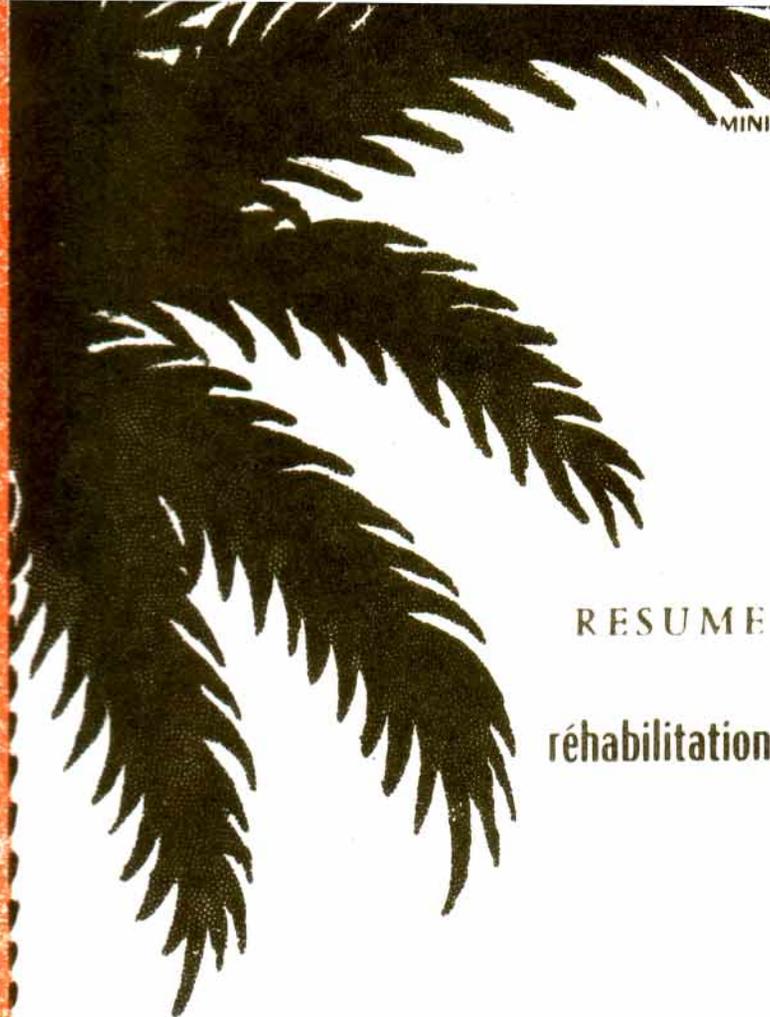


E.S 268

REPUBLIQUE TUNISIENNE  
MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE  
DIRECTION DES SOLS



RESUME DE THESE

réhabilitation des sols arides

**les sols salés de l'oasis d'El Guettar**  
(sud tunisien)

Jean-Olivier Job

1993

# **RESUME DE THESE**

## **REHABILITATION DES SOLS ARIDES**

### **LES SOLS SALES DE L'OASIS D'EL GUETTAR (SUD TUNISIEN).**

E-S n°

Jean-Olivier Job

Chargé de recherche ORSTOM

Janvier 1993

## LES SOLS SALES DE L'OASIS D'EI GUETTAR (TUNISIE).

## RESUME

L'oasis d'El Guettar occupe 450 hectares à la limite Nord du Sahara Tunisien. La végétation s'y étage d'un piemont caillouteux calcaire à une sebkha très salée.

La mise en place des sols est due à l'action conjuguée du colluvionnement et de l'apport éolien. Il s'en suit une répartition des sols qui épouse le relief. La dynamique des sels dans ces sols est étudiée dans le temps et dans l'espace. Il est fait appel pour cela à la conductivimétrie électromagnétique, technique qui permet de mettre en évidence les variabilités de la répartition des sels à trois échelles: celle de la planche, celle de la parcelle, celle de l'oasis.

Il est montré qu'à l'intérieur du système de culture oasisien, la valorisation des sols par une, deux ou trois strates de culture impose une répartition des sels différente, tant du point de vue du niveau de la salure que de l'allure du profil salin. La quantité de sels présent dans le sol et sa répartition dans le profil peut être déterminée pour chaque type d'occupation du sol.

Il est montré aussi que l'irrigation ne modifie pas la quantité de sels apportée par l'oasis vers le chott mais qu'elle modifie les profils salins de manière à permettre toutes les cultures quelle que soit le niveau de salure atteint entre 50 et 150 cm de profondeur. L'irrigation traditionnelle seule permet de maintenir le système oasisien en équilibre avec son environnement.

Les mécanismes de mobilisation par le vent et la pluie du gypse sont élucidés. La dynamique des sels dans le système piemont-oasis-sebkha est détaillée quantitativement et qualitativement. Il est montré qu'en dépit des grandes surfaces soumises au ruissellement, la mobilisation des sels de surface est négligeable vis à vis des mouvements verticaux à l'intérieur du profil. Il est donc proposé d'utiliser le profil salin et le niveau de salure des deux premiers mètres de sol pour la classification et l'étude des sols salés d'oasis.

La dynamique actuelle des sels est dominée par la halite, la bloedite et la thénardite et les sulfates de magnésium hydratés. Les phénomènes de dissolution-précipitation du gypse sont très réduits et n'apparaissent que dans les sols très irrigués sans évoluer vers un horizon induré de gypse.

En définitive, dans ce système de culture la gestion de l'eau telle qu'elle est pratiquée permet une production en rapport avec les potentialités du sol en dépit de la salure élevée. Les techniques de culture permettent même le retour à l'équilibre après bouleversement des conditions géochimiques par des inondations qui provoquent une réduction des sulfates du profil.

\*\*\*\*\*

## SOMMAIRE

### CHAPITRE I- PROBLEME ET METHODE.

- Le problème posé et son contexte.

### CHAPITRE II- LE MILIEU NATUREL.

2.1- Plan de situation et géomorphologie.

2.2- Hydrogéologie et végétation.

### CHAPITRE III- LE MILIEU ARTIFICIALISE.

3.1- L'organisation des cultures.

3.2- La gestion de l'eau.

### CHAPITRE IV- METHODE D'ETUDE DE LA DISTRIBUTION SPATIALE.

4.1- Choix de la méthode: la conductivimétrie électromagnétique.

4.2- Modalités de mise en application.

### CHAPITRE V- LES SOLS DANS LE PAYSAGE NATUREL.

5.1- Formation et répartition des sols dans le paysage.

5.2- Répartition des sels dans les sols et la nappe.

### CHAPITRE VI- REPARTITION SPATIALE DES SELS.

6.1- Evolution des sols par anthropisation et salure suivant l'occupation du sol.

6.2- Variabilité interpacellaire de la salure et analyse spatiale.

### CHAPITRE VII- REPARTITION DES SELS DANS LE TEMPS.

7.1- Transports des sels par la nappe.

7.2- Evolution de la salure des sols d'oasis: le rôle de l'irrigation.

### CHAPITRE VIII- DYNAMIQUES RAPIDES EN BORDURE DE CHOTT.

8.1- Les sols cultivés de bordure de chott.

### CHAPITRE IX- CONCLUSIONS GENERALES.

\*\*\*\*\*

## CHAPITRE I - PROBLEME ET METHODE.

### 1.1- Le problème posé et son contexte.

Les oasis sont un bon exemple de systèmes à forte variabilité spatiale conjuguée en plus avec un isolement important du milieu extérieur (Riou, 1990). L'environnement climatique y est agressif, l'eau rare et le drainage souvent déficient. Les sols y sont quelquefois très salés et cependant ils sont cultivés depuis des siècles.

Le problème est important en Tunisie où presque toutes les oasis sont affectés par les sels à des degrés divers (Hachicha et Job, 1990) et où la quasi totalité des ressources en eau est mobilisée pour l'irrigation (El Bathi, 1992). Les moyens mis en oeuvre, forages et extensions remettent en question les équilibres entre les sols, les eaux et la végétation. Le site d'El Guettar est démonstratif à deux points de vue:

- d'abord parce qu'il existe à El Guettar une culture oasienne dont la pérennité assure la cohésion du groupe social et parce que la salure des sols y est ressentie comme une menace.
- ensuite parce que cette oasis, coincée entre une montagne calcaire et un chott gypseux et très salé est représentative d'autres situations semblables au Maghreb et au Proche-Orient, tant par son contexte géochimique que parce qu'elle est un lieu de rencontre et d'opposition entre le désert et l'espace anthropisé.

Notre but est de décrire la variabilité spatiale des sels et d'expliquer la part de l'homme dans les mécanismes d'équilibre maintenant la salure du sol à un niveau compatible avec les cultures oasiennes.

Pour aboutir à ce résultat, nous avons dû tenir compte des caractères particuliers à notre oasis, des sols et des sels qu'ils contiennent, du fort morcellement des parcelles, de la grande variabilité spatiale qui paraît en partie déterminée par l'homme. En fonction de ces caractéristiques nous avons été amenés:

- 1- à prendre en compte le cadre physique et humain, avec plus d'attention sur le positionnement de l'oasis dans l'espace et la gestion de l'eau,
- 2- à privilégier, comme outil, la conductivimétrie électromagnétique qui permet de définir une salure apparente globale du sol, de multiplier les mesures et de combiner l'étude de la variabilité spatiale avec celle du suivi chronologique,
- 3- à choisir comme indicateur de référence un horizon gypseux présent dans tous les sols de l'oasis,
- 4- à suivre la salure des sols sur cinq parcelles représentatives pendant trois ans.

Ainsi arrivons-nous à définir l'équilibre global de la salure des sols de l'oasis dans l'espace et dans le temps, non seulement en période d'irrigation non perturbée, mais aussi face à des inondations exceptionnelles qui se produisent deux ou trois fois par siècle.

Cette démarche, constamment soutenue par des enquêtes agronomiques et une interprétation géochimique a semblé particulièrement adaptée aux conditions de sol et de végétation de l'oasis. Elle pourra être appliquée à d'autres oasis se trouvant dans un environnement semblable.

## CHAPITRE II- LE MILIEU NATUREL.

### 2.1- Plan de situation et géomorphologie.

L'oasis d'El Guettar se situe en Tunisie méridionale, à 15 km à l'est de Gafsa (fig.2.1), dans la zone steppique occidentale nord-africaine (Le Houerou 1990). C'est la limite nord-est de la culture du palmier dattier en Afrique.

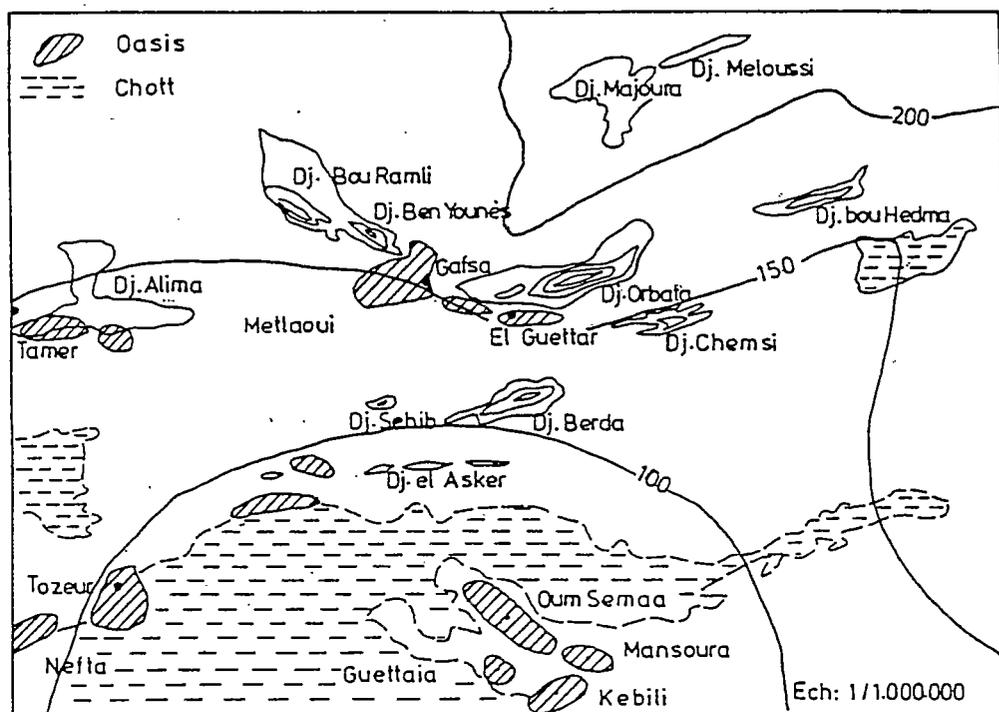


Fig.2.1- El Guettar et les oasis du sud de la Tunisie.  
Situation des isohyètes 100, 150 et 200 mm.

L'opposition avec le milieu naturel apparaît sous deux aspects principaux:

- La grande variabilité dans le temps de la pluviométrie, autour de 150 mm de valeur moyenne, la faiblesse chronique des précipitations et la grande violence des pluies exceptionnelles qui peuvent modifier sensiblement la répartition des sels dans notre système.
- La grande variabilité dans l'espace de la répartition des cultures en fonction des conditions d'ensoleillement qui n'est pas sans influence sur le régime salin des sols.

La géomorphologie présente les aspects suivants:

#### - L'oasis:

La taille relativement petite de l'oasis (500 ha) face au chott (3600 ha) et aux formations mio-pliocènes (3000 ha) du bassin versant qui s'étend sur 15000 ha au total. Les formations gypseuses susceptibles d'être mobilisées par le vent sont donc très étendues par rapport à la taille de l'oasis.

- Les piemonts:

Les formations crétacées du Jebel Orbata, riches en dolomies fournissent au système des colluvions et alluvions grossières riches en calcium et magnésium.

- Le chott:

C'est une étendue plate de 36 km<sup>2</sup>, endoréique, où s'accumulent les eaux du bassin versant. La nappe phréatique y affleure en hiver. Sa salure dépend fortement de la micro-topographie, elle varie de 12 à 30 dS.m<sup>-1</sup>, mais peut atteindre localement des valeurs supérieures à 50 dS.m<sup>-1</sup>.

Le chott fonctionne comme système évaporatoire de sels divers, dont le gypse qui est remobilisé par le vent alors que les sels plus solubles, NaCl, MgSO<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> se concentrent sur place.

Du point de vue géomorphologique, il n'y pas de transition entre le chott et l'oasis, car cette dernière gagne sur le chott de plus en plus.

## 2.2- Hydrogéologie et végétation.

Le réseau de surface est constitué d'une série d'oueds qui descendent du Jebel Orbata. Ils creusent leur lit dans leur cône de déjection. Tous sont fortement anastomosés.

Les oueds ont un écoulement sporadique et violent. Seules les pluies supérieures à 30 mm.h<sup>-1</sup> contribuent à leur fonctionnement. Les oueds Sedd et Ghozrane atteignent ainsi le chott, par la partie ouest non salée, et encore deux ou trois fois par siècle. Dans les autres l'eau s'infiltré dans le sol avant d'atteindre la voie ferrée.

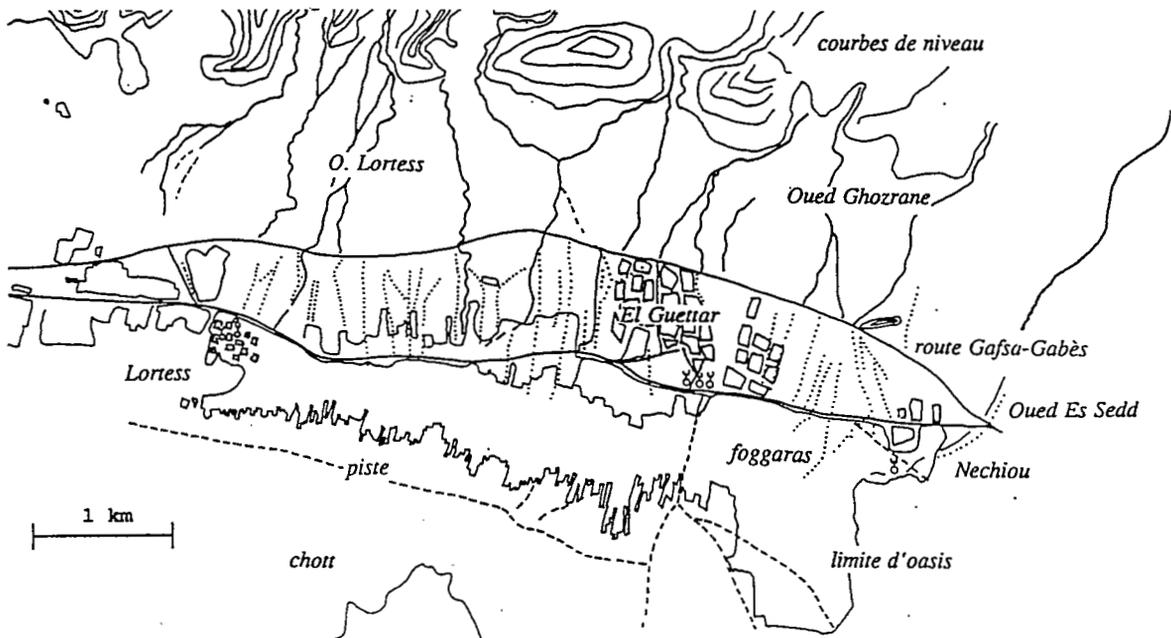


Fig.2.2- Le bassin versant d'El Guettar. Réseau hydrographique de surface et foggaras.

### 2.2.1- Les aquifères.

Le Zebbag inférieur, formation karstique du Crétacé moyen, composée de calcaires dolomitiques et dolomies fournit la quasi totalité de l'eau d'irrigation de l'oasis à travers six forages (tab.2.1):

Forage n°	BIRH	prof (m)	n. stat (m)	cote (m)
Lortess	1 184	40	-19	245,5
	2 9354	60	-21	245,6
Nechiou	1 84	107	-26	240,6
	2 9615	94		253,9
Ogla	19509	125	-40	251,3
Sfaya	13347	36	-20	

Tab.2.1- Forages dans le Zebbag Inférieur: niveaux statiques, profondeurs et cotes (d'après Farhat, 1988).

### L'accumulation des éboulis.

Elle renferme les eaux d'infiltration du versant sud du Jebel Orbata. Son épaisseur maximum est d'une centaine de mètres, son volume de l'oued El Abiad à l'oued Es Sedd de 2 km<sup>3</sup> à peu près. Elle est exploitée par quelques puits de surface dans la partie amont de l'oasis. En 1980 il y avait encore 50 puits privés produisant un débit fictif continu estimé à 20 l.s<sup>-1</sup> (Moumni et Farhat 1990).

### La nappe phréatique.

La nappe phréatique se forme à l'aval de l'endroit où les foggarras font déboucher la nappe des éboulis. Tous les puits qui utilisaient les eaux de la nappe ont été abandonnés après la mise en service des forages, à partir des années 70.

### 2.2.2- la végétation.

Le milieu naturel est caractérisé d'abord par des associations végétales typiques des sols gypseux, des sols salés (*Artrophytum glaucum*, *Mesambryanthemum nodiflorum*, *Traganum nudatum*, *Suaeda mollis*, *Salsola tetrandra* et *Salicornia spp*), des cailloutis (*Thymelea hirsuta*, *Ruta chalipensis*, *Artemisia campestris*, *Artemisia herba alba*, *Diplotaxis harra*, *Gymbopagon scolimanthus*, des glacis calcaires de parcours (*Limoniastrum guyonianum*, *Atriplex halimus halimus*, *Zygophyllum album*, *Frankenia thymifolia*, *Peganum harmala*).

## CHAPITRE III- LE MILIEU ARTIFICIALISE.

### 3.1- L'organisation des cultures:

L'oasis couvre à peu près 500 hectares dont 170 ha de palmeraie traditionnelle ( 32500 palmiers de sept "variétés" différentes: Deglet nour, Ftimi, Kenta, Besser Hellou, Kseba, Quabrichou, Hammouri) le reste étant planté en oliviers en association avec des cultures maraîchères au sol.

- Les parcelles du haut de l'oasis sont petites et presque toutes cultivées sur trois strates. Les palmiers dattiers sont de variété Ftimi et Kenta, l'ombrage important interdisant la mûrissement des dattes Deglet Nour tant que les palmiers n'ont pas dépassé en hauteur la strate arboricole. Les trois strates sont occupées et les puits sont utilisés en appoint.
- Les parcelles de mi-pente sont occupées diversement par une, deux ou trois strates. Leur taille est variable suivant le profil topographique.
- Les parcelles de bordure de chott sont les plus grandes. Leur largeur varie de 10 à 15 m. L'arboriculture fruitière est rare à cause de la proximité de la nappe salée. Les palmiers sont en majorité des Deglet Nour qui trouvent les conditions d'ensoleillement juste suffisantes.

Ainsi tout l'espace est-il occupé jusque dans le chott. Il n'y a pas de drainage, car le point le plus bas de l'oasis est à 200 m seulement à côté du point le plus bas du chott. La structure jointive du parcellaire ne permettrait d'ailleurs pas l'installation d'un réseau de drainage à ciel ouvert.

### 3.2- La gestion de l'eau.

Actuellement deux types d'alimentation sont utilisés:

- D'abord les puits exploitant la nappe phréatique: Leur profondeur varie entre 25m au bas des éboulis et 2m au niveau du chott. La plupart sont recreusés jusqu'à 35 à 45 m pour atteindre les calcaires du Zebbag inférieur qui renferment une eau moins salée. On estime leur débit total de 40 à 60 l.s<sup>-1</sup> (Farhat, 1988).
- Ensuite les forages publics du Zebbag inférieur, installés par la Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE) qui sont actuellement la source principale d'eau d'irrigation. Trois forages principaux assurent la totalité du débit: Nechiou 1, Ghozrane et Lortess 1.

Le débit total atteint 120 l.s<sup>-1</sup>. Le réseau comprend des canalisations en béton enterrées depuis les forages jusqu'en tête d'oasis, c'est-à-dire à la limite sud du village d'El Guettar. Le débit maximum disponible est donc de 0,36 l.s<sup>-1</sup>.ha<sup>-1</sup> ou 1150 mm d'eau par an. Cela n'empêche pas les extensions, mais ne permet pas de cultiver au maximum toutes les parcelles. L'oasis, en expansion continue depuis un siècle occupe maintenant 500 hectares.

#### - Distribution et mode d'irrigation.

L'eau est stockée dans des bassins et redistribuée dans des canalisations en béton vers 28 bornes à la cote 228 m à peu près.

De là elle est répartie dans six secteurs par des aiguadiers qui ouvrent les vannes à un débit de 10 à 15 l.sec<sup>-1</sup> à la demande. L'eau est amenée à la parcelle par des seguias en béton. La gestion est assurée par une Association d'Intérêt Collectif (A.I.C) qui fait payer l'eau à l'heure.

- Qualité de l'eau d'irrigation.

Ca	Mg	K	Na	Cl	SO4	HCO3	SAR	pH	CE	Mg/Ca	Forage
18,2	14	0,37	14,0	12,0	25,8	7	3	7,7	3,9	0,8	Nechiou
15,9	12	0,30	7,7	6,5	21,4	7	2	7,7	2,1	0,7	Ghozran

Tab.3.1- Qualité des eaux d'irrigation (juin 89) en me<sup>-1</sup>.

Les eaux sont sulfatées calciques et magnésiennes. Elles ont un SAR relativement peu élevé, mais une conductivité non négligeable. Elles sont plus calciques que magnésiennes, mais elles évoluent vers des eaux hypermagnésiennes par concentration progressive vers le bas de l'oasis et de haut en bas des profils de sol.

Le tour d'eau est d'une trentaine de jours et la main d'eau est au minimum d'une heure. Il s'en suit que de très petites parcelles qui sont cultivées en jardinage toute l'année reçoivent des quantités d'eau excessives. D'un autre côté, l'absentéisme induit un déficit d'irrigation sur les parcelles qui ne sont plantées qu'en palmier, provoquant des remontées capillaires importantes quelle que soit la position des sols par rapport à la nappe et par rapport au chott.

La non-irrigation de certaines parcelles, qui restent productives en dattes de deuxième choix, Aaligue ou Kenta, permet l'irrigation convenable d'autres parcelles, puisqu'il n'y a pas assez d'eau pour tout le monde. Il existe donc un équilibre global qu'il conviendra d'examiner plus en détail.

On peut suivre le développement par la première photo aérienne en 1963, puis par la carte pédologique de Martini en 1965, enfin par la carte très détaillée levée par l'équipe topographique de l'arrondissement du Génie Rural de Gafsa en 1988 et enfin par l'image Spot prise après les inondations de janvier 1990 (Traitement Centre National de la Télédétection).

L'extension des surfaces cultivées gagne sur le piemont, d'abord à proximité du village d'El Guettar au centre de l'oasis, puis par les extrémités Est et Ouest à proximité des nouveaux forages.

Les terres sont gagnées ensuite depuis les années quatre vingt sur les berges de l'oued El Sedd et la bordure plioquaternaire du sud-est, mais la nappe est trop profonde pour permettre la culture du palmier.

Le fait marquant est que tout au long de ce processus, le noyau traditionnel, qui est également la zone la plus menacée par les sels, est préservé.

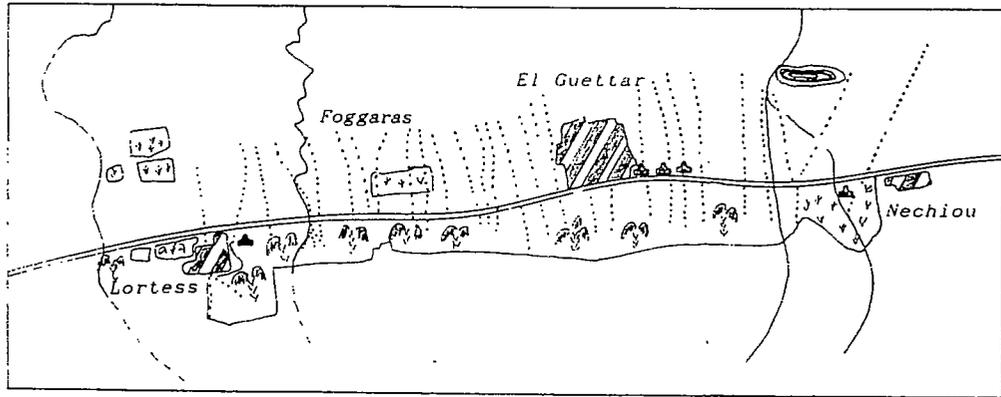


Fig.3.1 - L'oasis d'El Guettar en 1910 (d'après Bursaux).

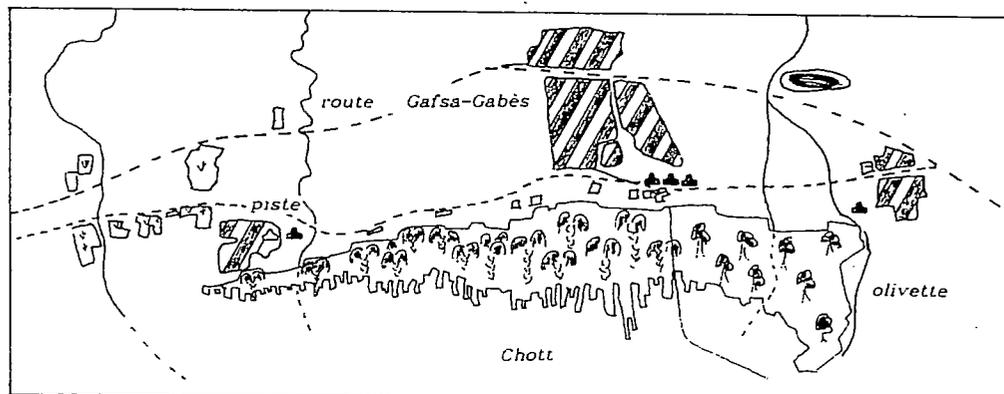


Fig.3.2 - L'oasis d'El Guettar en 1965 (D'après photos aériennes).

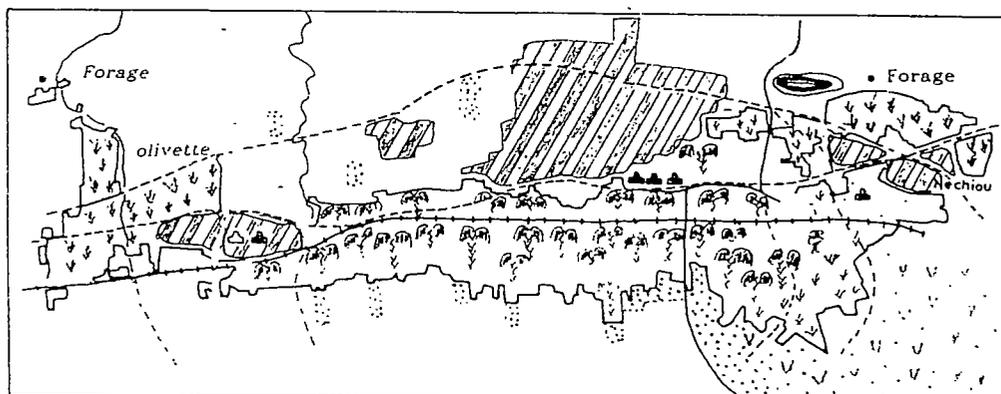


Fig.3.3 - L'oasis d'El Guettar en 1988 (d'après la plan 1/2000 ème du Génie rural).

## CHAPITRE IV- METHODE D'ETUDE DE LA DISTRIBUTION SPATIALE.

### 4.1- Le choix de la méthode: la conductivimétrie électromagnétique.

Il nous faut pouvoir analyser la variance de la distribution spatiale, donc disposer d'un grand nombre de mesures, sans multiplier les prélèvements d'échantillons. Le développement récent de **conductivimètres électromagnétiques** permettant les mesures numériques et non plus analogiques offre la possibilité de rétrécir la maille des mesures sur le terrain tout en pratiquant l'acquisition automatique des données. On dispose ainsi d'un nombre de mesures considérable que l'on peut traiter par **statistique classique** ou par **géostatistique**. Cet outil d'étude spatiale permet de minimiser les erreurs d'estimation.

Nous avons choisi la combinaison de la conductivimétrie électromagnétique (CEM), du traitement statistique et géostatistique des mesures pour suivre la répartition spatiale des sels dans le paysage et aborder le fonctionnement salin du sol en place.

Le principe de l'induction électromagnétique est de créer un champ magnétique à l'intérieur du sol. Ce champ à son tour crée suivant la loi d'Ampère des courants secondaires, qui sont captés par une spire receptrice qui affiche une déviation galvanométrique proportionnelle à leur intensité.

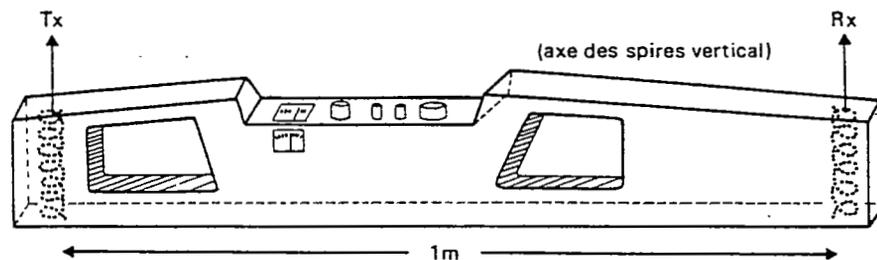


Fig. 4.1- Appareillage de mesure de CEM (Geonics E-M38). Tx est la spire émettrice, Rx la spire receptrice. L'appareil est en position de mesure verticale CEV (c'est à dire l'axe des spires est vertical).

La mesure finale dépend directement de la conductivité propre du sol, plus celle des sels, intégrée sur une profondeur voisine de deux mètres (Mc Neill, 1980a).

L'appareillage est simplement posé sur le sol, il n'y a donc pas de problème de contact sol-sonde, ni de temps d'installation à prendre en considération.

#### 4.1.1- Principe du fonctionnement:

Une spire primaire, parcourue par un courant électrique de fréquence  $f$  produit un champ  $H_p$  variable qui induit dans le sol, supposé homogène, des courants  $i_1, i_2, i_3$  (fig.4.1). Ces courants produisent à leur tour un champ secondaire  $H_s$  qui est mesuré à l'aide d'une spire secondaire  $S_s$ . Si l'on néglige les interactions magnétiques entre les différentes lignes de courant, on démontre que leur profondeur de pénétration ne dépend que de la distance interspire  $s$ .

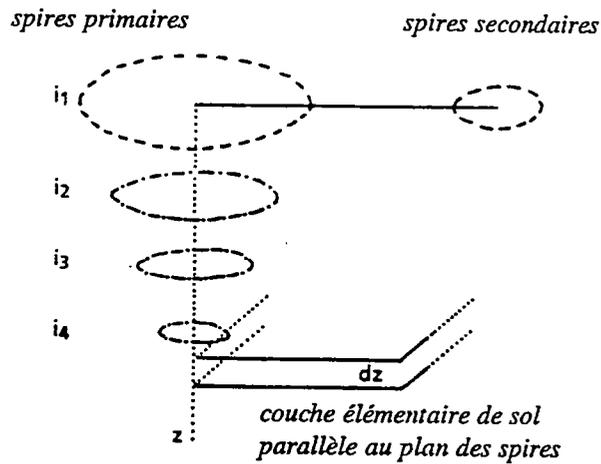


Fig.4.2- Principe de la mesure.

Si  $\sigma$  est la conductivité du sol ( $\text{dS.m}^{-1}$ ),  $s$  la distance interspire (m), et  $e$  la base des logarithmes népériens, et si on pose:

$$\begin{aligned} \mu_0 &= \text{permissivité de l'air,} \\ H_s &= \text{champ reçu par Rx dans le vide,} \\ H_p &= \text{champ reçu par Rx dans le milieu mesuré,} \end{aligned}$$

on démontre que la conductivité électrique apparente  $\sigma_a$  du milieu peut s'exprimer par:

$$\sigma_a = 4(H_s/H_p)^{\perp} / 2\pi f \mu_0 s^2 \quad (1)$$

La conductivité globale apparente mesurée est donc proportionnelle à  $(H_s/H_p)^{\perp}$ . La notation  $\perp$  signifie que l'amplitude du champ magnétique que l'on mesure est en quadrature de phase avec l'onde incidente, ce qui permet de la mesurer sans perturbation de la part du champ incident.

#### 4.1.2- Utilisation dans un milieu homogène (Mc Neal 1980b):

Si l'on admet que la pénétration des courants induits ne dépend, pour une fréquence et une intensité donnée, que de la distance interspire  $s$ , on peut calculer le champ  $dH$  induit dans une couche d'épaisseur  $dz$  située à la profondeur  $z$ . Appelons  $d\Phi(z)$  la contribution de la couche  $dz$  au champ secondaire :

$$\text{soit:} \quad d\Phi(z) = dH/H$$

On peut intégrer cette fonction de la surface du demi-espace représenté fig.4.2 jusqu'à l'infini.

On obtient les courbes (a) et (b) de la fig.4.3 respectivement pour des configurations verticales et horizontales des spires. L'expression mathématique de chacune des courbes prend une valeur simple si on opère à valeur de  $B$  faible et si  $\sigma_a < 100 \text{ dS.m}^{-1}$ , soient:

$$\text{en mode vertical:} \quad \Phi_{v(z)} = 4z / (4z^2 + 1)^{3/2} \quad (2)$$

$$\text{et en mode horizontal:} \quad \Phi_{h(z)} = 2 - 4z / (4z^2 + 1)^{1/2} \quad (3)$$

Soit en intégrant:

$$\int \Phi_{v(z)} dz = -1 / (4z^2 + 1)^{1/2} = R_{v(z)} \quad (4)$$

$$\int \Phi_{h(z)} dz = 2z - (4z^2 + 1)^{1/2} = R_{h(z)} \quad (5)$$

$z$  est une variable adimensionnelle (rapport de la profondeur à la distance interspire  $s$ ). Dans les appareils que nous avons utilisé,  $s=1$  pour l'appareil EM-38 de Geonics Ltd, Canada et 0.60 pour le prototype construit par la Sté Tronico, Nantes.

#### 4.2.4- Résolutions de niveaux de salinité différente.

L'utilisation de cette méthode sur des sols irrigués et salés, nous amène à considérer les deux couches de sol situées au dessus et au dessous de la profondeur  $z=0,6$ :

En comparant les graphes des équations (2) et (3), on voit (fig.4.3), qu'en mode horizontal les couches superficielles donneront une réponse relative plus grande que les couches profondes. Par contre, en mode vertical, la réponse des deux couches est sensiblement identique pour les deux régions séparées par  $z=0,5$ .

Cette propriété est mise à profit pour déterminer l'allure du profil salin.

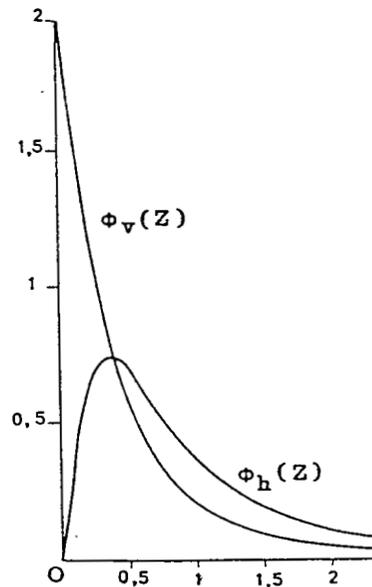


Fig.4.3- Graphe des équations (2) et (3).

#### 4.2- Modalités de mise en application.

Les mesures de terrain sont faites comme le montre la fig.4.5 en posant le conductivimètre verticalement (mesure CEV) puis horizontalement (CEH).

L'étalonnage consiste à transformer les données brutes CEV de terrain en conductivité moyenne d'extrait de pâte saturée du sol au point de mesure, intégré de 0 à 120 cm. On peut étalonner de même les valeurs CEV sur une profondeur de 200 cm.

Compte tenu de la proximité de la nappe en certains endroits, l'étalonnage des mesures de CEM par rapport aux conductivités mesurées sur des échantillons se fera avec les mesures CEH et avec des prélèvements d'échantillons pris entre 0 et 120 cm: on a donc prélevé 31 profils de sols dont on a mesuré l'humidité et les conductivités électriques CE<sub>est</sub>, CE<sub>cn</sub> et CE<sub>dx</sub> tous les 20 cm. La gamme des concentrations couvertes est de 2 à 45 dSm<sup>-1</sup> en terme de CE<sub>est</sub> et la gamme des humidités pondérales de 5 à 31 %

La régression multiple conduit à:

$$CE_{est} = 0,094 * CEH - 0,43 * \Theta_p + 3,76 \quad r=0,964 \quad n=31$$

Cette équation servira à mesurer la salure apparente globale sur 120 cm, soit CE<sub>est</sub>, qui sera la variable permettant d'évaluer l'intensité de la salure du sol.

## CHAPITRE V- LES SELS DANS LE PAYSAGE NATUREL.

### 5.1- La formation des sols.

Les sols de l'oasis sont des sols gypseux, formés de gypse lenticulaire éolien. Ils sont très homogènes.

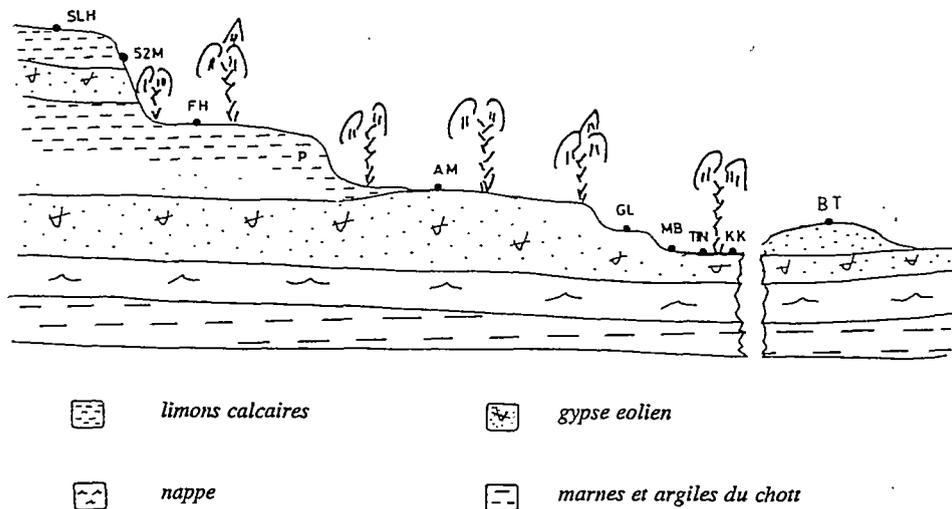


Fig.5.1- Répartition du gypse dans les sols.

La teneur en argile est faible, de 10 à 15 % et les possibilités d'évolution limitées dans le contexte climatique aride. La différenciation des sols s'est faite suivant deux processus:

- 1- dans le paysage naturel par la présence d'une nappe phréatique salée située à plus ou moins grande profondeur suivant la topographie,
- 2- dans l'oasis-même par le travail des horizons superficiels, l'irrigation et la fumure des sols.

Dans le paysage naturel, on peut distinguer deux origines dans la formation des sols du bassin versant:

- l'amont constitué de cônes d'épandage des oueds,
- l'aval constitué d'une accumulation gypseuse, plane dans le chott, épousant la pente dans le raccordement chott-piemont, jusqu'à une altitude d'une dizaine de mètres au-dessus du chott.

### 5.2- Classification et répartition dans le paysage.

Une première approche de terrain (Martini, 1968), destinée à une carte d'aptitude à l'irrigation au dix millième a utilisé la classification d'Aubert (1965). Nous la présentons différemment, en insistant sur la présence de gypse, constituant majeur des sols de l'oasis, et sur celle de cailloutis et limons calcaires, qui confèrent leurs propriétés aux sols de piemont (Fig.5.2).

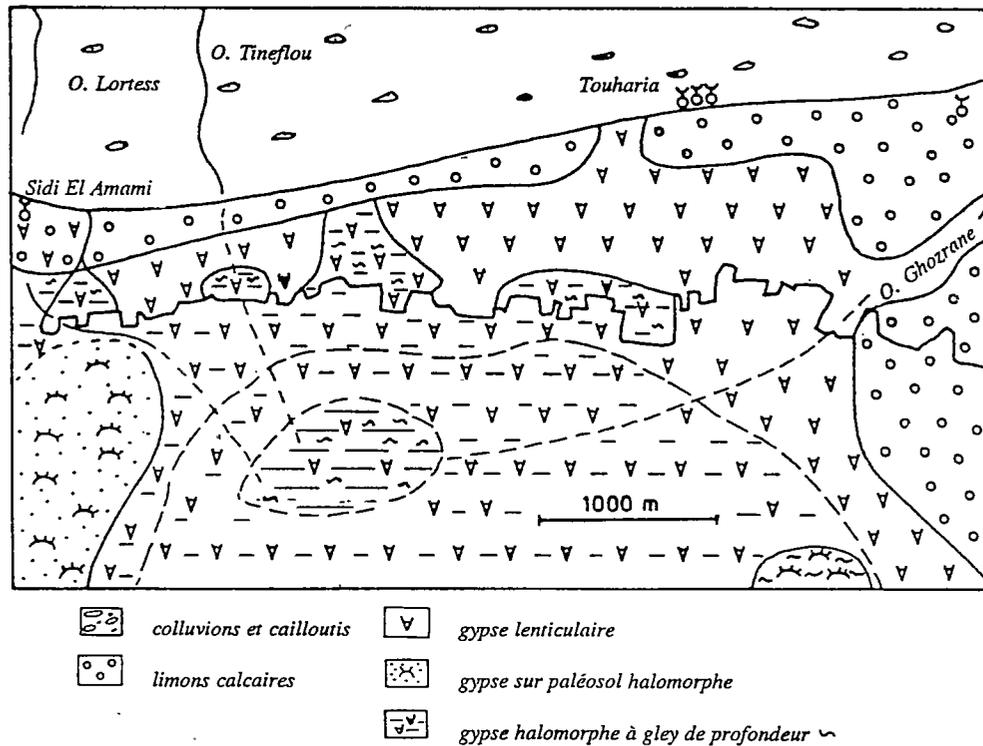


Fig.5.2- Répartition des sols dans le paysage (d'après Martini, 1965, modifié).

### 5.3- La répartition des sels dans les sols.

En surface du chott précipitent des sels en fines pellicules légèrement boursoufflées. La précipitation apparaît sur les petits monticules créés soit par des touffes de végétation, soit en bordure des pistes. L'analyse par diffraction X des sels dans la croûte superficielle permet de classer dans l'ordre d'importance quantitative décroissante:

Halite	: NaCl
Bloedite	: $MgSO_4, Na_2SO_4, 4H_2O$
Thénardite	: $Na_2SO_4$
Hexahydrate	: $MgSO_4, 6H_2O$
Pentahydrates	: $MgSO_4, 5H_2O$
Konyaïte	: $MgSO_4, Na_2SO_4, 5H_2O$
Gypse	: $CaSO_4, 2H_2O$
Eugstérite	: $Na_4Ca(SO_4)_3, 2H_2O$

L'ordre des solubilités croissantes étant: gypse, bloedite thénardite, hexahydrate, halite, konyaïte. A l'exception de la konyaïte et de l'eugsterite, ces sels ont également été trouvés en Tunisie dans le Chott El Jerid (Gueddari, 1980) et dans la sebkha de Zarzis (Perthuisot, 1975), mais dans un environnement plus aride et non cultivé.

Ces résultats sont en accord avec le diagramme des concentrations croissantes d'ions appariés dans la nappe, (Fig.5.6) qui montre une prédominance des associations ioniques sulfatées sodiques et sulfatées magnésiennes, que l'on peut donc considérer comme des précurseurs d'espèces devant précipiter. On peut donc prévoir l'évolution des sels par une simple mesure ponctuelle et un calcul d'ions appariés. Ainsi apparaît le déterminisme géochimique du système.

#### 5.4- La répartition des sels dans la nappe phréatique.

On l'étudie par prélèvement dans 53 puits (printemps 1991) dans la zone salée de l'oasis, complété par 17 sondages de nappe dans les endroits sans puits, ce qui correspond à une maille de 250x250m à peu près régulière.

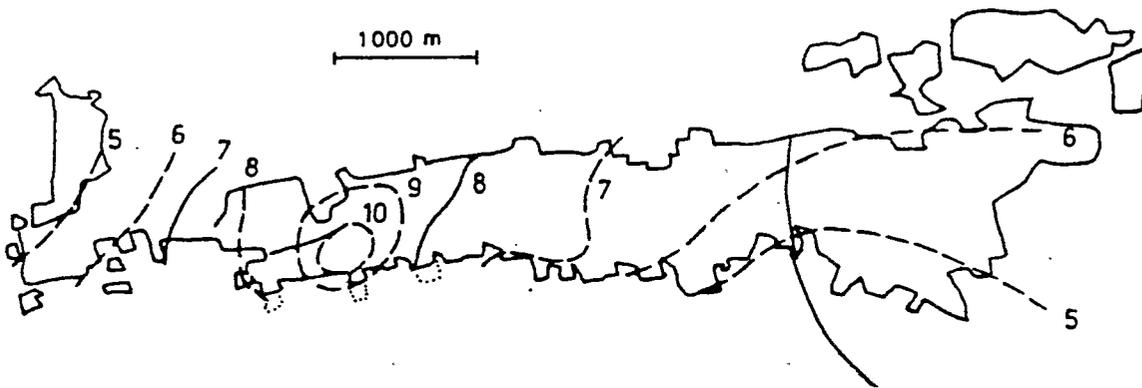


Fig.5.3- Distribution des conductivités électriques de la nappe phréatique ( $\text{dS.m}^{-1}$ ).

Le gradient des concentrations vers les parties basses est dû soit à une concentration des sels collectés dans les formations qu'elle traverse, soit à une accumulation des eaux de drainage des sols de plus en plus salés au fur et mesure que l'on se rapproche du chott. La carte des rapports Ca/Mg montre que la dissolution des sels de magnésium en profondeur est importante et se fait préférentiellement à celle des sels de calcium (Fig.5.4).

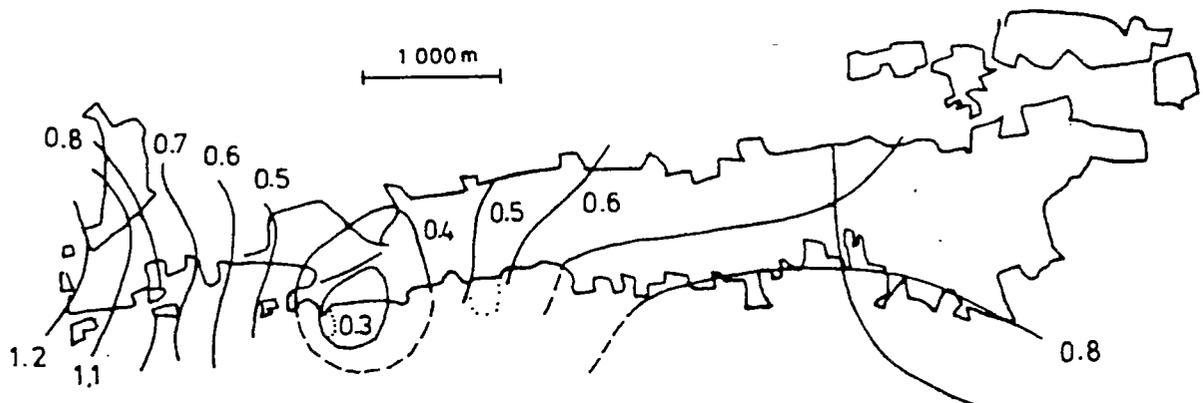


Fig.5.4- Dissolution des dolomies: carte des rapports Ca/Mg dans la nappe phréatique mesurée sur 53 puits et 20 sondages de nappe (Avril 1991).

#### 5.4.2- Les échanges sols-nappe.

##### - Calcul des activités.

Au cours de la dissolution des formations dolomitiques et gypseuses, la nappe s'enrichit en ions  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $SO_4^{--}$ ,  $HCO_3^-$  et  $CO_3^{--}$  qui se combinent en solution pour former les ions appariés, sauf  $Cl^-$  dont on néglige la forme  $CaCl^+$  (Nakayama 1971).

On calcule les activités des principaux ions appariés dans la nappe phréatique en fonction de la concentration croissante, mesurée par la conductivité électrique à  $25^\circ C$  (fig.5.5), grâce au programme BILION (Job et Cochonneau, 1985).

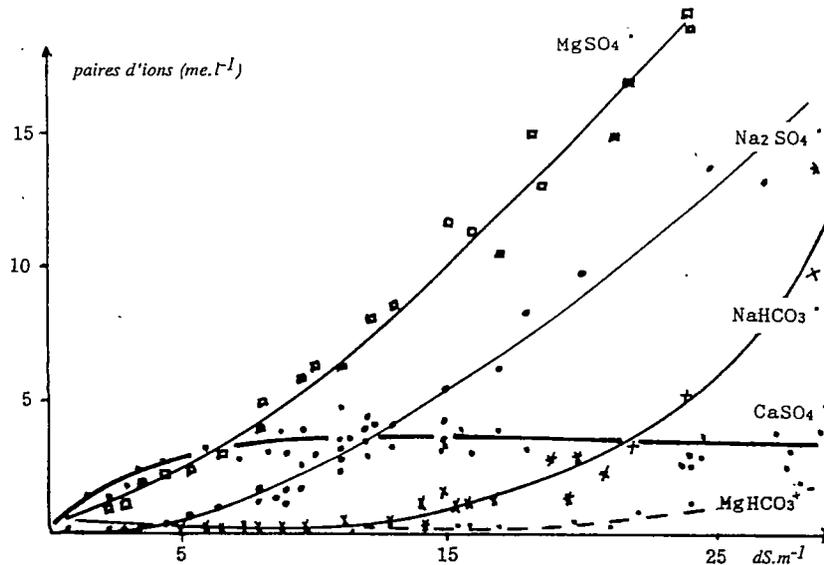


Fig.5.5- Concentrations des principaux ions appariés en fonction de la concentration de la nappe en  $dS.cm^{-1}$ .

##### Dynamique du magnésium:

En dehors de la dolomite, présente dans les sols à tous les niveaux, le magnésium peut provenir soit de l'eau d'irrigation, mais dans ce cas il faut admettre qu'il y a lessivage des sels jusqu'à la nappe, même en amont de l'oasis, soit de sels de magnésium déjà présents dans le sol, ce qui viendrait appuyer notre hypothèse d'un apport éolien présent à tous les stades de mise en place des sols du haut en bas de l'oasis.

##### Dynamique du gypse:

La nappe est saturée en gypse dès que la force ionique dépasse 0,05. Elle ne dissout plus de gypse ensuite.

Il n'y a donc pas de gypse qui précipite à partir des eaux de nappe. D'où l'absence d'encroûtement de nappe induré.

Pour que la précipitation puisse se faire il faut qu'il y ait évaporation. Ce n'est possible que dans les parcelles de bordure de chott, où le vent est intense, le couvert végétal peu important et où la capillarité entretient les remontées de sels à partir de la nappe.

## 5.5- Conclusions.

1- Les sols de l'oasis ont été mis en place par le vent, à partir des accumulations gypseuses du chott, qui ont une origine exogène.

2- La topographie naturelle a induit, à partir d'une couverture pédologique unique, deux différenciations:

- une salinisation des sols qui augmente au fur et à mesure que l'altitude par rapport au chott diminue,
- une hydromorphie des sols des parties basses, au contact de la nappe phréatique.

3- Le caractère géochimique dominant du bassin versant d'El Guettar est l'enrichissement des eaux de nappe et des sols en magnésium de l'amont vers l'aval. Ce phénomène se retrouve aux deux extrêmes, de la parcelle et de l'oasis entière. C'est une caractéristique du paysage.

4- La dynamique actuelle du gypse, que ce soit par remobilisation éolienne à partir du chott, ou par précipitation à partir des eaux de nappe ou d'irrigation, est extrêmement réduite.

5- Les eaux de nappe contiennent à tout endroit du paysage, sous forme d'ions appariés, entités thermodynamiques définies, un aperçu des sels qui vont précipiter en fin de cycle, c'est à dire à la surface des sols du chott et de sa bordure cultivée.

## CHAPITRE VI- DIFFERENCIATION SPATIALE PAR ANTHROPISATION.

### 6.1-Evolution des sols gypseux.

Il y a trois voies possibles d'évolution de l'horizon gypseux naturel:

- L'augmentation de la porosité par pénétration des racines de palmier entre 0 et deux mètres.
- L'enrichissement en matière organique des horizons de surface par fumure,
- La précipitation et la dissolution de gypse. Ces derniers phénomènes sont très limités et n'influencent aucun des paramètres hydriques mesurables (perméabilité, porosité, densité apparente).

### 6.2- La salure en fonction du degré d'occupation du sol.

#### 6.2.1- Caractérisation générale.

Le chlorure de sodium est omniprésent, mais la salure est le plus souvent sulfatée magnésienne, l'enrichissement des sols et des eaux en magnésium, du haut en bas du profil de sol et du haut en bas de l'oasis étant le phénomène dominant. Dans l'oasis les profils salins que l'on rencontre sont associés à des couvertures végétales et des pratiques culturales spécifiques. Une première approche permet de différencier quatre niveaux de salure, associés à des profils salins et à trois types d'occupation des sols:

- les sols cultivés sur trois strates,
- les sols cultivés sur deux strates:
  - deux strates supérieures (palmier, oliviers),
  - deux strates extrêmes (palmiers, maraîchage),
  - deux strates inférieures.
- les sols cultivés sur une seule strate:
  - la strate supérieure (palmiers),
  - ou la strate arboricole (oliviers),
  - ou bien la strate au sol (parcelles pionnières).

### 6.2.2- Les sols cultivés sur trois strates.

Ce sont les sols de l'oasis traditionnelle. Le profil de salure est croissant en profondeur pendant toute l'année. La salure globale moyenne entre 0 et 120 cm varie entre 2 et 7  $\text{dS.m}^{-1}$ , elle est de type sulfatée calcique en haut d'oasis et sulfatée magnésienne en bas, sa répartition est homogène dans la parcelle. L'horizon anthropique est riche en matière organique. Il y a des traces de remobilisation du gypse dans les 30 premiers cm du sol. L'ombrage est très important: 75 % à midi en mai. On trouve ce type d'occupation du sol dans toutes les parties de l'oasis.

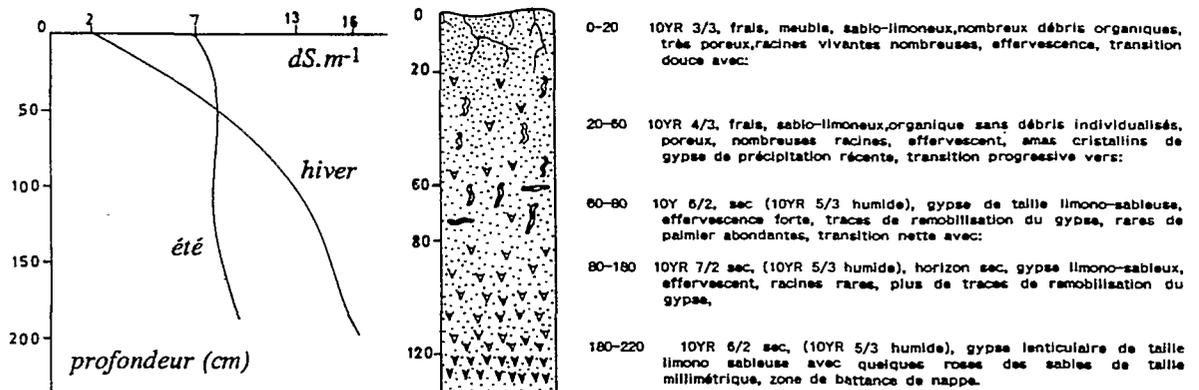


Fig.6.1- Parcelle cultivée sur trois strates: profil pédologique type et profil salin caractéristique.

### 6.2.3- Sols cultivés sur les deux strates extrêmes.

On les trouve dans les parties basses aux endroits où la nappe, peu profonde, interdit l'arboriculture fruitière. Ce sont des sols salés à gley de profondeur, qui sont irrigués de manière à maintenir la partie superficielle lessivée. La salure, comprise entre 2 et 12  $\text{dS.m}^{-1}$  en surface et 10 et 25  $\text{dS.m}^{-1}$  en profondeur, est répartie de manière très homogène à l'intérieur d'une même parcelle.

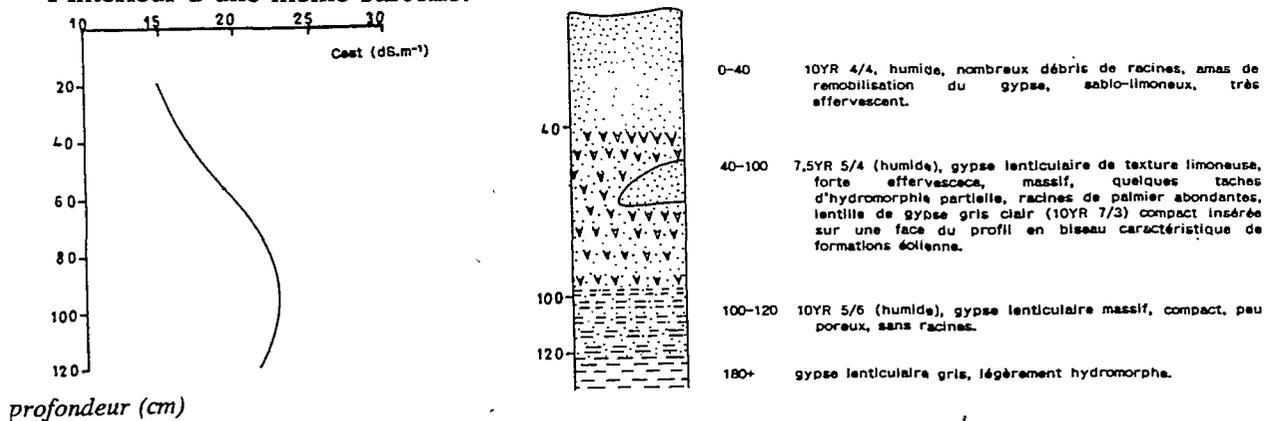


Fig.6.2- Profil de sol et profil salin caractéristique des parcelles cultivées sur deux strates en bas d'oasis.

#### 6.2.4- Sols cultivés sur une seule strate de palmiers.

Ils sont caractéristiques des parcelles abandonnées ou négligées. Ils se situent surtout dans la partie ouest, à l'aval du village de Lortess. Les profils salins sont décroissants, l'horizon anthropique est réduit ou n'existe pas, le sol est compact et la majeure partie de l'année, l'humidité est située entre 10 et 12 % dans les parties drainantes de l'oasis, c'est à dire à plus d'un mètre au dessus du niveau du chott, et entre 15 et 20% à proximité du chott.

Dans ces parcelles, seule l'allure du profil salin est caractéristique, en effet, comme dans toutes les oasis traditionnelles, ces parcelles ont été jadis cultivées sur deux strates, l'abandon de la strate au sol est donc récent et n'a pas provoqué de modification très sensible du profil pédologique.

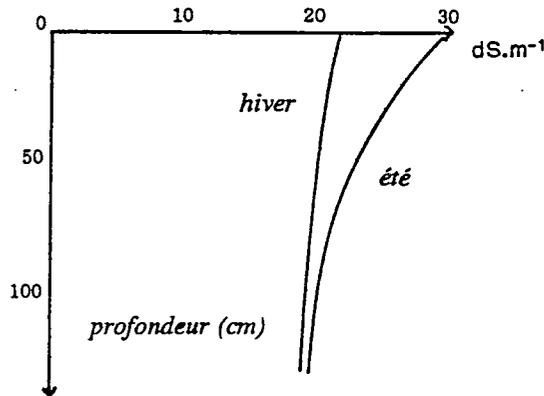


Fig.6.3- Profil salin caractéristique des parcelles cultivées sur une seule strate.

#### 6.2.5- Parcelles pionnières.

Elles sont gagnées sur le chott après décapage de la couche salée superficielle, technique ancienne qui a toujours été utilisée. Ce sont des profils tronqués constitués à partir de l'horizon de gypse lenticulaire. Il y a toujours un horizon hydromorphe, compris suivant sa position dans l'oasis entre 40 et 180 cm.

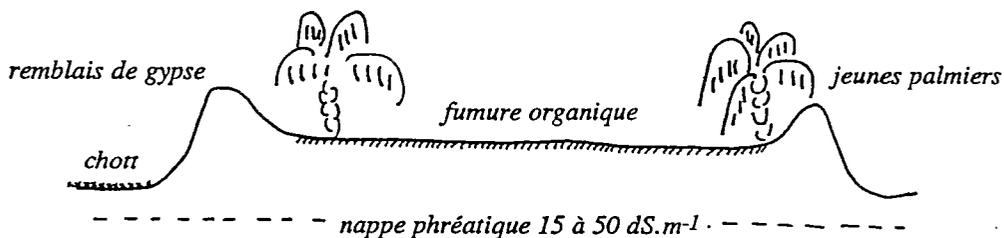


Fig.6.4- Aménagement des parcelles pionnières gagnées sur le chott.

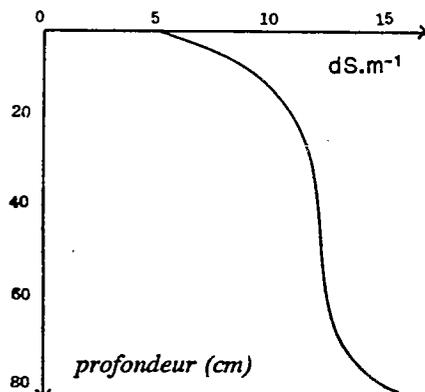


Fig.6.5- Profils salins caractéristiques des parcelles pionnières gagnées sur le chott.

### 6.3- Analyse de la variabilité interparcellaire de la salure.

Si nous prenons les cinq parcelles pour lesquelles nous avons multiplié les mesures avec un maillage minimum, soit tous les deux mètres, on peut calculer les coefficients de variation des mesures à un moment donné (tab.6.1).

Réf.	CEV/CEH	cv	r	CEst	n	Couvert végétal
NT91	515/492	8/9	1,01	41	47	chott sans végétation
TY0	278/263	8/11	1,07	21	54	palmiers négligés
GL89	144/112	7/14	1,29	9	56	maraichage pionnier
MB89	139/87	7/9	1,60	7	42	palmiers oliviers
SLH89	89/58	7/5	1,54	4	40	3 strates entretenues

Tab.6.1- Salure et profils salins des différents types d'occupation des sols.

- cv = coefficient de variation de CEV et CEH,  
 r = rapport (CEV/CEH).  
 CEst = Conductivité équivalente en extrait saturé.  
 n = Nombre de mesures par parcelle.

On constate que plus la parcelle est mise en culture, plus la salure moyenne diminue et plus le profil salin moyen s'enrichit entre 60 et 120 cm par rapport au sol sus-jacent.

Nous pouvons donc représenter chaque parcelle dans un système à trois dimensions, l'une étant la salure globale apparente moyenne, l'autre la position topographique, la troisième le degré d'occupation des sols par les cultures. On obtient un schéma représenté fig.6.10 que nous expliciterons dans le paragraphe suivant.

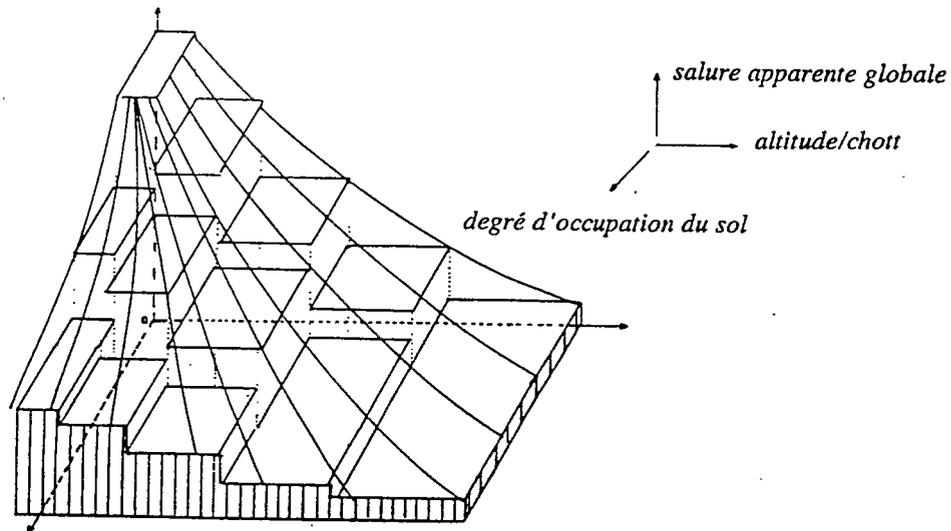


Fig.6.6- Représentation schématique de la salure moyenne d'une parcelle (axe des z), en fonction de son altitude par rapport au chott (axe des x) et de l'occupation de son sol (axe des Y).

Ce schéma nous permet de passer de la parcelle à l'oasis.

#### 6.4- Analyse de variance.

Il s'agit de déterminer l'importance relative de la topographie et de l'occupation des sols par les cultures sur la salure des parcelles de l'oasis. La variable à expliquer est la salure globale de 0 à 120 cm. La première variable explicative est le nombre de strates cultivées, soit de 0 à 3, la deuxième étant l'altitude par rapport à la cote 220 m qui est celle du bord du chott.

n	m	Int.conf.	m	Int. conf.	Cultures
18	32	30-35	0,94	0,86-1,02	S0 Chott non cultivé,
88	15	13,7-16,2	1,09	1,06-1,13	S1 Palmiers seuls,
98	9	8,2-10,6	1,29	1,25-1,32	S2 Palmiers maraîchage,
108	6	4,8-7,1	1,33	1,29-1,36	S3 Palmiers+Oliv+Four.
29	21	19,5-23,8	1,13	1,06-1,20	A0 En bordure du chott
44	19	17,4-20,4	1,11	1,06-1,17	A1 1 à 2 m de surplomb
83	10	9,3-11,8	1,21	1,18-1,25	A2 2 à 4 m " "
151	7	6,5-8,4	1,28	1,25-1,31	A3 4 à 12 m " "
salure (dS/m)			profil $r=CEV/CEH$		paramètre testé

Tab.6.2- Analyse de variance sur les variables Ces et  $r=CEV/CEH$  testées sur trois altitudes par rapport au chott.

f	p-1	$\Sigma$ carrés%	Carré mo	D.D.C %	cultures
70,86	3	6458	2436	99,99	CEs/Strates
22,60	3	1775	776	99,99	/Altitude
32,83	3	3,25	1,08	99,99	r /Strates
1,8	3	0,18	0,06	85,11	/Altitude

Tab.6.3- Résultats de l'analyse de variance.

La topographie explique 50% de la variance de CEst, tandis que la mise en culture par strates en explique 40%, avec un résidu de 10%. Le degré d'occupation des sols par les strates, c'est à dire le revenu que l'agriculteur compte retirer de son travail est primordial en ce sens que lui seul modifie le profil salin.

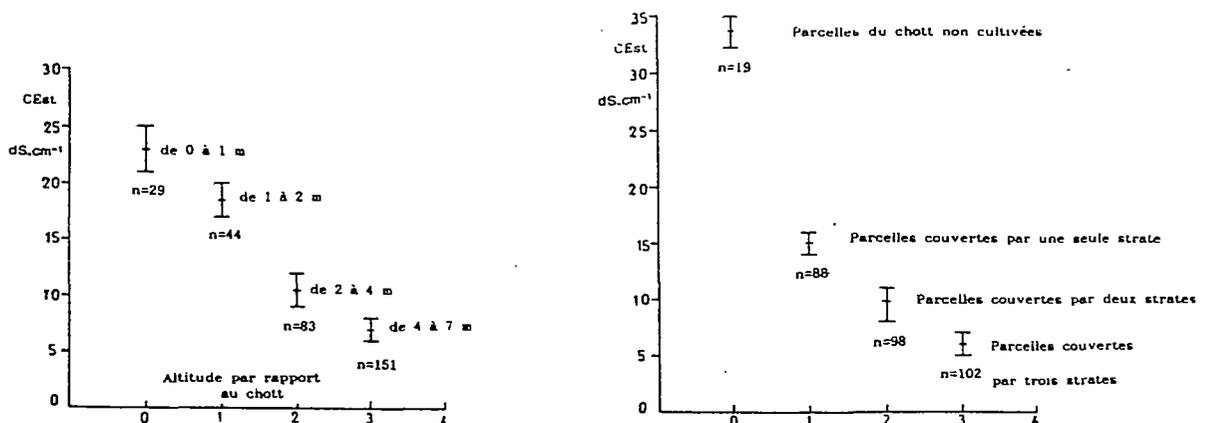


Fig.6.7- Analyse de variance de CEst, avec 4 classes d'altitude et 4 niveaux d'occupation du sol par les cultures.

Sur une séparation en trois strates, on remarque que toutes les strates sont significativement différentes, les strates 0 et 1 étant toutefois moins bien différenciées.

En conclusion de l'analyse de variance, on voit qu'il y a deux comportements différents. D'abord les parcelles de bordure basse restent sous l'influence du chott, tandis que les parcelles des niveaux topographiques 2 et 3 sont significativement différentes du point de vue salure. Ensuite, la couverture végétale distingue deux niveaux de salure. Le premier est celui des parcelles où ne reste qu'une seule strate: ces parcelles ont une salure se rapprochant de celle des parcelles du chott, le deuxième celui des parcelles cultivées sur deux et trois strates qui se ressemblent. Ceci montre bien l'importance du mode de gestion sur la répartition des sels et la tendance qu'ont les sols non irrigués à se saliniser.

### 6.5- Répartition des sels dans le paysage.

Une carte de répartition a été dressée en utilisant une interpolation de la forme  $1/d^2$ , chaque point étant estimé à partir de six points voisins situés à une distance  $d_i$  (fig.6.12). Quatre cents points de mesure sont nécessaires pour couvrir tout l'oasis de manière représentative.

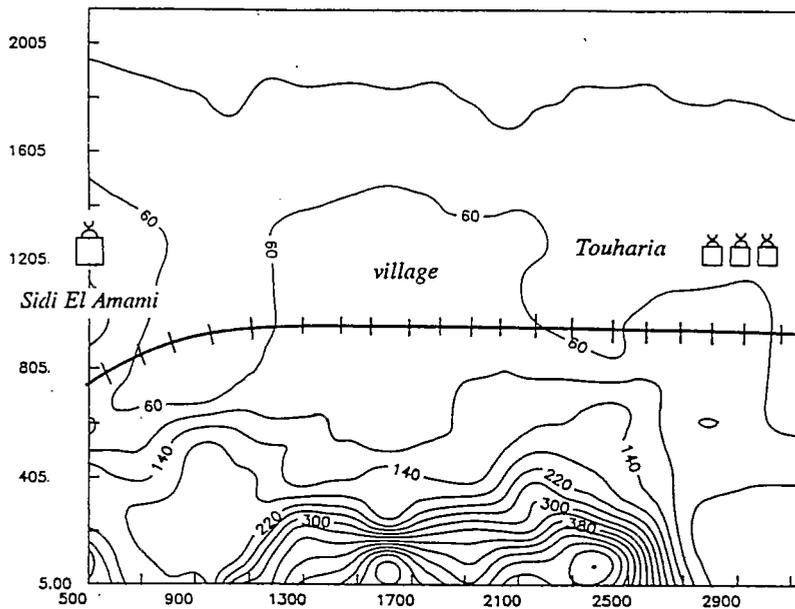


Fig.6.7- Répartition de la salure dans tout l'oasis. Les distances sur les axes sont en mètres, les valeurs reportées sont celles de CEV(20) en mai 1989, 60 dS.m<sup>-1</sup> correspond à CEst=1,9 dS.m<sup>-1</sup> d'extrait saturé, 140 à 9 et 300 à 25 dS.m<sup>-1</sup>.

La salure augmente rapidement quand on se dirige vers le bas de l'oasis.

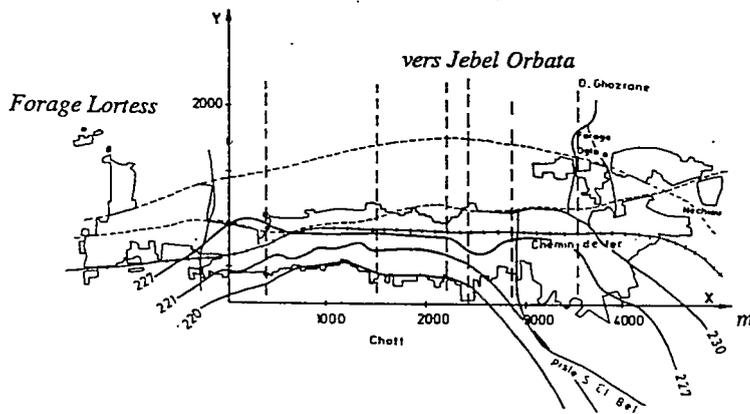


Fig.6.8- Carte topographique de l'oasis.

### 6.6- Comportement de chaque classe d'occupation du sol.

Il s'agit de rendre compte de la structure de la variable CEst en fonction de l'altitude et de chaque niveau d'occupation du sol. Les points de mesure correspondants sont repérés sur la carte en mètres par rapport au système de coordonnées représenté fig.6.8. Nous obtenons les cartes de la fig.6.9

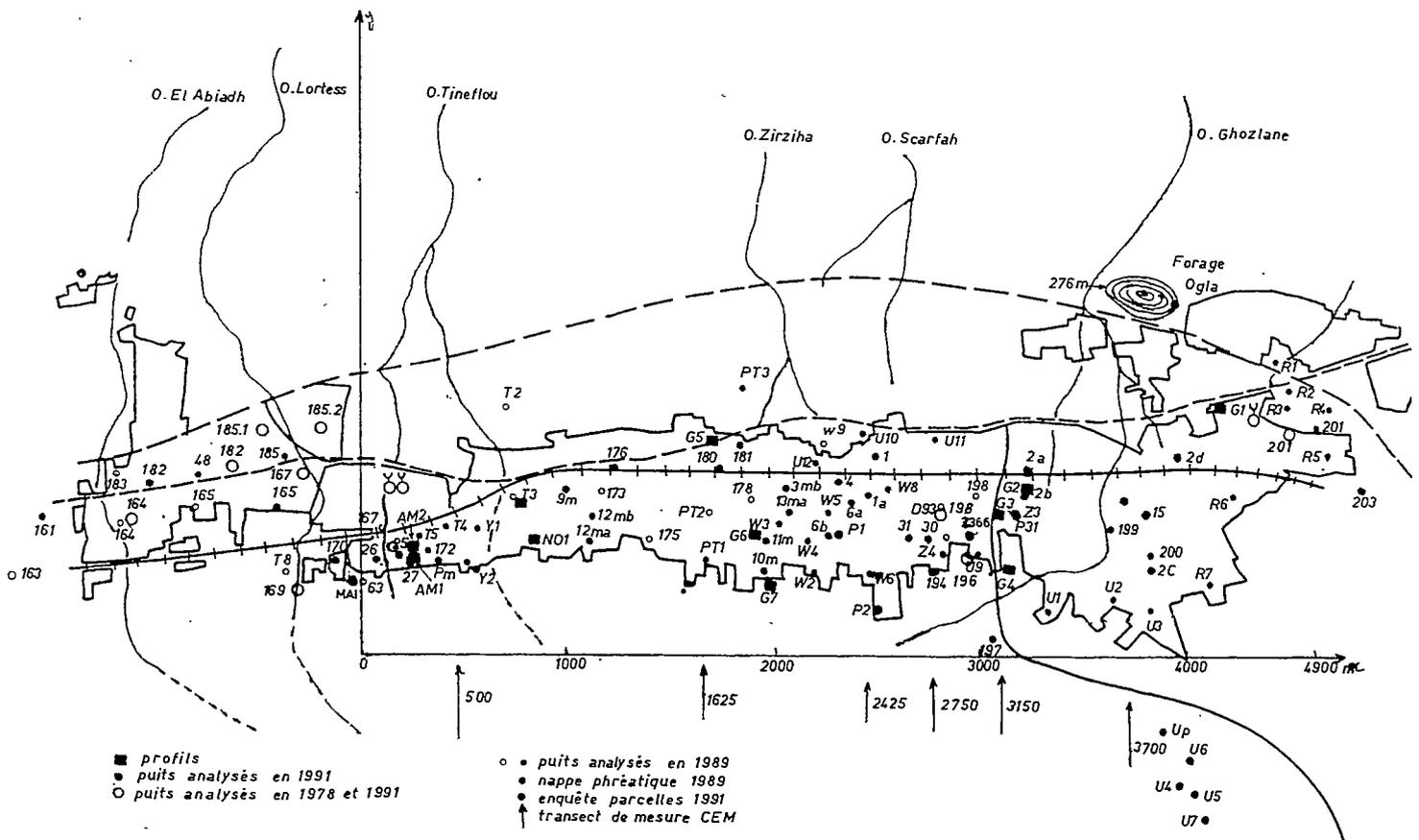


Fig.6.9- Repérage des points de mesure de la salure des sols et de la nappe.

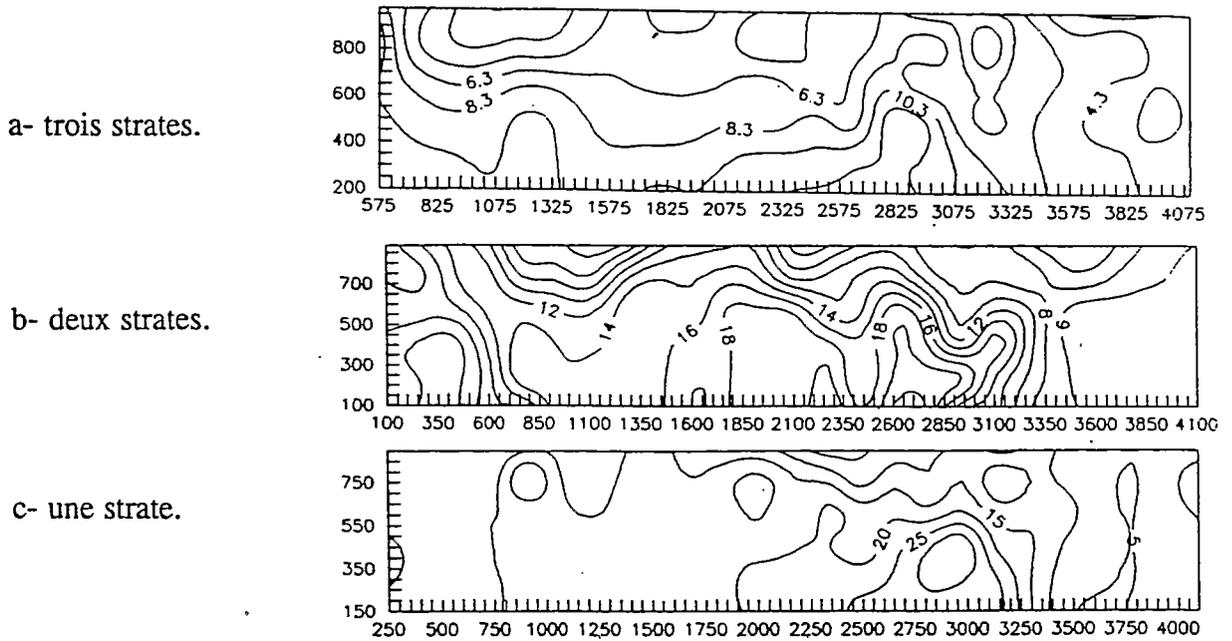


Fig.6.10- Carte de répartition de la salure par occupation du sol.

Au fur et à mesure que le nombre de strates cultivées augmente, la correspondance de la salure avec la topographie s'estompe, du moins dans la partie est, sans disparaître.

D'autre part, la répartition du rapport  $CEV_{(20)}/CEH_{(20)}$ , valeur mesurée pour une teneur en eau des sols de 20% de 0 à 120 cm, est indépendante de la topographie quelque soit l'occupation du sol. On peut donc dire que la pratique de l'irrigation induit une redistribution des sels à l'intérieur du profil, indépendamment de la topographie.

Les profils salins par contre montrent une certaine indépendance vis à vis de la topographie. Ils sont donc plus caractéristiques d'une occupation du sol donnée (fig.6.11). Ici se dessine l'importance du lessivage.

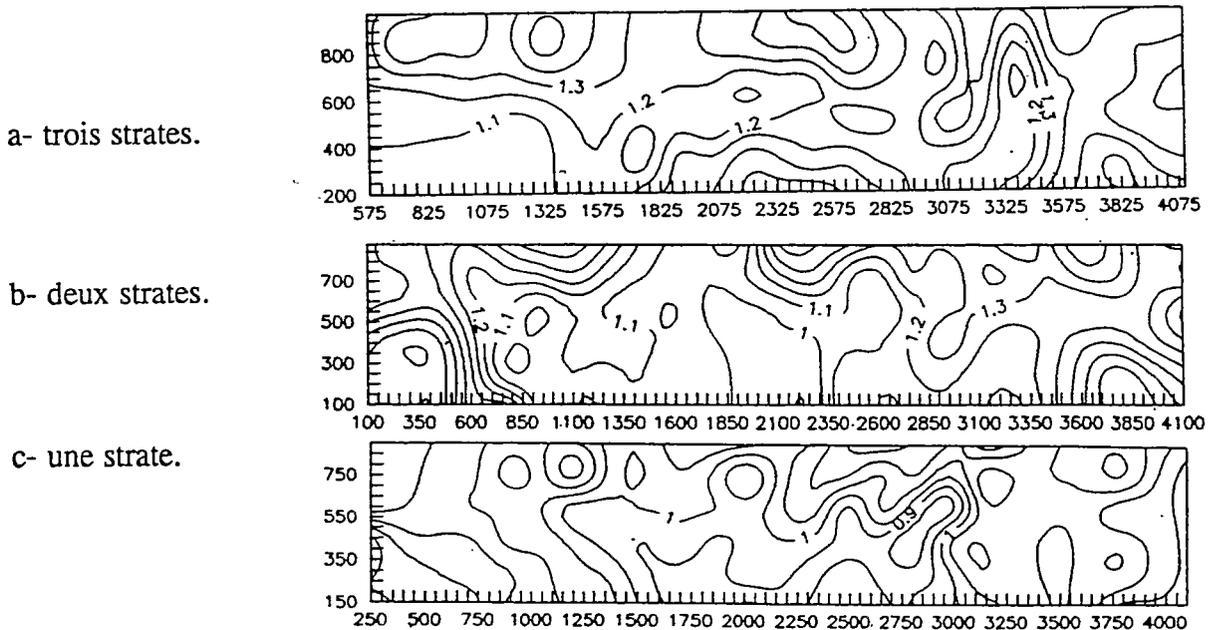


Fig.6.11- Répartition de  $r = CEV_{(20)}/CEH_{(20)}$  par classe d'occupation du sol (les axes sont ceux de la fig.6.9, les distances sont en mètres).

### 6.7- Représentation de la structure spatiale.

La structure spatiale peut être mise en évidence par l'examen des variogrammes, graphe exprimant la variance de l'ensemble des couples de points de mesure séparés par une distance  $d$ , quand  $d$  varie. Nous avons calculé les variogrammes directionnels par le programme Geostat-PC (Boivin, 1990).

- dans la direction  $x$ , soit ouest-est, les variogrammes des distributions de salure et de  $r = \text{CEV}/\text{CEH}$  ont une structure aléatoire,

- dans la direction  $y$  qui est celle de la plus grande pente, les variogrammes de  $\text{CEst}$  sont linéaires et ceux de  $r$  sont aléatoires (fig.6.16).

Pour les sols cultivés sur deux strates, la variance reste forte. Il y a un gradient nord-sud et un autre est-ouest. Les cultures de deux strates avec étage d'olivier comme strate supérieure sont en effet plus fréquentes dans la partie est.

Pour les sols cultivés sur trois strates, il y a une variance faible montrant l'effet du lessivage des sels par irrigation.

On retrouve le fait que la salure globale est fortement corrélée à la topographie et que les profils salins ne le sont pas.

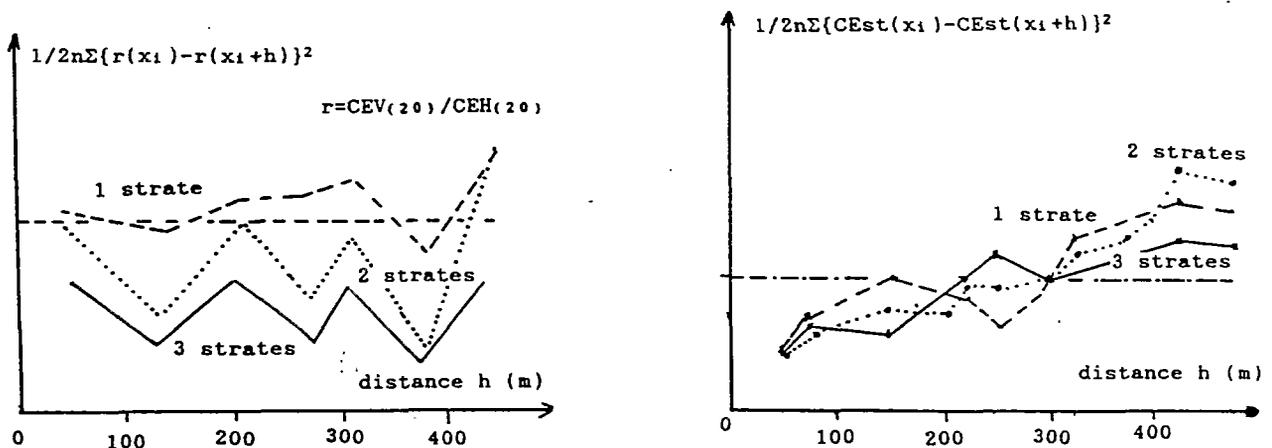


Fig.6.12- Variogrammes calculés dans la direction nord-sud pour la salure globale de 0 à 120 cm ( $\text{CEst}$  en  $\text{dS.m}^{-1}$ ) et  $r = \text{CEV}_{(20)} / \text{CEH}_{(20)}$ .

Les variogrammes représentés fig.6.12 sont normés, c'est à dire rapportés à la variance moyenne de la population prise comme unité. Les variances non normées sont données dans le tab.6.4 pour les deux variables.

occ. du sol	1 strate	2 strates	3 strates
CEst	50,5	18,6	9,5
r	0,04	0,04	0,02

Tab.6.4- Variances des conductivités électriques moyennes de 0 à 120 cm des sols et de  $r = \text{CEV}_{(20)} / \text{CEH}_{(20)}$  en fonction du degré d'occupation du sol par les cultures.

On y retrouve bien que plus les parcelles sont cultivées, donc irriguées, plus la salure est homogène et les profils salins semblables.

### 6.8- Conclusions partielles.

En résumé on peut dire que la distribution spatiale actuelle traduit l'évolution suivante:

- au départ, sans action de l'homme, la salure est fonction de la topographie uniquement. Les sols sont de plus en plus salés du haut vers le bas de l'oasis, car le drainage se fait de plus en plus difficilement, pour ne plus se faire du tout au niveau du chott. Il y a un confinement naturel progressif.

- la mise en culture introduit une répartition des sels dans le paysage de la manière suivante: plus les sols sont cultivés, plus leur profil salin se différencie et laisse apparaître l'effet du lessivage.

Il se substitue donc au paysage naturel un paysage anthropique qui ne se maintient que par l'irrigation. Les parcelles qui ne sont plus irriguées pendant quelques années retournent à l'état naturel. Il y a donc un équilibre maintenu entre les remontées de sels et leur lessivage par l'irrigation. Cet équilibre fera l'objet du chapitre suivant.

## **CHAPITRE VII: DYNAMIQUE LENTE: TRANSPORT DES SELS PAR LA NAPPE ET LOCALISATION DES SELS DANS LES SOLS.**

### 7.1- Introduction.

On distingue plusieurs dynamiques des sels dans le temps:

- 1- une dynamique lente, qui est celle des sels véhiculés par la nappe au niveau du bassin versant et celle des sols irrigués. Elle est de l'ordre de la décennie.,
- 2- une dynamique moyennement rapide, qui concerne les sols irrigués de l'oasis, qui est de l'ordre de trois à quatre années,
- 3- une dynamique rapide, qui est celle des sols de bordure de chott très salés qui est de l'ordre de quelques mois seulement (cette dynamique rapide ne sera pas traitée dans ce résumé).

### 7.2- Transport des sels par la nappe.

Le niveau de la nappe varie faiblement au cours de l'année (fig.7.1). Nous sommes donc proches d'un écoulement permanent.

Au niveau du chott la nappe remonte en hiver, entraînant une remobilisation des sels (capillarité-remobilisation par les pluies).

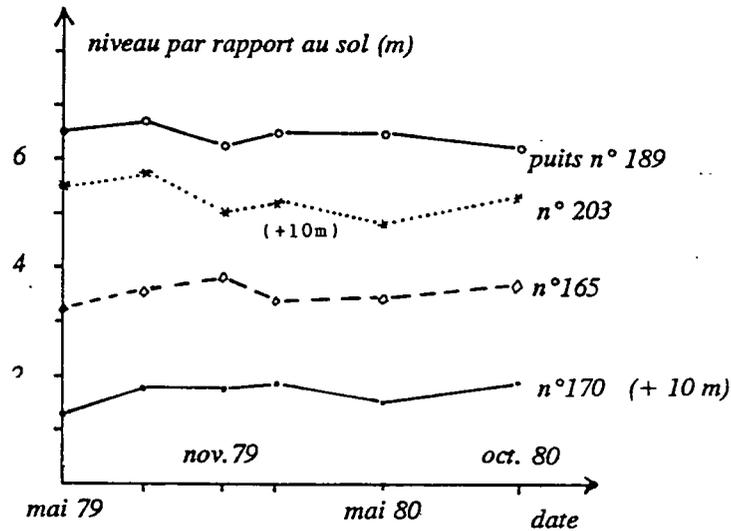


Fig.7.1- Fluctuation de la nappe au cours de l'année 1979-1980 (d'après Ben Marzouk, 1982).

Sur trois ans, entre 1985 et 1988, la fluctuation de la nappe mesurée sur huit puits a été de +20 cm pour une profondeur moyenne testée de 11,30 mètres. Ce qui est très peu.

#### 7.1.2- Evolution des caractéristiques chimiques.

A l'intérieur de l'oasis, seuls 23 puits sur les 103 analysés en 1980 par Ben Marzouk existent encore. Treize d'entre eux ont été modifiés et reforés pour atteindre le Zebbag inférieur. Il n'en reste que 10 qui sont dans le même état qu'en 1978.

Ca	Mg	Na	K	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	CE	numero
16.8	23.2	9.7	0.5	36.5	14.0	2.7	4.07	F182-78 (1)
18.0	18.0	13.9	0.3	30.0	14.5	7.0	3.89	91
19.6	29.0	15.0	0.5	45.0	16.0	2.4	5.00	F160-78 (2)
26.6	19.0	23.1	1.4	48.5	13.3	10.0	5.80	91
24.4	<b>46.0</b>	<b>45.0</b>	2.8	80.0	<b>40.0</b>	2.9	9.00	<b>P169-78 (3)</b>
23.7	<b>75.0</b>	<b>16.0</b>	5.1	97.0	<b>17.0</b>	7.0	11.50	<b>91</b>
24.8	30.4	20.5	0.7	57.0	20.0	2.6	5.85	P164-78 (4)
24.1	39.0	27.8	0.4	53.5	32.2	7.0	6.38	91
20.8	21.6	13.7	0.8	43.5	12.0	2.8	4.55	P185-78 (5)
12.6	13.5	15.0	0.3	22.5	12.3	7.0	3.23	91
22.0	<b>50.0</b>	<b>72.5</b>	-	-	41.0	5.4	<b>11.63</b>	<b>P167-78 (6)</b>
22.1	<b>37.0</b>	<b>31.0</b>	3.4	50.1	36.0	10.0	<b>7.00</b>	<b>91</b>
21.6	25.6	30.0	0.8	59.5	19.0	4.2	6.11	P172-78 (7)
22.8	32.0	27.0	0.4	55.2	16.1	9.0	5.80	91
23.2	45.6	45.0	1.0	70.0	47.0	2.9	9.29	P198-78 (8)
18.4	50.0	42.6	0.7	68.6	32.5	12.0	7.31	91
20.4	32.0	35.0	1.0	50.0	36.0	3.0	7.19	P201-78 (9)
26.0	27.0	26.0	0.2	52.0	22.0	6.0	5.12	91

Tab.7.1- Comparaison des caractères chimiques des eaux de puits en 1978 et en mai 91 (Les données de 1978 sont tirées de Marzouk, 1981). Les différences de concentration notables sont en caractères gras.

Si l'on compare pour la partie Ouest, en deçà du village de Lortess, qui a été la plus délaissée au profit des exploitations pionnières, on ne trouve pas de différence significative en dix ans, ni pour les conductivités électriques qui restent les mêmes, ni pour les ions les plus significatifs, Mg<sup>++</sup> et SO<sub>4</sub><sup>-</sup>.

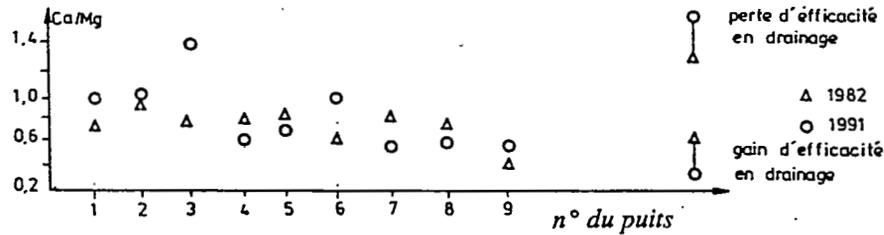


Fig.7.2- Variations du rapport Ca/Mg entre 1978 et 1991.

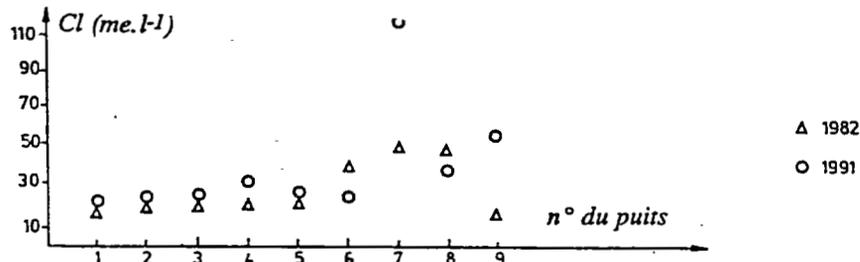


Fig.7.3- Variations des concentrations en chlore entre 1978 et 1991.

Donc il n'y a pas, sauf exception, d'évolution sensible dans le temps, ni des concentrations ni des rapports ioniques caractéristiques. Cela peut s'expliquer si l'on admet que la nappe a un écoulement permanent.

## 7.2- Evolution de la salure des sols d'oasis.

Pour voir si les profils salins et les niveaux de salure caractéristiques d'une occupation du sol sont stables dans le temps, nous avons suivi la salure de quatre parcelles représentatives pendant trois ans, avec des mesures tous les trois mois. En janvier 1990, après une année de mesures, de fortes pluies ont perturbé la répartition des sels dans le profil de presque tous les sols de l'oasis. Toutes les parcelles situées à une cote inférieure à 221 mètres, sur une superficie de 70 hectares à peu près, ont été inondées pendant plusieurs mois, y compris notre parcelle expérimentale MB. Cela nous a permis de voir comment se faisait le retour aux conditions normales, tant du point de vue de la réhabilitation par l'agriculteur, que celui du comportement des sols eux-mêmes.

Nous présenterons les expérimentations sur les parcelles, comme dans les chapitres précédents par importance décroissante de l'occupation du sol par les strates de cultures.

### 7.2.1- Evolution d'une parcelle cultivée sur trois strates (SLH).

C'est une petite parcelle de 29x13 m, bien entretenue et fumée régulièrement. Elle se situe juste en aval du chemin de fer, aux coordonnées:  $x=3100$ ,  $y=650$ . Son propriétaire est Mr. Saad Larbi Hamda.

Elle est divisée en trois lopins. Les palmiers y sont représentés par quatre variétés, Deglat, Kseba, Aaligue et Quabrichou. Cette parcelle est caractéristique de l'occupation traditionnelle en trois strates avec utilisation du maximum de variétés pour faire face à tous les besoins (oliviers, figuiers et grenadiers, mais aussi cactus et vigne). La strate au sol est essentiellement cultivée en fèves et sorgho fourrager.

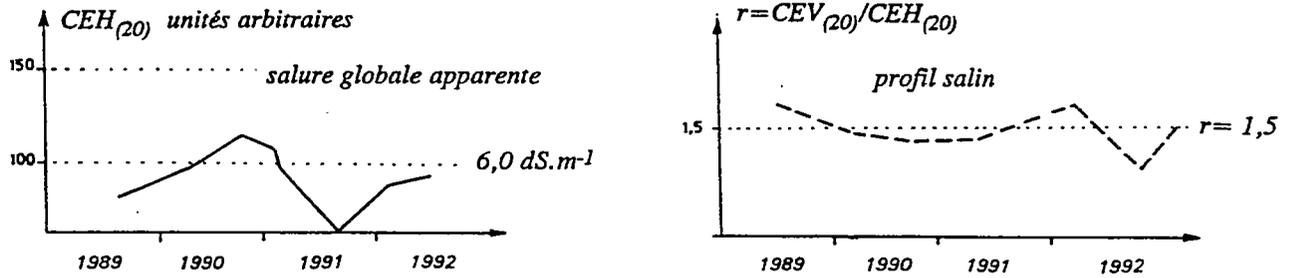


Fig.7.4- Evolution de la salure globale apparente et du profil salin de la parcelle SLH.

La salure varie peu autour de  $6 \text{ dS.m}^{-1}$  pendant deux ans. L'effet des inondations de 1990 a été bénéfique car cette parcelle n'a pas été inondée. L'eau de pluie a donc provoqué une diminution de la salure et un léger lessivage des sels.

Le profil salin est croissant en profondeur, Il y a deux fois plus de sels entre 50 et 120 cm qu'entre 0 et 60 cm.

- Analyses physico-chimiques.

Prof.	Gypse pondéral			$\theta_r$	pF27	pF42	sat%
0-20	9	7	6	23	29	21	50
20-40	11	10	6	24	24	14	52
40-80	34	14	18	24	19	9	50
80-100	51	36	38	25	20	10	50
100-120	41	72	47	38	27	18	50
mois	05	10	02	11	02		
année	90	90	91	90	90		
nappe (cm)	140	230	140				
réf.	SLH1	SLH2	SLH3	SLH4	SLH5		

Tab.7.2- Teneurs en gypse sur trois profils et caractéristiques hydriques du sol de la parcelle SLH.

Dans cette parcelle, l'horizon gypseux commence vers 80 cm et la distribution en gypse est très hétérogène (les profils SCOR, HMD, SLH (tab.7.2) sont distants de trois mètres les uns des autres. L'effet des trous de plantation de palmiers, que l'on remplit de sol non gypseux mélangé à du fumier sur 60 cm de profondeur, se fait donc sentir après quarante années.

7.2.2- Parcelle cultivée sur deux strates (MB).

C'est une parcelle à deux strates supérieures, palmiers-oliviers, de taille réduite, 14x11 mètres, située en limite sud de palmeraie (soit  $x=3050$   $y=450$  sur notre référentiel). Elle appartient à Mr. Mabrouk.

Le sol est occupé par 13 palmiers (7 Deglat, 6 Aaligue), 2 petits grenadiers, 8 oliviers de 3 à 6 ans pas encore productifs dont 3 asphyxiés en février 90, 3 figuiers jeunes et sains, 1 abricotier mort. L'irrigation se fait à partir de l'eau du forage de Ghozrane uniquement.

La parcelle a été sous l'eau pendant un mois au cours des inondations de janvier 1990. Tous les jeunes oliviers de 3 à 6 ans sont morts par asphyxie. L'effet des inondations se manifeste par une brusque augmentation de la salure (Fig.7.8), due à l'envahissement par les sels de surface remobilisés et une redistribution des sels du profil vers la surface. La parcelle retrouve en deux ans son équilibre autour de  $10 \text{ dS.m}^{-1}$  de conductivité d'extrait saturé en moyenne sur tout le profil.

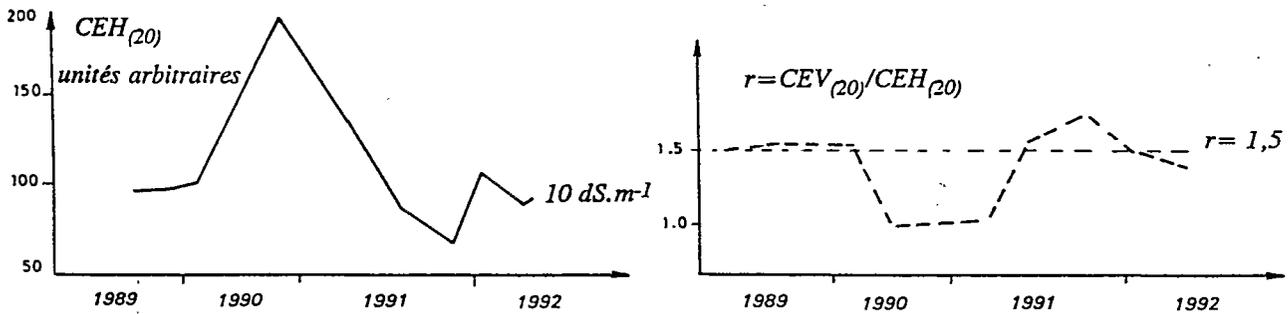


Fig.7.5- Evolution de la salure et des profils salins de la parcelle MB.

#### - Analyses physico-chimiques.

Les 20 premiers cm sont plus organiques et moins gypseux. L'ensemble du profil a une texture limoneuse, un complexe argileux à dominante illitique avec un tiers de montmorillonite saturée en magnésium. L'horizon gypseux est très homogène.

Ca	Mg	Na	Cl	SO4	CE	DpF	CalT	Gyps	$\theta$	Na	Mg	éch:G12
me/l					dS/m	%	%			me/100g		
17	5	2,2	1,3	20	1,8	7	26	5	23			0-20
27	7	4,2	4,9	32	2,7	4	22	20	20	0,9	11,5	20-40
30	8	5,4	4,9	37	3,0	4	7	54	21	1,0	9,5	40-60
30	8	6,0	4,9	37	3,0	3	9	61	21			60-80
30	9	6,6	6,6	37	3,1	3	10	60	27			80-100
30	13	7,3	7,2	39	3,3	3	6	26	26			100-120

Tab.7.3- Analyse chimique de l'extrait 1/5 et caractéristiques physico-chimiques

#### 7.2.3- Parcelle cultivée sur une strate pionnière (GL).

C'est une parcelle pionnière qui a été gagnée sur le chott en 1986 et plantée immédiatement en palmiers et oliviers. Le sol a été refaçonné en surface. L'horizon de surface salé a été découpé sur vingt centimètres et remplacé par une couche de gypse lenticulaire de quarante centimètres. Elle est donc finalement légèrement surélevée par rapport au chott originel. Les plants sont trop jeunes pour produire des fruits et trop petits pour faire de l'ombre.

On considère donc que la seule strate est celle des plantes maraîchères, oignons, fenouil et salade en hiver et au printemps, poivrons et piments en été et automne.

- Analyses physico-chimiques.

Le sol est fortement gypseux et sa texture est limono-sableuse. Il n'y a pas d'horizon anthropique.

Ca	Mg	Na	Cl	SO4	CE	DpF	Calt	Gyp	Na	Mg	$\theta$	G21
					38,0	30 22	19	12			20	0-20
29	34	110	105	71	14,2	31 22	22	16	34	8,5	23	20-40
31	28	45	49	54	8,0	35 24	21	23	30	6,2	25	40-60
27	29	45	44	57	7,3	32 21	25	58			24	60-80
23	32	42	40	56	7,2	36 24	26	66			20	80-100
28	21	30	28	51	5,9	15 9	23	74			20	100-120

Tab.7.4- Analyse des extraits 1/5, (Dec 1989), Na et Mg échangeable (me.100g<sup>-1</sup>), pF et capacité au champ  $\theta_c$  pondérale.

- Evolution de la salure.

La parcelle n'a pas été inondée, sa position légèrement surélevée lui assure un bon drainage: en conséquence, la salure d'équilibre n'est que de 5 dS.m<sup>-1</sup> malgré la proximité du chott.

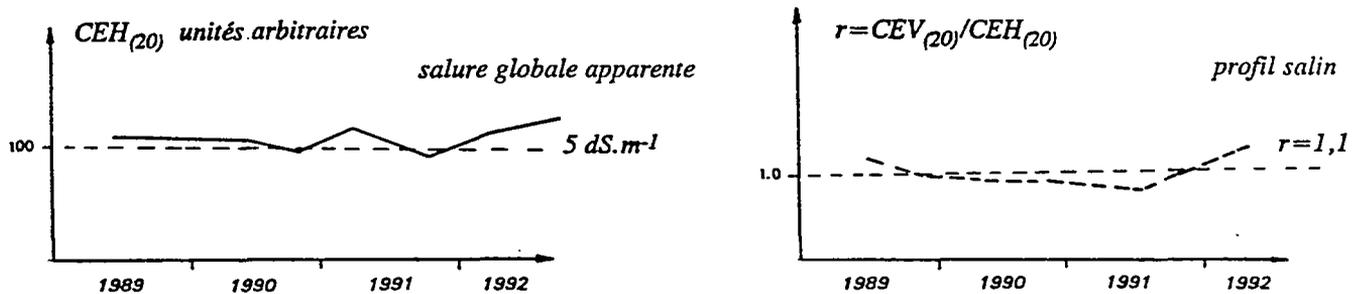


Fig.7.6- Evolution de la salure et des profils salins de la parcelle GL

La position d'équilibre se situe autour de 5 dS.m<sup>-1</sup>. Les fluctuations autour de la position d'équilibre sont faibles. Le profil salin est constant entre 0 et 120 cm.

Ce sont des conditions propres aux sols récemment mis en cultures avec une utilisation parcimonieuse de l'eau. Le lessivage est presque inexistant, mais les remontées capillaires sont évitées.

7.2.4- Parcelle cultivée sur une strate d'oliviers (FHL).

Elle est située en haut de l'oasis, juste en amont de la voie ferrée, Elle est plantée de 32 oliviers. L'irrigation y est minimum, mais les façons du sol sont faites régulièrement (sarclage et desherbage).

- Analyses physico-chimiques.

Le gypse augmente régulièrement avec la profondeur, sans que l'on atteigne un horizon d'accumulation éolienne bien caractéristique dans les deux premiers mètres (tab.7.5).

prof.	-20	-40	-60	-80	-100	-120	-140	-160	-180	-200
gypse	9	13	12	11	13	15	24	32	32	30
calc	19	18	22	26	23					

Tab.7.5- Gypse et carbonate de calcium en amont de l'oasis.

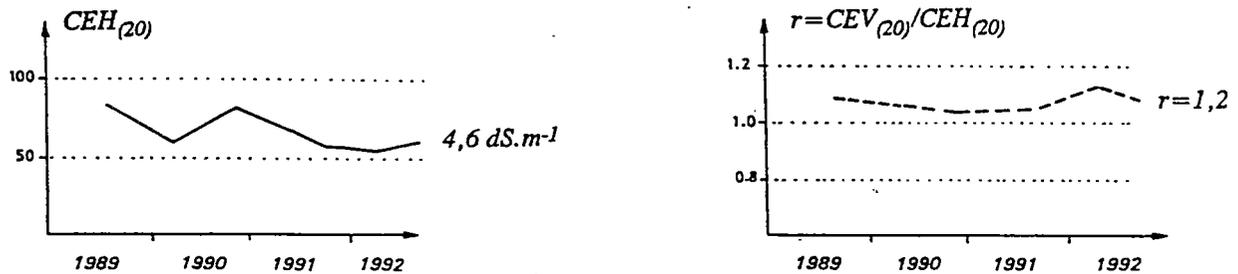


Fig.7.7- Evolution de la salure de la parcelle FH.

L'équilibre se fait autour de 4,5 dS/m. Le profil salin montre un léger lessivage. Salure et profil salins sont remarquablement stables dans le temps. Cette parcelle a un bon drainage et n'est pas soumise aux influences du chott.

### 7.3-Evolution de la salure et utilisation de l'eau.

Il y a donc une salure d'équilibre liée à l'occupation du sol et partant, à l'utilisation de l'eau qui en résulte. Pour les quatre parcelles représentatives, dont on connaît pendant trois années, la salure et la quantité d'eau utilisée pour l'irrigation, on remarque que la valeur de  $r$  est positivement corrélée à la quantité d'eau utilisée. Il y donc lessivage des sels des horizons superficiels. Plus précisément:

- FH est une olivette d'amont, caractéristique de l'ensemble des sols non salés qui n'ont pas d'étage de phoeniculture. L'eau n'y sert qu'à assurer la production d'olives,
- GI est une parcelle pionnière très productive, mais consacrée uniquement au maraîchage,
- SLH est cultivée sur trois strates et parfaitement entretenue, la salure reste notable en profondeur.
- MB est une parcelle de bordure de chott cultivée sur deux strates.

En règle générale on remarque que l'utilisation de l'eau n'est pas optimisée pour la production, puisque la parcelle qui utilise le plus d'eau est celle qui produit le moins.

- l'irrigation est menée de manière à pouvoir cultiver un nombre de strates déterminé. Ce processus met en jeu des quantités d'eau différentes et des pratiques culturelles spécifiques. Il en résulte un profil salin caractéristique qui n'évolue pas beaucoup pendant quelques années autour d'une position d'équilibre. Chaque pratique culturelle correspond à la localisation des sels dans le profil à une profondeur donnée. Ce caractère est relativement indépendant de la topographie.

La salure de l'oasis en entier dépend de la répartition des parcelles cultivées sur une seule, deux ou trois strates.

En effet, d'un côté il n'y a pas assez d'eau pour cultiver l'ensemble de l'oasis, d'un autre côté, les parcelles qui ne comportent qu'une seule strate de palmier se salinisent par remontées capillaires à partir de la nappe. Elle se détériorent donc dans le temps.

Tout l'équilibre de l'oasis dépend du nombre de parcelles que l'on peut laisser en semi-jachère (palmiers seuls non irrigués), tout en continuant à cultiver les autres.

## CONCLUSIONS GENERALES

### Quelles questions pour des sols d'oasis?

Lorsqu'il quitte le désert pour pénétrer dans une oasis, le visiteur est tout de suite étonné par l'occupation de l'espace extrêmement morcelée et très dense. Quelques pas suffisent pour le conduire d'une planche de luzerne à une planche de sorgho, quelques pas de plus le mènent à une parcelle où s'enchevêtrent oliviers, pistachiers et abricotiers, dominés par des palmiers et surmontant des fèves ou de l'orge, et ainsi de diversité en diversité, se succèdent sans ordre apparent semble-il des parcelles dans un ensemble qui paraît bien complexe.

Si ses pas le conduisent naturellement suivant la ligne de plus grande pente vers la lisière, il quittera le couvert de palmiers dattiers pour entrer sans transition dans le chott et marcher sur un sol nu, sec, couvert d'efflorescences de sels. Notre homme sort de l'oasis aussi brutalement qu'il y est entré.

Il se pose alors la question: "comment peuvent coexister les sols du chott aussi salés et dépourvus de végétation, et les sols de l'oasis portant une végétation aussi importante et comment se fait la transition ?". Quelle logique permet à ces sols, coincés entre un massif montagneux caillouteux et calcaire, sec et érodé et un grand chott gypseux et très salé, non seulement de supporter des cultures depuis des millénaires, mais aussi d'être colonisés dans une dynamique d'extension que l'on peut suivre depuis cent ans?

C'est à ces questions que nous avons essayé de répondre dans ce travail en faisant de la dynamique de sels le thème central de notre étude.

1- Nous avons d'abord replacé l'oasis dans son contexte et esquissé un schéma de mise en place des sols, étapes nécessaires à la compréhension de leur fonctionnement actuel.

2- Nous avons ensuite souligné que c'est le milieu hydrogéologique qui impose l'emplacement de l'oasis et une technique, celle des foggaras, qui détermine la forme du parcellaire.

3- Nous avons enfin montré que les sols avaient été mis en place par phases de colluvionnement alternées avec des phases de mise en place éolienne de gypse lenticulaire et d'argiles en provenance du chott et de ses environs. La présence de gypse dans les sols n'est donc pas due à une dynamique de nappe actuelle comme pourrait le faire croire l'environnement mio-pliocène et comme c'est le cas dans d'autres oasis du Sud tunisien.

4- Après avoir élucidé ce processus, nous avons essayé de montrer quelle était la dynamique spatio-temporelle des sels dans les sols mis en culture.

#### Dans l'espace, d'abord:

Il y a trois niveaux de variabilité de la salure des sols dans l'espace:

- celui de la parcelle.
- celui du système d'occupation du sol des parcelles,
- celui de l'oasis en entier.

Nous avons montré que ces variations apparentes sont l'effet d'un fonctionnement qui dépend du degré d'occupation des sols, donc de leur exploitation en étages de cultures par une, deux ou trois strates de végétation et de leur entretien.

Dans chacun des cas, les sels sont maintenus par une irrigation appropriée à une profondeur qui convient à la production recherchée, et la salure des sols est différente.

Ces deux résultats originaux nous permettent de résoudre successivement tous les niveaux de variabilité de la salure et d'appréhender la dynamique des sels dans un milieu complexe et surtout d'en tirer une vue d'ensemble simple avec un degré de précision satisfaisant grâce au grand nombre de mesures que nous avons pu faire.

#### Dans le temps ensuite,

Nous avons distingué deux dynamiques, une lente et une rapide.

##### *les dynamiques lentes:*

- Celle, géochimique, de l'ordre d'une génération, de la nappe et du drainage naturel, qui provoque l'accumulation des sels de magnésium d'origine dolomitique dans la nappe du chott. Elle est indépendante de l'irrigation et ne dépend que de la topographie.
- Celle, due à l'irrigation, qui provoque une localisation des sels dans le profil et des niveaux de salure caractéristiques suivant le degré d'occupation du sol, que nous avons suivi pendant trois ans, mais qui se perpétue tant que dure la gestion des eaux et des sols par une, deux ou trois strates. C'est la plus importante. Elle est relativement indépendante des caractères intrinsèques du sol qui ont conduit à leur différenciation.

##### *Les dynamiques rapides:*

- Ce sont d'abord les remontées capillaires des sulfates de magnésium et de sodium qui précipitent avec le chlorure de sodium en surface de tous les sols d'oasis non irrigués, mais surtout dans le chott où ils sont remobilisés par les pluies qui les accumulent en bordure d'oasis, contribuant à la salure des parcelles de lisière.

- Ce sont plus rarement les phénomènes d'oxydo-réduction des sols, soumis dans le bas de l'oasis aux inondations, qui recouvrent en quelques semaines après exondation leurs caractéristiques originelles.

### Quel déterminisme pour la répartition des sels?

Quatre facteurs déterminent la distribution des sels:

1- la topographie: c'est le seul facteur propre au milieu. Il représente l'héritage pédogénétique qui n'explique plus maintenant que 60% de la distribution des sels dans l'ensemble de l'oasis,

2- le degré d'occupation des sols par les strates de cultures: il dépend du temps que l'agriculteur peut consacrer à sa parcelle et du revenu qu'il espère en tirer. Il impose un travail du sol et une gestion de l'eau qui déterminent le profil salin, donc la possibilité de cultiver les horizons superficiels,

3- la forme des parcelles: le déterminisme historique, qui impose de petites parcelles cultivées à la main, est loin d'être un handicap comme on pourrait le croire. C'est au contraire un facteur positif pour la sauvegarde de l'oasis. Car c'est la culture traditionnelle qui permet de maintenir les sels dans le sol, parcelle par parcelle, à un niveau permettant les cultures sans faire remonter la nappe. C'est aussi parce que les parcelles sont nombreuses que l'on peut se passer d'en irriguer un certain nombre, permettant ainsi aux autres de disposer de suffisamment d'eau,

4- la nature des sols: maintenir les sels dans le profil à une profondeur voulue impose une gestion de l'eau parcelle par parcelle, et un travail constant du sol. Ce travail est possible parce que le sol est gypseux et garde une structure particulière qui favorise les amendements organiques et permet son travail à la main.

### Quel enseignement pour l'étude des sels dans ces milieux?

Notre étude a montré qu'il faut disposer d'un nombre important de mesures pour élucider les répartitions spatiales à grande variabilité dans les sols.

Par contre, la simple étude des ions appariés dans la nappe, à un moment donné et à un emplacement donné, permet de prévoir la nature des sels qui vont précipiter beaucoup plus tard par concentration dans les sols, remontée capillaire et évaporation dans le chott. Il y a là un déterminisme qui n'a, à ma connaissance, jamais été signalé dans un paysage naturel.

Dans l'espace, nous avons mis en évidence deux échelles d'un même phénomène: l'enrichissement en magnésium, qui se manifeste au niveau du profil dans chacune des parcelles, et aussi dans l'ensemble de l'oasis. C'est une donnée constante dans le transfert d'échelle. On peut la prendre comme un caractère dominant du fonctionnement du milieu.

Dans le temps, on peut dire que dans les sols cultivés d'oasis, la notion de salure du sol doit être celle du profil salin plus que celle de la salure totale, l'un et l'autre pouvant d'ailleurs évoluer dans un laps de temps très court (quelques années). Les sols gypso-salins de l'oasis, sont donc avant tout des sols gypseux, momentanément salins. La même remarque s'applique à l'horizon à pseudo-gley, qui se réoxyde en quelques mois, dès que l'engorgement en eau est supprimé.

### Quel devenir pour les sols d'oasis?

La salure des sols de l'oasis est donc en équilibre avec les pratiques d'irrigation. A beaucoup plus long terme, on peut prévoir l'évolution des sols, par l'analyse fine de l'horizon gypseux, nous avons montré que:

- l'horizon gypseux n'est pas lié, du point de vue gènèse à l'action de la nappe, mais il est d'origine éolienne et l'irrigation modifie peu les caractéristiques morphologiques du matériau constitutif. Par contre ses caractéristiques mécaniques sont radicalement modifiées.

la dynamique du gypse, très peu marquée, se manifeste par deux aspects:

- par l'effet de l'irrigation à l'intérieur de l'oasis, par l'apparition de traces de remobilisation du gypse dans les sols des parcelles très irriguées et par l'apparition de quelques roses des sables de réprécipitation au voisinage de la nappe,

- par l'effet des conditions climatiques dans le chott, les pluies d'automne triant les particules de surface et le vent les remobilisant ensuite.

Il n'y a pas de formation d'encroûtement. L'irrigation et le travail des sols sont plutôt bénéfiques.

Il y a donc bel avenir pour ces sols gypseux particuliers qui ont acquis une mauvaise réputation au Moyen-Orient, surtout en raison de leur mauvaises propriétés mécaniques.

### Généralisation et prospective.

Les études que nous avons mené peuvent être dans un premier temps transposées, mutis mutandis, à d'autres oasis dans lesquels les sols, la topographie, les sels et la gestion de l'eau existent avec la même diversité spatio-temporelle.

Dans un deuxième temps, une démarche similaire à celle que nous avons entreprise avec comme variable la salure du sol, peut être répétée avec une autre variable, l'ETP par exemple. On pourrait alors peut-être élucider le fonctionnement bioclimatique d'un oasis, (ou d'un autre milieu à forte variabilité spatiale). Cette démarche nous a paru riche de possibilités pour aborder l'étude de systèmes complexes, comme le sont souvent, sinon toujours les milieux naturels.

\*\*\*\*\*