensionnels XS1/XS2 et XS2/XS3 (fig. 14). On visualise sur l'écran le résultat de cette classification en affectant une couleur différente à chaque classe. Il a été nécessaire de regrouper certaines classes pour simplifier la carte des classes radiométriques (planche hors-texte), nous avons tenté une interprétation thématique.

On distingue plusieurs ensembles: (fig.14)

-classes 1 à 12: des surfaces très sombres aux surfaces très claires ceci correspond à l'axe "brillance" où les trois canaux sont très corrélés.

- classe 13 à 17: surfaces "rougeâtres" plus ou moins sombres. L'histogramme bidimensionnel XS1/XS2 (fig. 14) montre des valeurs radiométriques plus élevées dans le rouge (XS2) que dans le vert (XS1) et donc une couleur "rougeâtre" de la surface du sol (ESCADAFAL R et POUGET M., 1986)

- classe 18 : végétation active

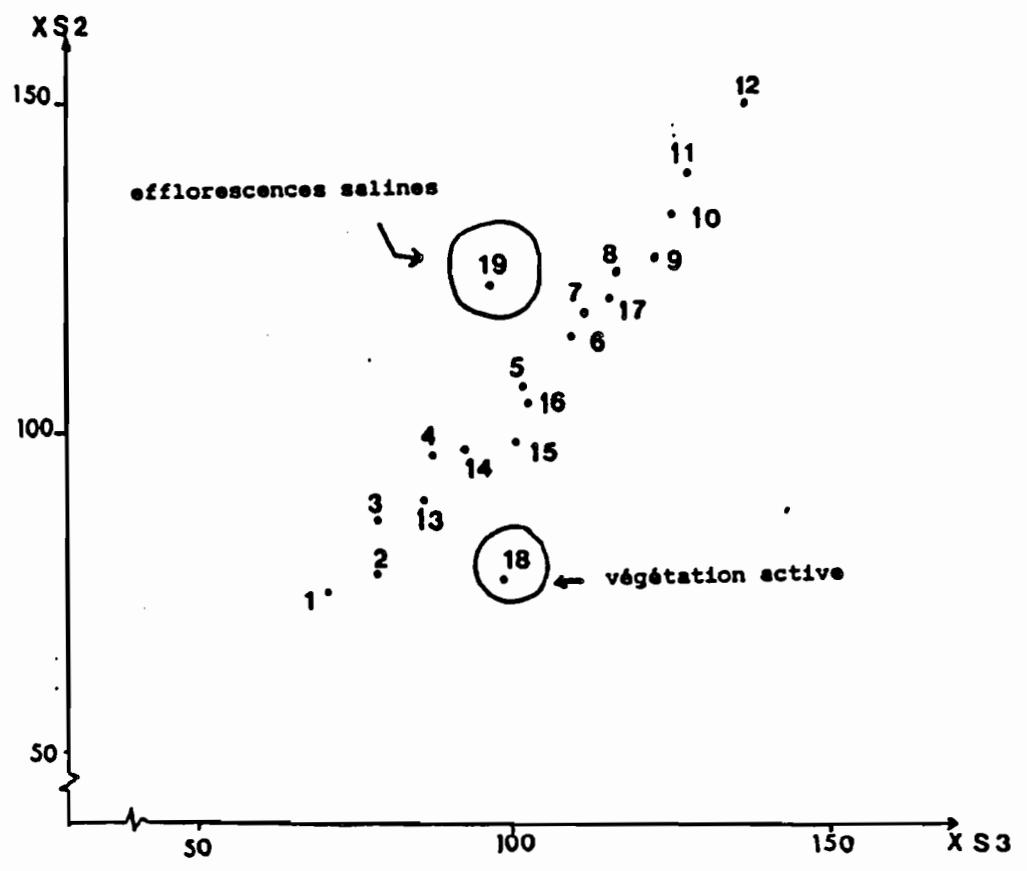
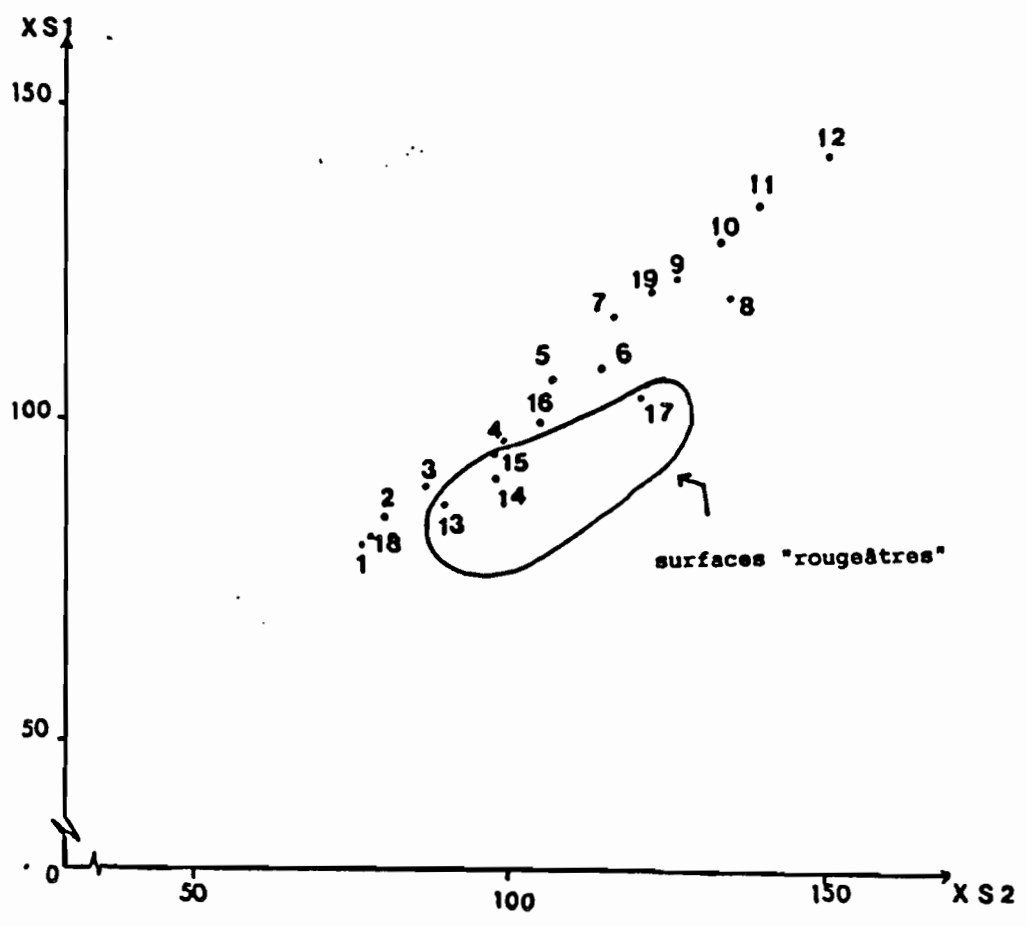


figure 14 situation des centres des classes radiométriques sur les histogrammes bidimensionnels XS1/XS2 et XS2/XS3.

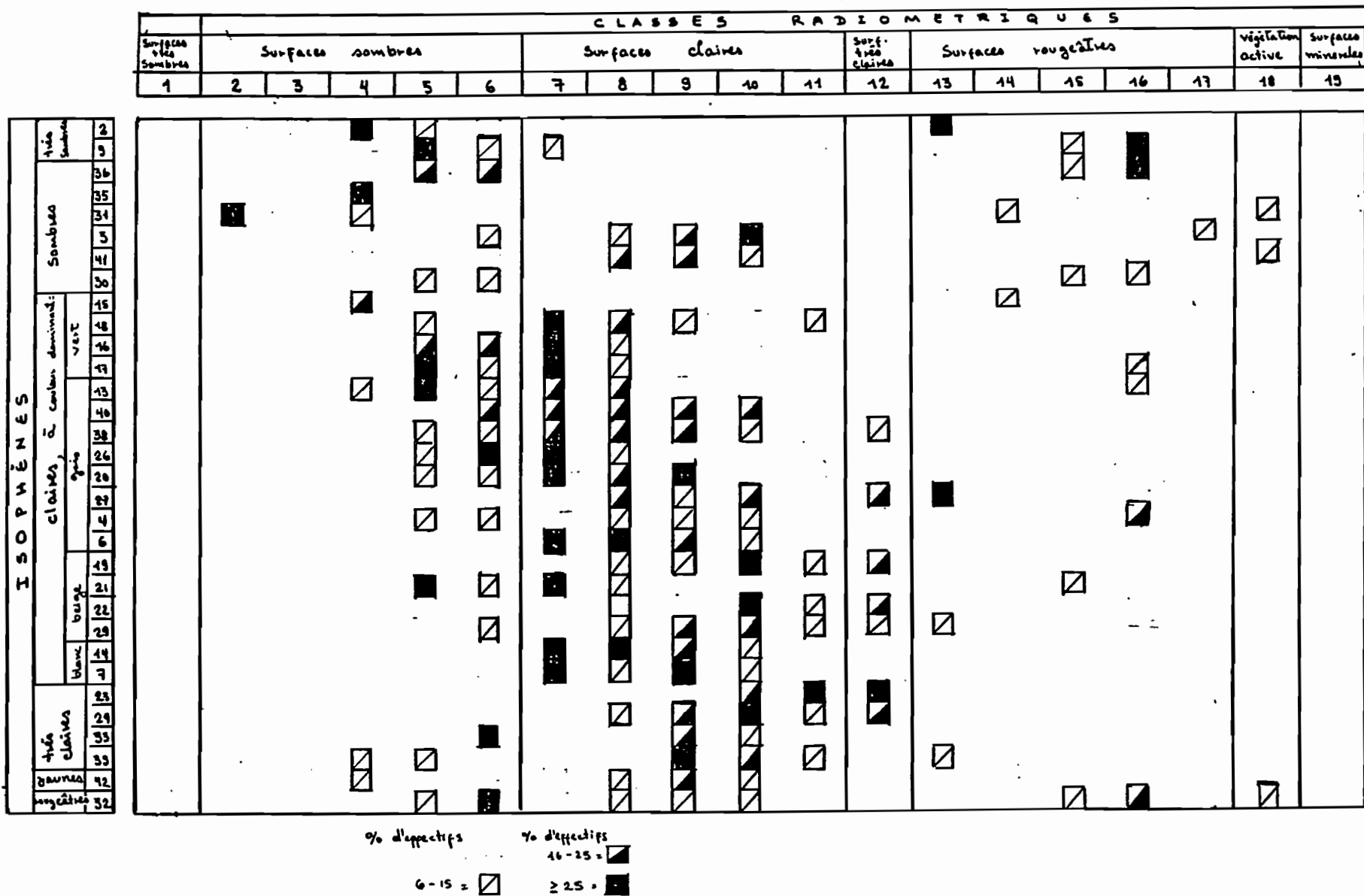


figure 15 tableau de contingence :
isophènes / classes radiométriques
(au niveau des sites)

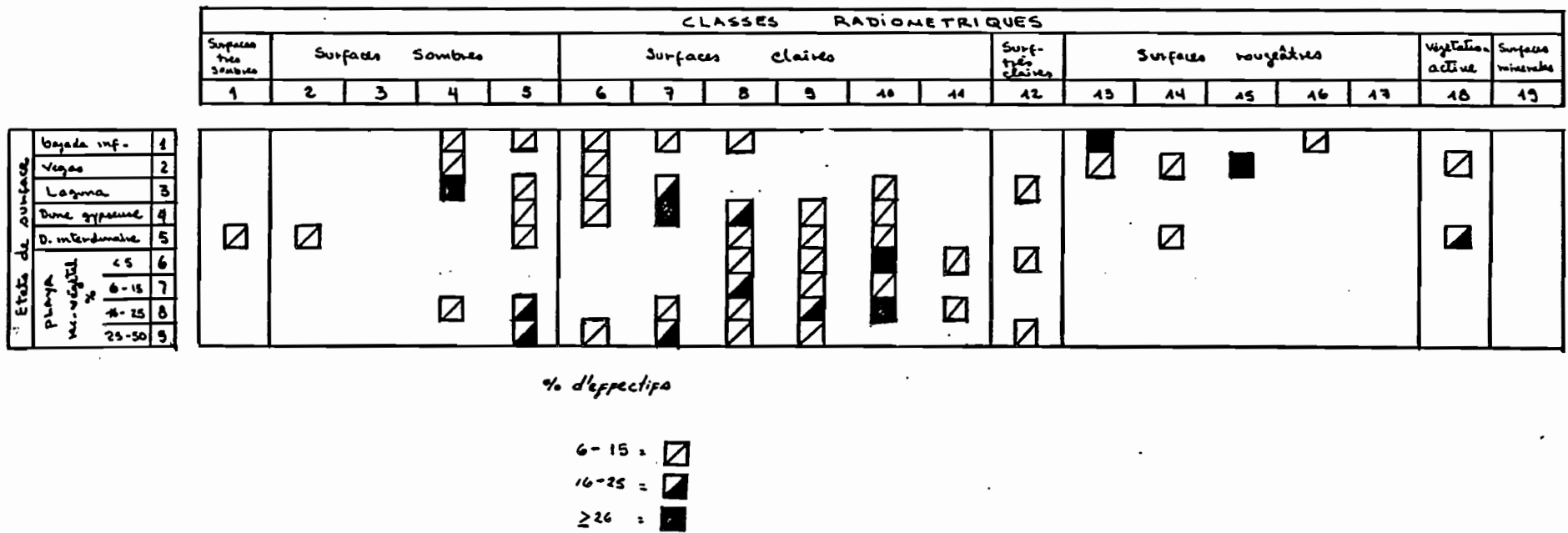


figure 166 tableau de contingence :
 états de surface / classes radiométriques
 (au niveau des sites)

		ISOPHÈNES																													TOTAL			
		très Sombres	Sombres	clair																								très claires	jaunes	rouges				
				couleur dominante																														
				2	9	36	35	31	3	41	30	15	18	16	17	13	40	38	26	20	27	4	6	19	21	22	29					14	7	23
États de surface	bayada inf.	1																															4	
	Vegas	2	2	6	1		7			1																							22	
	Laguna	3	2	1																1													4	
	Dune	4								1		6	11														2						22	
	D.interdun.	5					3																										6	
	PLAYA	R1	6	1																	1	1					1	2	1	2			24	
		R2	7			1			1	2	2				1	6		1									2	3					24	
		R3	8	1	2					2	2	1	3		1	4						4	1	3		3							30	
		R4	9							1	1	1				1						1											7	
TOTAL			3	4	4	1	7	2	3	7	2	4	6	2	4	6	11	3	11	2	2	1	6	1	7	5	5	2	8	10	2	3	2	7
																																		143

43

figure 16a tableau de contingence:
 états de surface / isophènes
 (au niveau de sites.)

- classe 19 : surfaces minérales avec efflorescences salines à dominante chlorure de sodium. Les valeurs radiométriques sont nettement plus élevées dans les deux canaux du visible XS1 et XS2 que dans le canal proche infrarouge XS3. On trouve ici une signature spectrale particulière et semble-t-il spécifique de ce type de milieu (POUGET M. communication orale).

La planche hors-texte permet de comparer visuellement le résultat des deux démarches et de montrer qu'elles sont en fait très proches. La distribution des sites dans les isophènes et dans les classes radiométriques montre que certaines entités spatiales n'ont pas été échantillonnées (surfaces rougeâtres, surfaces minérales à efflorescences salines).

Les principales unités géomorphologiques se distinguent bien malgré les confusions radiométriques évidentes. Ainsi les surfaces les plus sombres correspondent à plusieurs unités géomorphologiques et des conditions de surface très différentes (cf. légende de planche hors texte):

- Cerros et piedmonts: ombres, forte pierrosité, pente forte (en dehors de la zone d'étude).

- Dépression interdunaire à strate arbustive dominante et recouvrement végétal élevé (mais aussi pour une large part la bajada inferior et les zones de conduction du ruissellement).

- Laguna: sols nus très humides et inondés.

Visuellement, il est très facile de noter aussi que la distribution spatiale des classes est différente selon les unités géomorphologiques:

- distribution très homogène en plages compactes dans la laguna des classes 4, 5, 6+7.

- distribution beaucoup plus hétérogène dans les autres unités géomorphologiques.

3. Les relations état de surface / classe radiométrique et isophènes au niveau des sites.

Chaque site correspond à une isophène et à une ou plusieurs classes radiométriques. En effet tous les pixels composant un site n'appartiennent pas à la même classe radiométrique. On peut établir une statistique des effectifs pour chaque site et donner le tableau de contingence isophène/classes radiométriques (fig. 15). On note évidemment une grande dispersion mais une tendance à une certaine diagonalisation pour la moitié gauche du tableau correspondante aux surfaces très sombres à très claires (brillance).

Les figures 16a et 16b illustrent les relations entre les 9 états de surface définis au chapitre précédent, les isophènes et les classes radiométriques:

Il n'y a pas de relations biunivoques état de surface/isophène ni état de surface/classes radiométriques.

A fortiori, il n'y a pas non plus de relations biunivoques profil de conductivité électrique/isophène (fig. 12).

✓ Différents types de profils peuvent se présenter dans une même isophène, inversement différents isophènes peuvent correspondre à un même type de profil de conductivité.

Chapitre V

Chapitre V DISCUSSION ET CONCLUSION

On arrive donc aux résultats suivants que l'on peut resumer ainsi:

- La salinité du sol se caractérise par un type de profil de conductivité électrique associé au degré de salinité de l'horizon de surface. Il n'y a pas de relation biunivoque avec aucun des paramètres que nous avons retenus pour caractériser l'état de surface et susceptibles d'être perçus par le satellite. La situation géomorphologique et localement le taux de recouvrement végétal et le groupe de similitude floristique sont importants et l'on peut noter des relations intéressantes avec des ensembles bien définis de profils de conductivité électrique.

- L'image SPOT permet de mettre en évidence des entités spatiales (isophènes, classes radiométriques) qui ne sont pas en relation biunivoque avec les états de surface, ni évidemment les types de profils de conductivité électrique. Ceci au moins au niveau des sites.

On peut illustrer ce résultat en prenant l'exemple des "peladeros", des sols nus ou presque nus, identifiés sur la composition colorée par les isophènes 23 et 24. Ils comportent les caractéristiques de surface suivantes: Pente inférieure à 2%, surface battante, taux de recouvrement végétal le plus souvent inférieur à 5%, composition floristique diverse (plusieurs groupements) ce qui les situent dans des classes d'états de surface différents et bien évidemment des types différents de conductivité électrique et degré de salinité en surface (fig. 12).

Comment explique t-on cette variabilité?

Un "peladero" peut être l'expression d'une forte salinité du sol mais aussi l'expression d'autres facteurs empêchant l'installation de la végétation. Ces facteurs peuvent être:

- sécheresse locale extrême, provoquée par un bon drainage lateral, combiné avec d'autres facteurs tels que la présence d'une pellicule de battance très réfléchissante et imperméabilisant la surface du sol.

- surpatûrage et piétinement des troupeaux, etc.

Par contre, la connaissance du positionnement géomorphologique et topographique du "peladero" permet de préciser les facteurs déterminant sa présence et de lui associer un degré de salinité au moins d'une façon approximative. Ainsi, les "peladeros" de la playa au contact

de la bajada inferior montrent des profils de conductivité électrique peu salins en surface et très peu différents de ceux des régions voisines. Cela dénonce l'influence de facteurs, autres que la salinité, agissant sur la formation du "peladero".

Par contre on peut constater qu'un "peladero", à l'aval d'une plaine de ruissellement en bordure de la laguna présente, des profils de conductivité électrique extrêmement salins, ce qui pourrait justifier son existence.

Pour les "peladeros", il n'y a donc pas de signature spectrale particulière.

L'image SPOT révèle cependant la présence de surfaces nues avec efflorescences salines qui présentent une signature spectrale semble-t-il spécifique. Elle se caractérise par une forte diminution de la réflectance dans le canal 3, ceci étant dû vraisemblablement à la rétention hydrique par les cristaux de sel. Sa localisation sur le document infographique (planche hors texte) est très restreinte et pointillée. Elle est par contre bien reconnaissable sur la composition colorée (couleur bleu-cyan) localisée à la périphérie ouest de la laguna. Ce caractère de surface est sujet à des variations saisonnières importantes ainsi que l'état d'humidité.

Ceci pose le problème du multidate et de la nécessité d'avoir d'autres images satellites pour "saisir" de tels changements. Ainsi certains "peladeros" en saison sèche comme c'est le cas sur l'image SPOT utilisée, apparaîtraient-ils sous une autre nomenclature en saison humide, en particulier certains peladeros à fort degré de salinité en bordure de la laguna. Un autre exemple pourrait être celui des surfaces très sombres où il serait alors possible de distinguer un couvert arbustif dense et "actif" (dépressions interdunaires) d'une surface sans végétation et inondée dans la laguna.

D'autres problèmes pourraient être résolus en utilisant non plus SPOT mais Landsat Thematic Mapper (TM) dont le canal 7 permettrait de distinguer sans ambiguïté les surfaces à fortes teneurs en gypse.

PERSPECTIVES

PERSPECTIVES

Envisageant une étude plus pertinente de la salinité du sol à l'aide de la télédétection, nous proposons:

1.- Une sélection préalable des sites sur l'image satellite.

Il sera souhaitable de travailler au niveau de sites suffisamment grands (par exemple : 150 x 150 m), bien distingués sur l'image (par exemple: surfaces à radiance et texture équivalentes), et facilement localisés sur le terrain.

2.- Une définition plus précise de l'état de surface au niveau des sites avec la nécessité d'observations de terrain plus pertinentes (par exemple, sur: la couleur du sol, l'aspect de la surface, la présence et nature des efflorescences et croûtes salines, la structure de la végétation, etc.). Ces observations devront être réalisées, de préférence au moment du passage du satellite.

3.- Une étude multitemporelle (multidate), qui permettrait le suivi des caractéristiques à dynamique importante. Par exemple: la distribution et étendue saisonnière des efflorescences salines, l'évolution des types de profils de conductivité électrique dans l'espace et dans le temps, etc.

4.- Finalement, l'utilisation de différents capteurs (par exemple: Landsat Thematic Mapper, SPOT, et autres: radiomètre du terrain, etc.) pour un étude plus riche et comparative de divers aspects de la salinité du sol.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- BABIKER S., 1985
Préparation d'une prospection pédologique à l'aide de simulation SPOT (Soudan). mémoire de DESS de télédétection et cartographie thématique. ENSG-GDTA, 58 p.
- BREIMER R., 1985
Soil and landscape survey of the mapimi biosphere reserve Durango, Mexico. MAB-UNESCO. 128 p, 1 carte
- CORNET A., et al., 1983
Végétation patterns and soils in the mapimi bolson (chihuahuan desert-México) : I végétation arcs second chihuahuan desert symposium U.S.A. 20 p.
- CORNET A., et al., 1988
Ordination and classification of plant communities in the chihuahuan desert: the use of SPOT data; ORSTOM-Bondy, France Instituto de Ecologia, México. 10 p
- CORNET A., 1984
Análisis de datos climáticos de la estación laboratorio del desierto. Reserva de la biosfera de mapimi, México. documento técnico, Instituto de Ecologia C.R.N.A.
- CORNET A., J. GONZALEZ BARRIOS (en preparation)
Relaciones entre salinidad del suelo y vegetación en la reserva de la biosfera de Mapimi, Mexico.
- DELHOUME J.P. et al, 1983
Végétation patterns and soils in the mapimi bolson (chihuahuan desert México) : II Polygonal patterns second chihuahuan desert symposium U.S.A. 20 p
- DELHOUME J.P., 1988
Distribution spatiale des sols le long d'une toposequence représentative de la réserve mapimi (Mexique) Institut d'Ecologie . Mexique. 37 p.
- DEWISPELEARE G., 1983
Système de production d'élevage au Sénégal. Etude et cartographie d'évolution de la végétation par télédétection aérospatiale. IEMVT, Paris
- ESCADAFAL R., M. POUGET 1986
Luminance spectrale et caractères de la surface des sols en région aride méditerranéenne (sud tunisien). ITCF, Journal 1986 - 1 . 12 p
- FAO-UNESCO , 1976
Mapa mundial de suelos vol I Leyenda UNESCO-Francia 60p

- GONZALEZ BARRIOS J.L., 1986
Estudio de la repartición de la salinidad en una zona baja (playa) de una cuenca endorreica en el desierto de Chihuahua Tesis de licenciatura FCB UANL México. 280 p+4 cartas
- KILIAN J., BRUNEAU ,1987
L'apport des données satellitaires dans l'établissement des cartes utilisées par le développement rural. in SPOT I premiers résultats en vol. Centre national d'études spatiales. CEPADUES Toulouse. 197 - 202 p.
- MONTANA C.,R. BREIMER ,1981
Vegetación y ambiente de la reserva de la biosfera de mapimi (Durango). Actas del VIII Congreso Mexicano de Botánica.
- NELSON R.E. et al, 1978
Determining soil gypsum content and expressing properties of gypsiferous soils. Soil Science American society. Journal vol 42: 659 - 661
- PHILIPPEAU G., 1986
Comment interpréter les résultats d'une analyse en composantes principales ITCF, 63 p
- POUGET M.,MULDERS, 1988
Description of the land surface for correlation with remote sensing data. 5th. ISSS commission 5. Symposium "Remote sensing is a tool for scientist". Budapest, 1988 ,11 - 15p.
- RAKOTO et al, 1988
Guide de l'utilisateur et Manuel de référence du logiciel PLANETES. LIA ORSTOM, Bondy,134 p.
- RICHARDS L.A., 1951
Diagnosis and improvement of saline and alkali soils US department of Agriculture. handbook 60 USA

ANNEXES

annexe 1 liste de couleurs et structures, reconnues pour la
délimitation des isophènes dans
l'image-interprétation.

CODE	COULEUR
1	bleu
2	vert
3	cyan
4	marron
5	gris
6	jaune
7	blanc
8	beige
9	violet
10	rose
11	orange
12	rouge

CODE	STRUCTURE (organisation spatiale)
0	- sans structure particulière
1	- en petits traits
2	- aspect granulaire fin
3	- aspect granulaire grossier
4	- en petites bandes (plus longues que larges) contrastées alternées (brousse tigrée)
5	- en lignes dendritiques (chenaux de ruissellement)
6	- organisation irrégulière.

annexe 2 liste des isophènes délimitées dans
l'interprétation de l'image.

NUMERO D'ISOPHENE * CODE D'INTERPRETATION * SIGNIFICATION		
---	--	--

1	* 1-0-0	* Surface très sombres: ombres, <u>cerros</u> pierreux, pente forte
2	* 1-0-3	* Surfaces très sombres : <u>cerros</u> pierreux, pente forte
3	* 2-6-5	* Surfaces sombres : <u>bajada</u> à pente faible
4	* 5-7-5	* Surfaces claires II: <u>bajada-playa</u> , pente faible
5	* 5-7/11-0	* Surfaces claires II: <u>bajada</u> , pente faible
6	* 5-7/2-0	* Surfaces claires II: <u>bajada-playa</u> , pente faible
7	* 7-11/4-5	* Surfaces claires IV à végétation active: <u>bajada</u> avec canaux de ruissellement, végétation active, pente moyenne
8	* 6-2-4	* Surfaces rougâtres : zone de dunes sableuses region nord west
9	* 1-2-4	* Surfaces très sombres : <u>bajada-playa</u> à pente faible. végétation en bandes contractées alternées avec sol nu
10	* 6-2-6	* Surfaces rougâtres : <u>bajada</u> . sols rouges
11	* 5-2-4	* Surfaces claires II: buts sur <u>bajada</u>
12	* 6-7-0	* Surfaces rougâtres : <u>bajada</u> , sols rouges
13	* 5-0-0	* Surfaces claires II: <u>playa</u> avec paturage à strate arbustive dominante, recouvrement végétal moyen
14	* 7-5-0	* Surfaces claires IV: <u>playa</u> avec paturage à strate herbacée dominante, recouvrement végétal faible
15	* 2-0-0	* Surfaces claires I: <u>playa</u> avec paturage à strate herbacée dominante, recouvrement végétal élevé
16	* 2-7-3	* Surfaces claires I: <u>playa</u> avec paturage à strate herbacée dominante, recouvrement végétal moyen

annexe 2 (suite) liste des isophènes délimitées dans l'interprétation de l'image.

NUMERO D'ISOPHENE * CODE D'INTERPRETATION * SIGNIFICATION

- 17 * 2-7-1 * Surfaces claires I: playa avec pâturage à strate arbustive dominante, végétation distribuée dans un arrangement en plan polygonal
- 18 * 3-2/7-3 * Surfaces claires I: playa avec pâturage à strate herbacée dominante, recouvrement végétal moyen
- 19 * 8-2/5-2 * Surfaces claires III: playa avec pâturage à strate herbacée dominante, recouvrement végétal faible
- 20 * 5-7-3 * Surfaces claires II: playa avec pâturage à strate herbacée dominante, recouvrement végétal moyen
- 21 * 8-2/6-6 * Surfaces claires III: playa avec pâturage à strate herbacée dominante, recouvrement végétal faible
- 22 * 8-5-2 * Surfaces claires III: playa avec pâturage à strate herbacée dominante, recouvrement végétal faible
- 23 * 7-0-0 * Surfaces très claires I: sol nu à surface battante
- 24 * 7-8/6-0 * Surfaces très claires I: sol presque nu à surface battante
- 25 * 7-9/5-6 * Surfaces claires IV: playa avec pâturage à strate arbustive dominante, recouvrement végétal faible
- 26 * 5-2/7-3 * Surfaces claires II: playa avec végétation hallophyte à strate arbustive dominante, recouvrement végétal faible
- 27 * 5-7/9-3 * Surfaces claires II: playa avec végétation hallophyte à strate arbustive dominante, recouvrement végétal faible
- 28 * 7-3-6 * Surfaces très claires II: playa, sols nus avec abondantes efflorescences salines
- 29 * 8-5/10-6 * Surfaces claires III: bajada-playa pente faible

annexe 2 (suite) liste des isophènes délimitées dans
l'interprétation de l'image.

NUMERO D'ISOPHENE	* CODE D'INTERPRETATION	* SIGNIFICATION
-------------------	-------------------------	-----------------

30	* 4-9-0	* Surfaces sombres : plaine de conduction du ruissellement avec pâturage à strate herbacée dominante, recouvrement végétal moyen
31	* 2-4/6-3	* Surfaces sombres : plaine de concentration du ruissellement avec pâturage à strate herbacée dominante, recouvrement végétal élevé
32	* 6-4/11-5	* Surfaces rougeâtres : <u>vega</u> et plaines de conduction du ruissellement avec canaux de drainage bien delimités, végétation active
33	* 7-2/6-6	* Surfaces très claires I: sol presque nu à surface battante
34	* 3-5/9-0	* Surfaces claires II: <u>laguna</u> , sols nus humides
35	* 2-3/9-0	* Surfaces sombres IV: <u>laguna</u> , sols nus très humides
36	* 2-3/7-6	* Surfaces sombres : <u>laguna</u> , sols nus humides
37	* 3-7/9-6	* Surfaces très claires minerales: <u>laguna</u> , sols nus aux efflorescences salines
38	* 5-2-3	* Surfaces claires II: dunes gypseuses anciennes, sols gypseux à texture grossière
39	* 7-2-0	* Surfaces très claires I: dunes gypseuses anciennes, sols gypseux à texture grossière
40	* 5-1/9-3	* Surfaces claires II: dunes gypseuses anciennes, sols gypseux à texture grossière
41	* 2-11-0	* Surfaces sombres : dépressions interdunaires
42	* 11-2-0	* Surfaces sombres à végétation active: dépressions interdunaires à végétation active
43	* 8-11/12-0	* Surfaces claires III à végétation active: terres de culture
44	* 6-2/3-3	* Surfaces rougâtres : zone de dunes sableuses, region nord ouest
45	* 7-2/3-6	* Surfaces claires IV: zone de transition: dunes sableuses region nord ouest, plaine de conduction du ruissellement