

T D M
TRAVAUX ET DOCUMENTS
MICROFICHÉS

N° 100

F2

LES SOLS SALÉS DE L'OASIS D'EL GUETTAR (SUD TUNISIEN)

Jean-Olivier JOB

CRISTOM
Editions

ACADEMIE DE MONTPELLIER
UNIVERSITE MONTPELLIER II

THESE

Présentée à l'Université Montpellier II- Sciences et Techniques du Languedoc

pour obtenir le DIPLOME DE DOCTORAT

Formation Doctorale: Bases de la Production Végétale.

Spécialité: Physiologie et Biologie des Organismes et des Populations.

LES SOLS SALES DE L'OASIS D'EL GUETTAR

(SUD TUNISIEN)

par Jean-Olivier Job

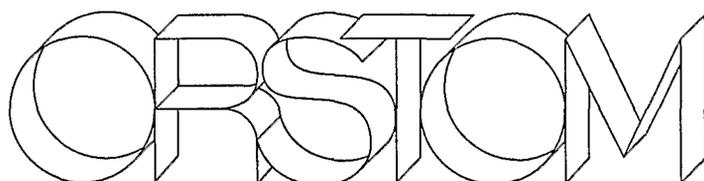
Chargé de recherche ORSTOM,

Soutenu le 21 Septembre 1992, devant le Jury composé de:

MM.:

C.	BOCQUILLON	Professeur à l' Un. Montpellier II,	Président,
C.	CHEVERRY	Professeur à l'ENSA, Rennes,	Rapporteur,
J.C.	FAVROT	Directeur de recherche INRA,	Examineur,
A.	MHIRI	Professeur à l'INAT, Tunis,	Examineur,
J.C.	REMY	Professeur à l'ENSA, Montpellier,	Examineur,
E.	SERVAT	Professeur à l'ENSA, Montpellier,	Examineur,
M.	RIEU	Directeur de recherche ORSTOM,	Rapporteur,
V.	VALLES	Chargé de recherche INRA,	Examineur.

TDM 100



Editions de l'ORSTOM

L'INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE
POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

Collection :

Travaux et Documents Microédités

PARIS 1993

ISBN : 2-7099-1148-5

© ORSTOM

«La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les «copies ou reproductions « strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective» et, d'autre part, que les « analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et « d'illustration, «toute représentation ou reproduction intégrale, « ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses « ayants droit ou ayants cause, est illicite» (alinéa 1er de l'article 40).

« Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par « les articles 425 et suivants du Code pénal.»

F 2

AVANT-PROPOS

Ce travail est le fruit d'un long cheminement pendant lequel j'ai rencontré beaucoup de personnes que je tiens à remercier à des titres divers:

Pour avoir été à l'origine de cette thèse, Mr. Emmanuel Servat, professeur à l'ENSA de Montpellier, et Mr. Mohsen Hamza, directeur des Sols de Tunisie, qui a conduit en 1978 ma première tournée de terrain sur les sols gypso-salins du Sud tunisien dans le cadre d'une mission que je faisais comme expert de la Ligue Arabe.

Pour avoir accepté de diriger ce travail avec beaucoup de compétence et de gentillesse, Mr Jean-Claude Remy, professeur à L'ENSA de Montpellier.

Pour m'avoir accompagné sur le terrain et aidé dans la collecte des données de base: Mr Marai Mohammed, pédologue de la direction des sols, Mr Naceur Hamda, vulgarisateur au Ministère de l'Agriculture, Mr Malek, responsable du projet de rénovation des oasis de Gafsa, et enfin Mr. Gley Bouchoucha qui m'a tant appris sur l'oasis et le palmier.

Pour les séances de travail qu'ils m'ont consacré: MMs, Claude Cheverry, professeur de sciences du sol à l'ENSA de Rennes, Jean-Yves Loyer, Roger Pontanier, Michel Rieu, pédologues à l'ORSTOM, Adrien Herbillon vice-président de la CS2, Alain Tabbagh professeur à l'université de Paris VI, Jean-Claude Remy, professeur à l'ENSAM, Catherine Pierre, géochimiste à Paris VI, Thierry Lebel, hydrologue et Gérard Cochonneau informaticien à l'ORSTOM, Ahmed Mamou, hydrogéologue à la Direction des Eaux et Mohamed Hachicha pédologue à la Direction des Sols à Tunis, Marc Voltz, Jean-Claude Favrot, pédologues à l'INRA de Montpellier, Vincent Vallès, pédologue à l'INRA d'Avignon.

Pour leurs conseils et leur aide en analyse des sols: Mireille Delaune, Ginette Millau et Francis Sontag, chimistes à L'ORSTOM, André Guyon et Gérard Souche techniciens à l'ENSA de Montpellier, Hedi Hamrouni, chimiste à la Direction des Sols à Tunis.

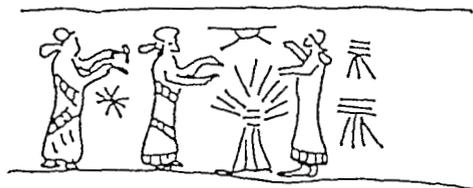
Pour la simulation de pluie MMs Sadok Agrabaoui et Bessim Dridi.

Pour la détermination des plantes, Edouard Le Floch phytosociologue au CEPE-CNRS à Montpellier.

Enfin, pour leur collaboration occasionnelle: tous les pédologues et hydrologues de l'ORSTOM et des organismes étrangers avec lesquels j'ai pu échanger des idées au cours de mes affectations successives en Ethiopie, Nouvelle-Calédonie, Viet-Nam, Sénégal, Syrie, au Proche-Orient, et en Tunisie.

Pour tout le temps qu'ils m'ont sacrifié, je remercie mes parents, ma femme Annie, mes enfants Sébastien et Nicolas, et je leur dédie ce travail.

Tunis, le 2 Août, 1992.



Cérémonie de fécondation du palmier-dattier.
Sceau-cylindre babylonien, début du 2ème millénaire,
agate, empreinte en grandeur réelle (Coll., pers.).

Réalisation:

Les graphiques sont de Mr Hassen Ghoula (ORSTOM, Tunis),
l' image SPOT a été traitée au CNT (Tunis) par Mr Ben Moussa,
les diagrammes de rayons-X sont de Mme Ginette Millau (ORSTOM, Bondy),
les photos au MEB de Mr André Guyon (INRA, Montpellier),
le dessin de la page 40 de Mme Martine Lacomme (ORSTOM, Montpellier),
les figures, les photos et la frappe sont de l'auteur.

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 piémont caillouteux calcaire à une sebkha très salée.

La mise en place des sols est le fait de 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 oasien, 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 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 oasien 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 piémont-oasis-sebkha est détaillée quantitativement et qualitativement. Les sels potentiellement précipitables en aval, dans le chott, préexistent à l'état d'ions appariés en tout point de la nappe phréatique de l'oasis. 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 des 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, les sols gypseux d'origine éolienne conviennent bien à la phoeniciculture. L'irrigation traditionnelle est pratiquée de manière à maintenir les sels à l'intérieur du profil à une profondeur qui varie suivant le degré d'occupation du sol par une, deux, ou trois strates. Il y a un équilibre très stable entre les sols et les cultures en dépit de la salure élevée des sols et de l'insuffisance globale des quantités d'eau disponibles. Les techniques de culture permettent même le retour à l'équilibre après bouleversement des conditions géochimiques par des inondations.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I- PROBLEME ET METHODE.

- 1.1- Le problème posé et son contexte.
- 1.2- La démarche et la méthodologie utilisées.

PREMIERE PATRIE- PRESENTATION DU MILIEU.

CHAPITRE II- LE MILIEU NATUREL.

- 2.1- Introduction.
- 2.2- Plan de situation et limites.
- 2.3- Climat et bioclimat.
- 2.4- Géologie et hydrogéologie.
- 2.5- Végétation.

CHAPITRE III- LE MILIEU ARTIFICIALISE.

- 3.1- Cultures oasiennes.
- 3.2- Fonctionnement agronomique.
- 3.3- Gestion de l'eau.
- 3.4- Colonisation des bordures amont et aval.
- 3.5- Conclusion partielle: ressemblance avec d'autres sites.

DEUXIEME PARTIE- REPARTITION SPATIALE DES SOLS ET DE LEURS SELS.

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

- 4.1- Choix de la méthode.
- 4.2- La conductivimétrie électromagnétique.
- 4.3- Modalités de mise en application.

CHAPITRE V- LES SOLS DANS LE PAYSAGE NATUREL.

- 5.1- Introduction.
- 5.2- Le paysage amont: le piemont non salé.
- 5.3- Le paysage aval: le chott salé.
- 5.4- L'horizon gypseux naturel.
- 5.5- Mise en place des sols de bas de pente.
- 5.6- La nappe phréatique: le véhicule des sels.
- 5.7- Classification et répartition dans le paysage.
- 5.8- Toposéquences.

CHAPITRE VI- DIFFERENCIATION DES SOLS PAR ANTHROPISATION

- 6.1- Evolution de l'horizon gypseux.
- 6.2- La salure en fonction du degré d'occupation du sol.
- 6.3- L'analyse de la variabilité intraparcellaire.
- 6.4- Analyse de variance.
- 6.5- Répartition des sels dans le paysage.
- 6.6- Comportement de chaque classe d'occupation du sol.
- 6.7- Représentation de la structure spatiale.
- 6.8- Conclusions partielles.

TROISIEME PARTIE- LES VARIATIONS DE LA SALURE DANS LE TEMPS.

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

- 7.1- Transports des sels par la nappe.
- 7.2- Evolution de la salure des sols d'oasis.
- 7.3- Le rôle de l'irrigation.
- 7.4- Conclusions partielles.

CHAPITRE VIII- DYNAMIQUES RAPIDES EN BORDURE DE CHOTT.

- 8.1- Les sols cultivés de bordure de chott.

CHAPITRE IX- CONCLUSIONS GENERALES.

ANNEXES.

LEXIQUE.

TABLE DES FIGURES.

LISTE DES EQUATIONS.

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I- PROBLEME ET METHODE.

1.1- Le problème posé et son contexte.

La salure des sols est un des facteurs limitants les plus anciennement reconnus de l'agriculture en zone aride. Dès le milieu du deuxième millénaire en Mésopotamie les scribes chargés de la taxation des terres différenciaient la dégradation par les sels qui n'affecte pas le travail du sol de celle qui détruit la structure des agrégats (Jacobsen, 1982; Schwab, 1983).

Les premières études scientifiques commencent au début du siècle avec la mesure de la conductivité électrique d'extraits de sols en 1910 (Davis et Bryan). A partir de 1929 on trouve dans la littérature toutes les analyses de base faites en laboratoire jusqu'à maintenant. Suivent bientôt les grands projets de développement de terres vierges accompagnés de monographies, en URSS (Kovda, 1937), aux Etats-Unis (USSR, 1954), en Algérie (Durand, 1954), Irak (Buringh, 1960; ILRI, 1963), Tunisie (CRUESI, 1970) et en Syrie (GADEB/GERSAR, 1970; Dosso, 1980), entre autres. C'est dire l'ampleur du problème de la salure des sols, son étendue géographique, sa persistance dans le temps.

Dans ces travaux, la différence déjà entrevue par les scribes mésopotamiens au deuxième millénaire (Jacobsen, 1982) entre les sols salés et les sols alcalins est formalisée en termes de pH et de sodium échangeable. Les notions de fraction lessivante et d'échange cationique qui permettront de rationaliser le drainage et la réhabilitation des sols y sont définis et utilisés.

Parallèlement, sont éclaircis quelques mécanismes fondamentaux: dynamique des sels et fixation sur les argiles (Bower, 1959; Bolt et Page, 1965; Sposito et Mattigod 1977), précipitation-évaporation (Cheverry, 1972; Droubi, 1976; Tardy et Gac 1979), effets sur le pH (Van Bremen et Wielemaker, 1974; Bourrié, 1976) et la structure du sol. On aboutit à la modélisation des phénomènes (Truesdell, 1974; Rieu et Cheverry, 1976; Droubi et al., 1976).

Les outils sur le terrain se développent, des sondes électriques (Rhoades et Ingvalson, 1971) et électromagnétiques (de Jong et al., 1979) permettent des mesures répétées sur un espace plus vaste alors qu'en même temps se développe la théorie des variables régionalisées (Matheron, 1965; Delhomme, 1976). L'utilisation de descripteurs pertinents permet alors d'élaborer des stratégies d'échantillonnage, utiles dans les systèmes à forte variabilité spatiale (Frontier, 1977).

Introduction générale.

A cet égard, 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.

Cette permanence est l'expression d'une culture propre, organisée autour de la culture du palmier dattier, à laquelle reste attachée une dizaine de millions d'oasiens de par le monde, surtout au Proche et Moyen Orient et en Afrique Saharienne (Toutain et *al.*, 1990). A ce titre, les oasis sont actuellement l'objet de soins attentifs des gouvernements, soucieux d'y fixer les populations nomades. De nombreux programmes de développement y sont entrepris (Larbi, Bisson 1990).

Le problème est important en Tunisie où presque tous les oasis sont affectés par les sels à des degrés divers (Hachicha et Job, 1990) et où le paysage porte immanquablement les marques de la chromatographie des ions dans le paysage.

La sauvegarde de ces milieux y revêt une importance particulière du fait de la mobilisation de la quasi totalité des ressources en eau (El Bathi, 1992). Les moyens mis en oeuvre, forages et extensions remettent en effet en question les équilibres entre les sols, les eaux et la végétation.

1.2- Démarche et méthodologie.

Pour mieux cerner les modalités de ces équilibres et les risques de perturbation du système oasien, nous allons aborder le fonctionnement d'une oasis traditionnelle en milieu salé dans le Sud Tunisien. Que la modestie du terroir, cinq cent hectares, ne trompe pas, son étude offre un double intérêt:

- 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'explicitier 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.

1.3- Notations.

Dans la suite du texte nous emploierons les termes et notations suivantes:

- **salure d'un sol**: conductivité électrique d'un extrait aqueux d'un sol amené à saturation, exprimé en dS.m^{-1} (unité S.I), indépendamment de la nature des sels présents en solution.

- **salinité d'un sol**: notion qualitative, que l'on peut préciser en fonction des rapports de concentrations ioniques. La salinité sera chlorurée-sodique, ou sulfatée-magnésienne par exemple.

- **conductivité électromagnétique**: conductivité électrique propre du sol et de la solution du sol mesurée sans perturbation entre 0 et 120 cm en analysant le comportement d'un champ magnétique envoyé par des bobines inductrices dans le sol. On la notera CEM si on parle de la méthode, et CEV ou CEH si l'on se réfère aux résultats bruts obtenus par une configuration verticale (CEV) ou horizontale (CEH) des bobines par rapport au sol. La mesure est exprimée en mS.m^{-1} .

- **salure apparente globale**: soit CEst la valeur de CEH transformée en conductivité électrique moyenne d'extrait de pâte saturée du sol, entre 0 et 120 cm de profondeur. La transformation, se fait à l'aide d'une équation linéaire du premier degré déterminée empiriquement (cf. page 49).

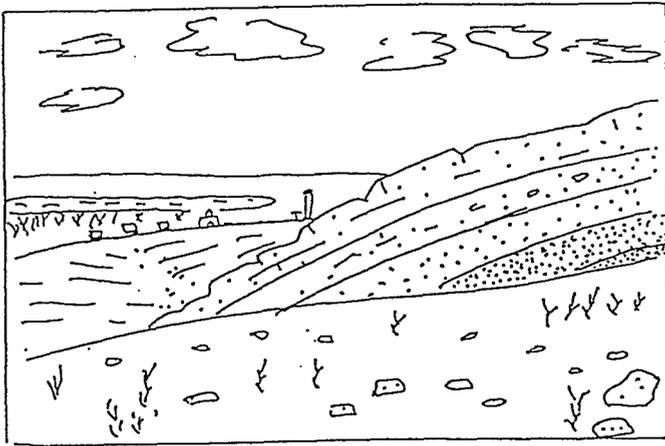
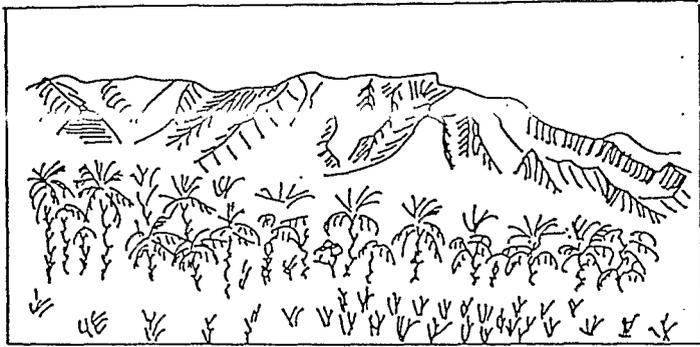
- variables électriques et électromagnétiques ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$).

CE	: conductivité électrique en général,
CEst	: conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée,
CEcn	: conductivité électrique de l'extrait aqueux au cinquième,
CEdx	: conductivité électrique de l'extrait aqueux au dixième,
CEM	: conductivité électromagnétique en général,
CEV	: mesure CEM, mode vertical en surface du sol,
CEH	: mesure de CEM en mode horizontal,
CEH(Θ)	: mesure de CEH corrigée pour la teneur en eau pondérale: Θ_p .

- variables physico-chimiques.

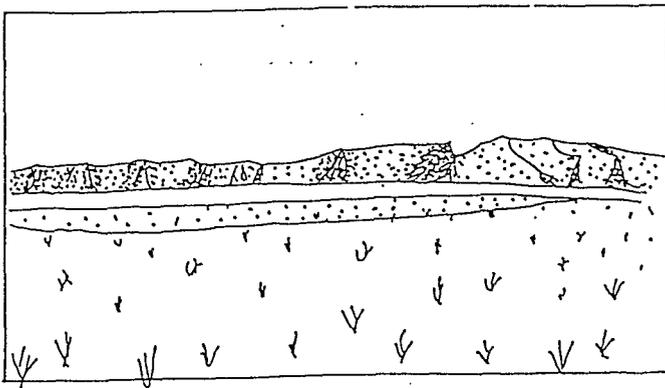
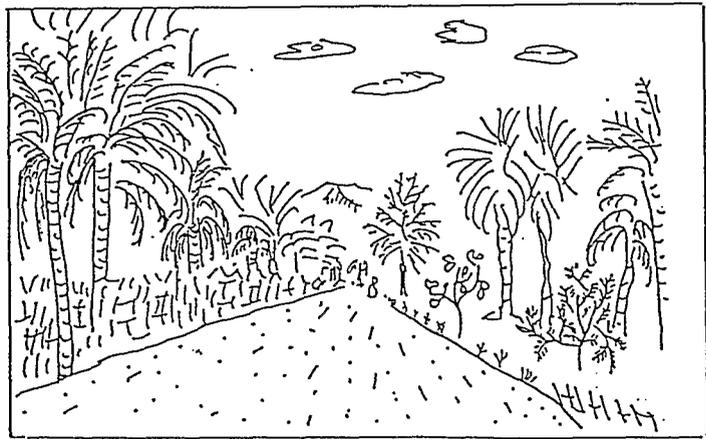
Θ_v	: teneur en eau volumique du sol,
Θ_p	: teneur en eau pondérale,
[Ion]	: molarité de l'espèce ionique Ion en moles.l ⁻¹ ,
(Ion)	: activité de l'espèce ionique Ion,
Z _i	: valence de l'ion i,
I	: force ionique de la solution en moles.l ⁻¹ ,
f _i	: coefficient d'activité de l'ion i en solution.

PL.1.1- El Guettar: vue générale
depuis le chott.



PL.1.2- Vue de l'oasis d'El Guettar à partir du piedmont de l'Orbata. Au premier plan: le plissement du Zebbag inférieur. Au deuxième plan le cône de déjection de l'oued Tineflou. Au troisième plan l'oasis et le village de Lortess. Au quatrième plan le chott.

PL.1.3- Entrée de l'oasis à Sqaq El Bel (en arrière plan le Jebel Orbata).



PL.1.4- Le chott vu d'Est en Ouest. En pointillé un ancien cordon dunaire arasé.

PREMIERE PARTIE- PRESENTATION DU MILIEU

CHAPITRE II- LE MILIEU NATUREL.

2.1- Introduction.

Le but de ce chapitre est de situer plus précisément l' oasis d'El Guettar par rapport aux oasis continentales tunisiennes et nord-africaines situées dans un environnement similaire, mais aussi d'expliquer les contraintes climatiques propres auxquelles notre système est soumis.

En effet, les oasis se développent en zone aride et saharienne sous des pluviométries le plus souvent inférieures à 150 mm. Il en résulte une forte opposition avec le milieu naturel (El Amami, 1968) qui apparaît sous deux aspects principaux:

- Le premier et le plus important, commun à toutes les zones arides, est la grande variabilité de la pluviométrie, avec comme corollaire la faiblesse chronique des précipitations et la grande violence des pluies exceptionnelles qui peuvent modifier sensiblement la répartition des sels dans notre système.
- Le deuxième, propre à notre objet, est lié au caractère continental du milieu et à la petitesse des surfaces cultivées par rapport au désert. Il se manifeste par une grande variabilité de l'ETR à l'intérieur de l'oasis due soit aux effets de bordure soit à l'hétérogénéité de l'insolation au sol d'un point à un autre. Il s'en suit une répartition des cultures en fonction des conditions d'ensoleillement qui n'est pas sans influence sur le régime salin des sols.

Enfin, la situation présaharienne laisse entrevoir le rôle du vent comme agent de formation des sols.

Nous n'aborderons donc du climat que la pluviosité, l'ensoleillement et le régime des vents qui rendent compte de l'organisation de l'oasis et permettent la comparaison avec d'autres oasis.

2.2- Plan de situation et limites.

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.2.2).

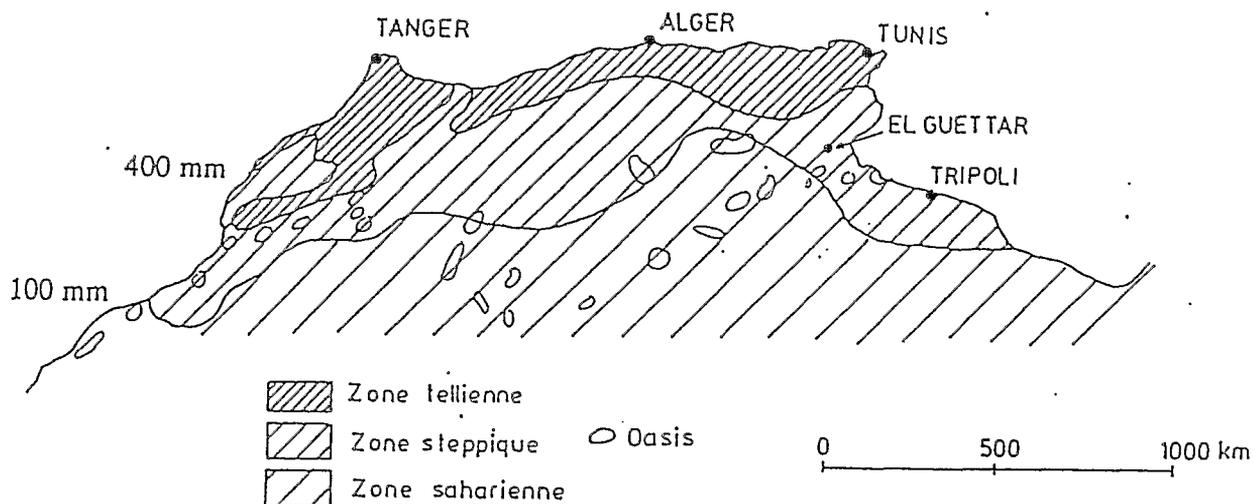


Fig.2.1- Situation d'El Guettar par rapport aux oasis nord-africaines. Les limites des zones telliennes, steppiques et sahariennes sont les isohyètes 400, et 100 mm.

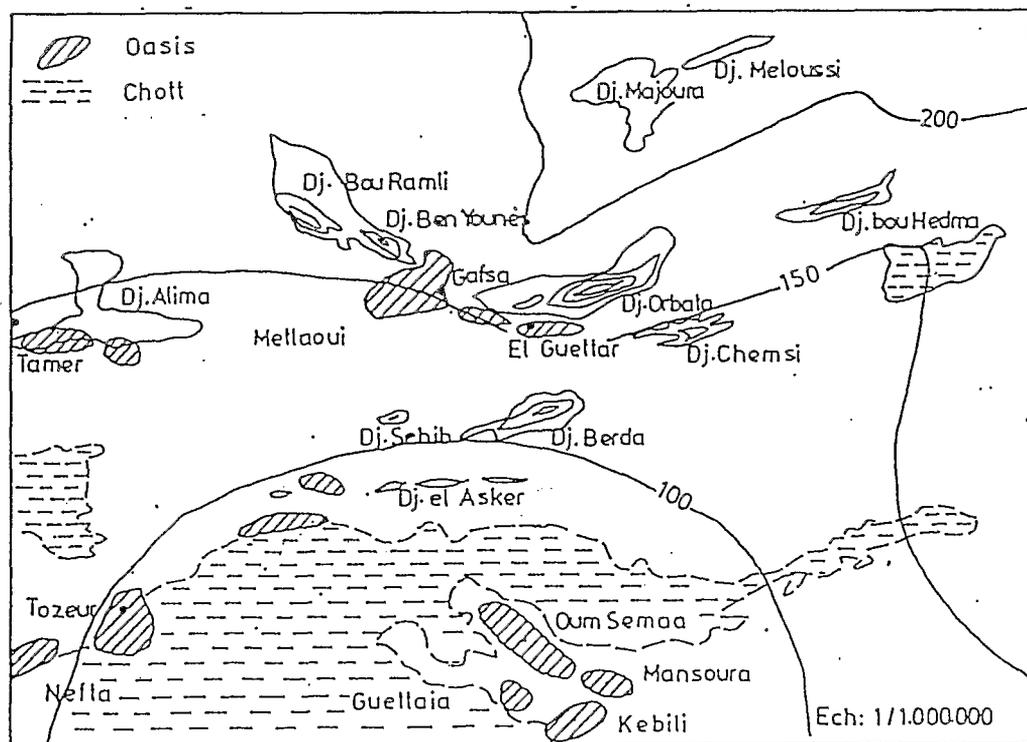


Fig.2.2- El Guettar et les oasis du sud de la Tunisie. Situation des isohyètes 100, 150 et 200 mm.

L'oasis d'El Guettar est orientée d'Est en Ouest sur six kilomètres au pied du Jebel Orbata (fig.2.3 et 2.4).

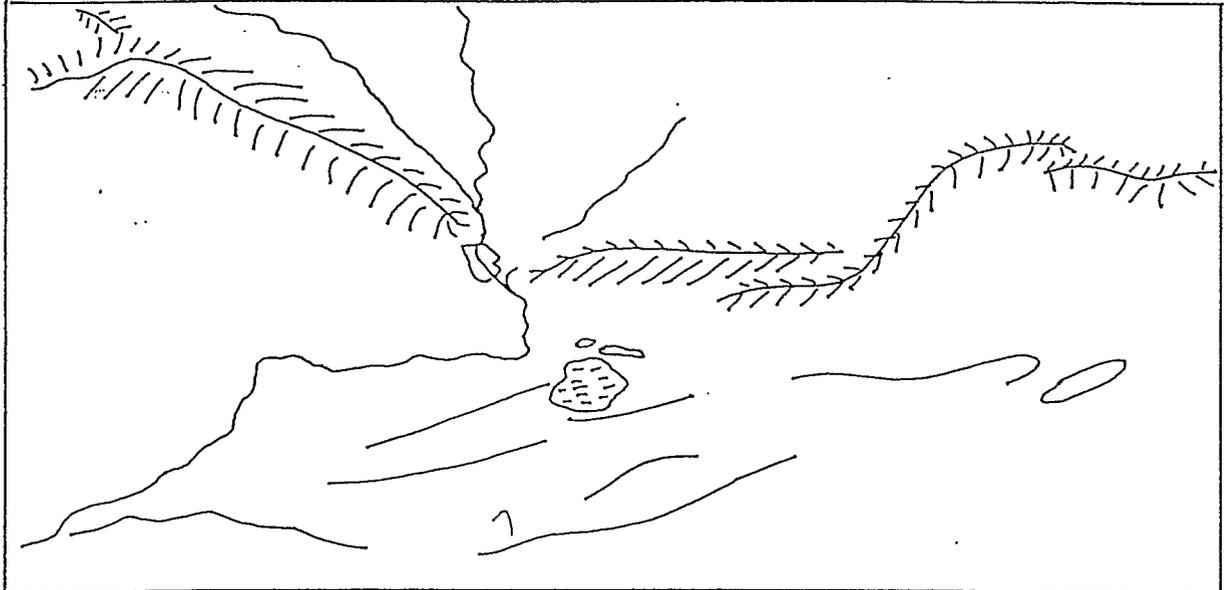


Fig.2.3- L'oasis et le chott d' El Guettar au pied du Jebel Orbata (Landsat 2, du 29 mars 79, traitement Direction des Sols, Tunis, échelle 1cm = 7km).

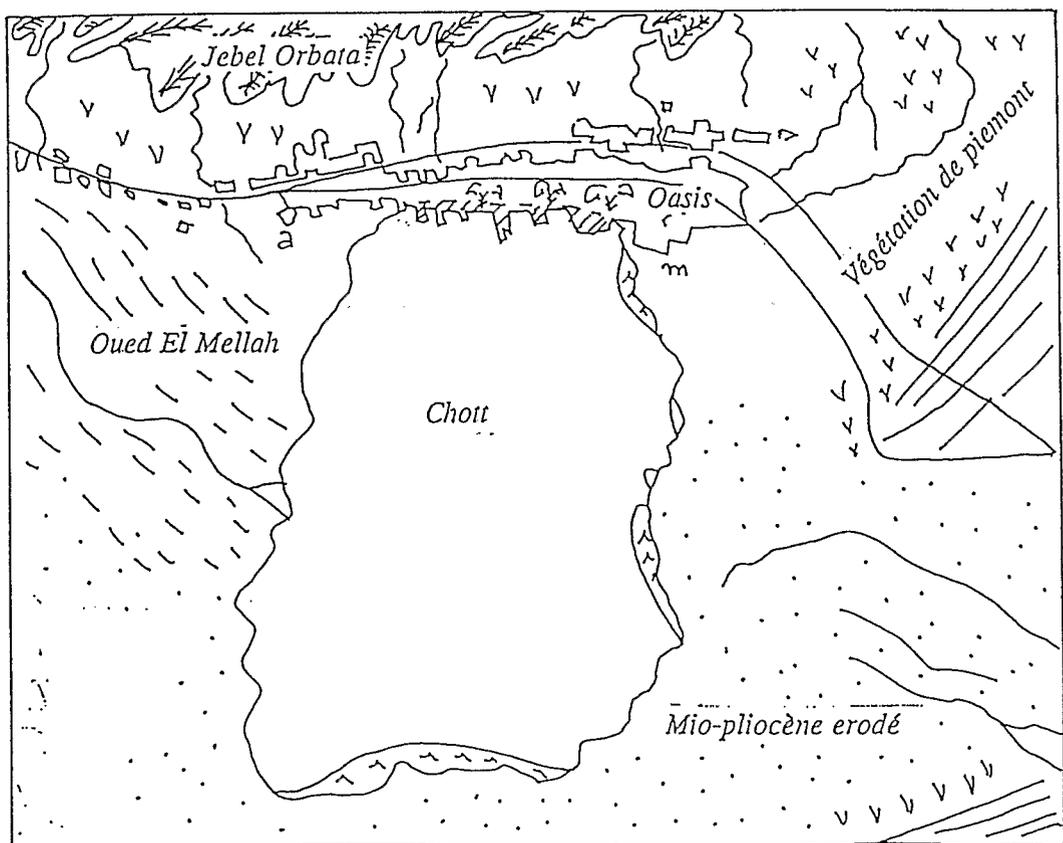


Fig.2.4- El Guettar: le chott inondé (image SPOT du 03/02/90, traitement Centre National de Télédetection, am= 5200 m).

-Limites de l'étude.

Notre étude comprend toute l'oasis, qui apparaît en rouge sur l'image SPOT au nord du chott. Cela représente cinq cents hectares. Les sols affectés par les sels sont situés en bordure du chott à l'aval de la voie ferrée. Ils correspondent sensiblement à la zone en noir, intersection du chott et de l'oasis, sur cette même image.

2.3- Climat et bioclimat.

La région de Gafsa se trouve très exactement à la charnière entre la zone aride à nuance continentale et la zone saharienne. Au Nord de la trouée de Gafsa, la steppe de Kairouan subit une longue saison sèche de 8 à 12 mois avec une pluviométrie de 150 à 300 mm. Au Sud, la pluviométrie diminue fortement, les caractères méditerranéens s'estompent, la végétation saharienne à *Retama raetam* fait son apparition.

Du fait de sa position intermédiaire et de l'importance relative des reliefs par rapport à la topographie générale, l'instabilité du climat et du meso-climat est le caractère prédominant.

L'influence saharienne se fait sentir en été et en automne par des vents de sable (Perusset 1954) tandis que l'influence méditerranéenne se manifeste par un régime de pluies irrégulier.

Protégé au Nord par le Jebel Orbata, l'oasis bénéficie de conditions climatiques particulières en ce qui concerne l'exposition aux vents.

2.3.1- Pluviosité et régime des vents.

Le caractère principal de la pluviosité est sa grande variabilité dans le temps. En effet, pour la station de Gafsa, située à 15 km à l'ouest de l'oasis, sur 94 années, le mois le plus pluvieux est mars et celui où les pluies sont les plus fréquentes est mai, alors que sur les dix dernières années, le mois de décembre remplit ces deux conditions. A l'exception du mois de juillet pendant lequel aucune pluie n'a été enregistrée depuis 10 ans, la variabilité des pluies affecte les mois secs comme les mois pluvieux.

jan.	fev.	mar.	avr.	mai	juin	août	sep.	oct.	nov.	dec.	tot.
11,5	18,0	14,0	11,8	8,3	5,0	8,0	13,4	20,0	11,0	22,0	143

Tab.2.1- Pluviosité moyenne mensuelle à El Guettar entre 1978 et 1988. La valeur du mois d'août est due à deux pluies de 44 et 22 mm respectivement en 1979 et 1987. Il n'y a pas de pluies en juillet pendant cette période.

De plus, si on considère qu'il faut huit à dix ans pour qu'une plantation de dattiers entre en rapport, et que l'on examine les pluies décennales, on voit que la variabilité à l'intérieur de cet intervalle est encore grande (tab.2.2).

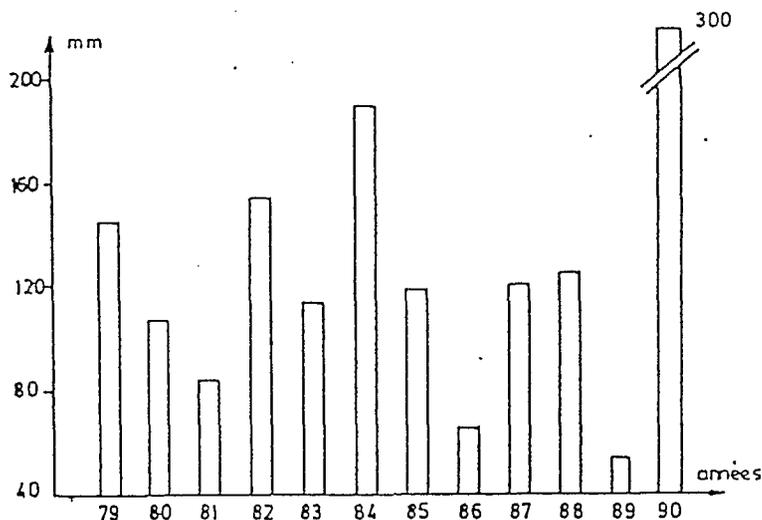


Fig.2.5- Pluviométrie moyenne annuelle des dix dernières années à Gafsa (mm).

années	1950-60	1961-70	1971-80	1981-89
P10 (mm)	163	169	204	139

Tab.2.2- El Guettar: pluviométrie moyenne par décennie.

Il s'en suit que toute prévision d'irrigation en fonction de la pluie est difficile, quelle que soit l'échelle de temps choisie, semaine pour la conduite de toutes les cultures, mois pour la maturation des fruits et décennie pour le démarrage des jeunes plantations. De fait, l'irrigation se fait à tour d'eau fixe avec tous les inconvénients que nous évoquerons au chapitre III.

Nous n'avons pas de données sur la variabilité des pluies dans l'espace, mais on peut comparer El Guettar à d'autres oasis en Afrique du Nord. Pour cela, posons:

- P_i : pluviométrie de l'année i ,
 P_m : pluviométrie moyenne mesurée sur n années,
 e : $\frac{\sum |P_i - P_m|}{n}$,
 i : $\frac{\sum |P_i - P_m|}{(nP_m)}$.

On obtient deux indices caractéristiques de la variabilité interannuelle, e et i , qui rendent possibles les comparaisons. Une forte valeur de i signifie une grande variabilité, à pluviométrie totale de même ordre (Tab.2.3).

Oasis	e (mm)	Pm	i=e/Pm	Lieu
Touggourt	28	57	0,48	Maroc
Rissani	30	83	0,36	Maroc
Tozeur	33	78	0,42	Tunisie
Tata	37	77	0,48	Maroc
El Guettar	61	165	0,36	Tunisie

Tab.2.3.- Variabilité de la pluie: comparaison d' El Guettar avec quelques oasis sahariennes du Maroc, et celle de Tozeur, située à 120 km au Sud-Ouest (d'après Vittoz, 1989, modifié).

On voit que notre oasis diffère des autres surtout par la quantité de pluie qui y tombe. Mais n'oublions pas que nous sommes en limite Nord de la région phoenicicole en Afrique.

2.3.2- Le régime des vents.

Le village et l'oasis d'El Guettar sont situés en bordure d'une sebkh* de 36 km² (* cf. lexique page 146). On sait que dans ces formations, (Coque, 1955; Trichet, 1967; Perthuisot, 1975; Safar, 1983) le paysage peut porter les marques du façonnage éolien. Dans notre cas, deux directions de vents dominant:

- Les vents de secteur Nord-Est, appelés jebeli (de la montagne) ou chimali, (du Nord), sont provoqués par la turbulence et l'instabilité verticale qui règne au voisinage des fronts froids. Ce sont les vents les plus fréquents, mais leur effet direct est négligeable car l'oasis en est protégé par les Jebel Orbata et Chorta.

- Les vents d'hiver de secteur sud-ouest soufflent à une vitesse supérieure à 7 m.s⁻¹ avec une fréquence de 10% (Sassi, 1962). Les vents de sable de même secteur, khamsin ou sirocco, sont quant à eux provoqués par les perturbations sahariennes qui circulent de SW à NE de juin à septembre (Perusset, 1954).

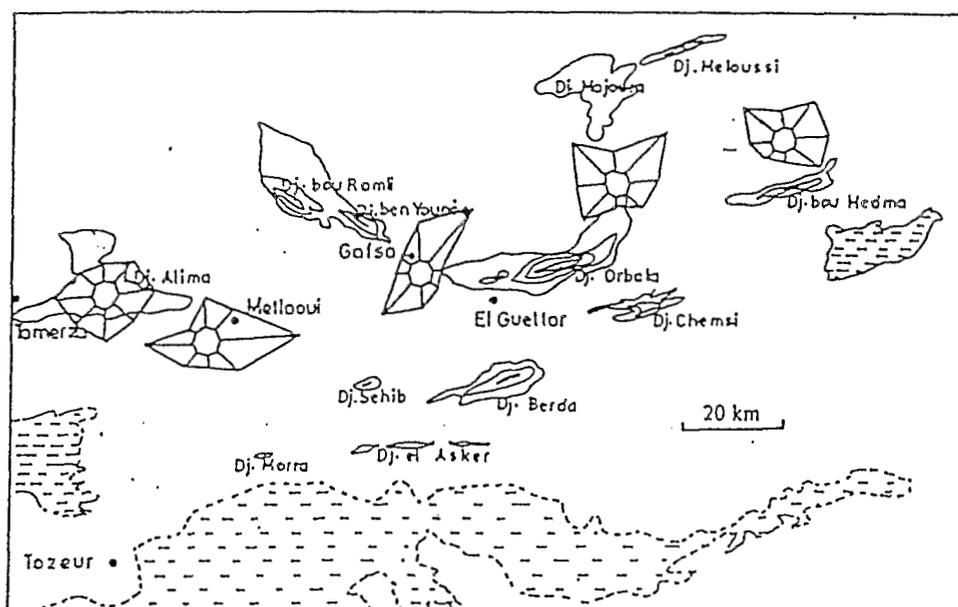


Fig.2.6- Régime des vents actuels dans la région de Gafsa (FAO, 1965).

* Voir lexique en fin de volume.

Ils atteignent des maxima d'intensité à 17 m.s^{-1} pendant une quinzaine de jours par an. La visibilité horizontale est alors inférieure à 2 km. Ce sont ces derniers, peu fréquents, mais violents qui peuvent provoquer les accumulations de cristaux de gypse et le voile* limono-argileux que l'on trouve sur le bas des piemonts du Jebel Orbata. Nous y reviendrons par la suite, car ce processus participe à la formation des sols.

2.3.3- Insolation.

Le palmier dattier est exigeant en chaleur et soleil. Le zéro végétatif se situe vers 10°C et la maturation, de mai à octobre, requiert une somme de maxima journaliers pendant cette période supérieure à 3000°C ., pour la variété noble Deglet Nour (Swingle et Mason, in El Fekih, 1965).

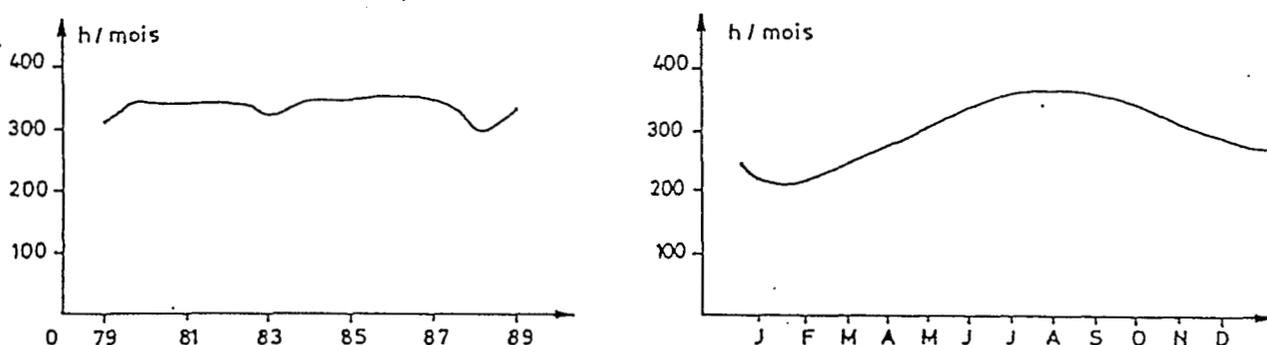


Fig.2.7- Insolation en moyenne annuelle et mensuelle moyenne (période: 1979-1989).

La variation interannuelle de l'ensoleillement sur 10 ans est faible surtout en septembre et décembre. De tous les facteurs climatiques c'est le moins variable. Cela explique en partie le succès de la phoeniciculture diversifiée, si l'on sait que les variétés précoces de dattes (Ftimi, Kenta) mûrissent en Septembre et les variétés tardives (Deglat) en décembre à El Guettar et que l'ensoleillement au moment de la maturation détermine la qualité du fruit.

2.3.4- Evapotranspiration à Gafsa.

L'évaporation dépend des gradients de pression de vapeur saturante, du vent et de la température au dessus du sol. Ces trois gradients sont très différents selon que l'on se trouve à l'extérieur de l'oasis, où le sol est sec et ouvert à l'air libre ou bien au milieu de l'oasis, à l'intérieur de ce qu'on appelle l'anneau de garde protecteur (Bouchet, 1963). Il faudrait donc pour faire un bilan des sels précis de l'oasis, calculer l'ETP pour chaque partie suivant la formule (Riou 1977):

$$\text{ETP} = a_1(e_1 - e_2)^{k_1} + a_2 R^{k_2} \quad (1)$$

où: a_1 , a_2 , k_1 et k_2 sont des constantes, R le rayonnement et $(e_1 - e_2)$ le déficit de saturation de l'air mesuré à deux hauteurs au dessus du sol (en mm de Hg).

Les deux termes sont également importants en culture découverte, mais à l'intérieur de l'oasis, le rayonnement diminue et $(e_1 - e_2)$ est nettement prépondérant. En effet les courbes de tension de vapeur d'eau y sont très différentes à 50cm et à 150 cm du sol: la différence peut atteindre entre 1 et 3 mm de Hg suivant l'heure (El Amami, 1968; Amami, 1983). La chute d'ETP correspondante à ces deux niveaux peut atteindre 80% suivant les mesures faites à El Arfiâne près de Gabès, par exemple (El Amami et Laberche, 1973).

Le terme $(e_1 - e_2)$ dépend physiquement de l'humidité relative de l'air et de la température (El Amami et Laberche, 1973; Riou, 1990). Du point de vue agronomique c'est la densité des arbres, la rugosité du couvert végétal, la vitesse du vent, la distance au sol et la distance au bord de l'oasis qui vont jouer. Examinons quelques uns de ces facteurs.

la vitesse du vent:

La vitesse horizontale V_z du vent à la hauteur z au dessus du sol est donnée par le modèle de Cionco (1985)

$$V_z = V_h \cdot e^{[a(z/h-1)]} \quad (2)$$

où:

- h : c'est la hauteur des arbres, soit 10 m en moyenne pour les palmiers d'El Guettar,
 a : est un coefficient d'extinction qui dépend du couvert végétal.

Le coefficient a a été évalué à 1,8 par A., Amami (*in* Riou, 1990) à Jemna près de Kébili dans une oasis traditionnelle plantée en palmiers écartés de 8 m avec une strate de grenadiers et une strate au sol. Cet auteur a montré que la vitesse du vent à 2 mètres du sol était 6 fois plus petite dans une oasis traditionnelle que dans le désert environnant, alors que pour une oasis moderne plantée en palmiers seuls, espacés de 10 m, la chute de vitesse induite par l'oasis n'est que d'un facteur 2.

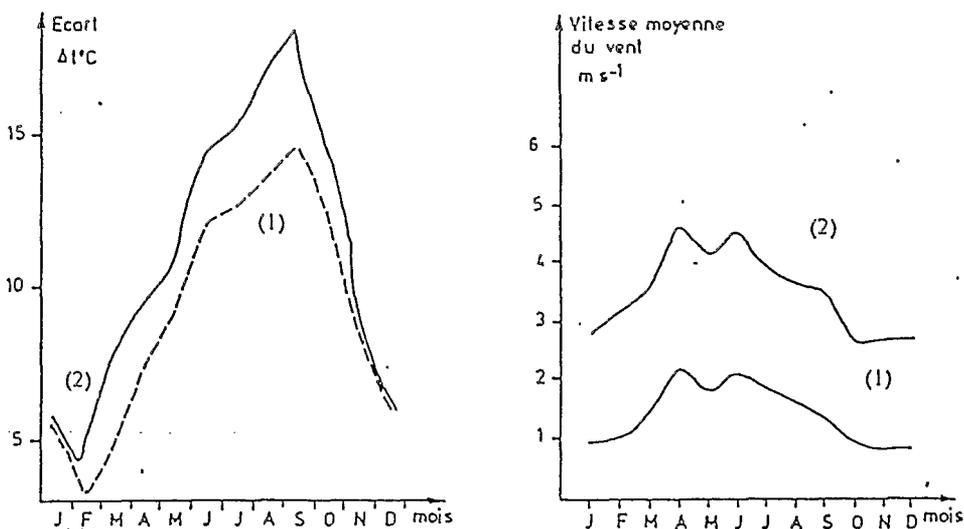


Fig.2.8- Ksar Ghilane: comparaison de deux paramètres dans (1) et hors (2) de l'oasis de Ksar Ghilane (Baldy, 1985):

a)- Ecart des températures de points de rosée entre 6 h et 18 h.

b)- Vitesse moyenne du vent.

L'équation (1) traduit donc bien la réalité oasienne et ses deux aspects contradictoires: l'anneau de garde soumis aux agressions du milieu extérieur (vent, fortes températures, mais bonne insolation) et l'intérieur mieux protégé des variations du degré de saturation de l'air, mais moins ensoleillé. Ces remarques sont fondamentales pour deux raisons:

1- Pour comprendre la stratégie d'extension de l'oasis,

2- Pour expliquer les différences de salure entre les sols couverts par un, deux ou trois étages de cultures, soumis à une évaporation variable, donc des remontées capillaires très différentes.

valeurs annuelles mesurées:

Les valeurs de L'ETP mesurées sur Kikuyu (*Pennisetum clandestinum*) ont été interpolées à partir de celles des stations de Kasserine et de Gabès pour les années 1961-1962. Cette interpolation se justifie par l'identité des relations trouvées par les auteurs (Damagnez et al., 1962) entre le rayonnement global et l'ETP mesurée pour ces deux stations.

1	2	3	4	5	5	7	8	8	10	11	12	mois/total
12	17	37	63	114	162	195	184	133	79	32	14	1042 mm (a)
48	70	97	121	155	160	190	180	138	111	70	48	1408 " (b)
39	56	81	129	189	225	234	213	138	84	54	36	1506 " (c)
69	55	109	137	112	165	211	185	131	97	71	53	1485 " (d)

Tab.2.4 - (a): ETP-Thornthwaite (Prezioci, 1954),
 - (b): ETP-Turc (Baldy, 1985),
 - (c): ETP-Penman (Service Météorologique de Tunis),
 - (d): ETP-Mesurée sur kikuyu (Damagnez et al., 1962).

On voit que les formules de Thornthwaite et de Turc rendent bien compte de l'ETP pour les mois secs et chauds, de juin à septembre, mais que la première citée la sous-estime très fortement pour les mois froids et humides, soit de décembre à mars.

La formule de Penman donne des valeurs plus élevées en été et plus faibles en hiver mais la somme semble mieux correspondre à la réalité.

Nous avons pu mesurer l'évaporation d'une nappe d'eau libre à la suite des pluies exceptionnelles des 24 et 25 Janvier 1990 (247 mm en 48 heures). Le chott a été envahi jusqu'à la cote 221 m par les eaux de ruissellement des piemonts et par les eaux de l'Oued El Mellah qui a quitté son cours normal. La nappe d'eau libre ainsi formée a atteint 24 km². Les mesures ont donné:

1635-P mm entre Février 90 et Février 91,
 et 1621-P' mm entre Septembre 90 et Septembre 91.

P et P' étant les hauteurs de pluie respectives pendant les intervalles de temps considérés, non encore disponibles, (il faudrait en toute rigueur corriger ces valeurs en tenant compte de la concentration, croissante dans le temps, des eaux en sels qui retardent l'évaporation, soit de 3 dSm⁻¹ en Février 1990 à 35 dSm⁻¹ en Juillet 1991).

valeurs mensuelles calculées:

Les valeurs de ETP (Penman) calculées à Gafsa pour 1983-1989 (Service Météorologique de Tunis), montrent la grande différence entre les valeurs d'été et celles d'hiver et la similitude des valeurs de Gafsa et de Tozeur, ce qui justifierait de transposer les données établies dans l'oasis de Tozeur.

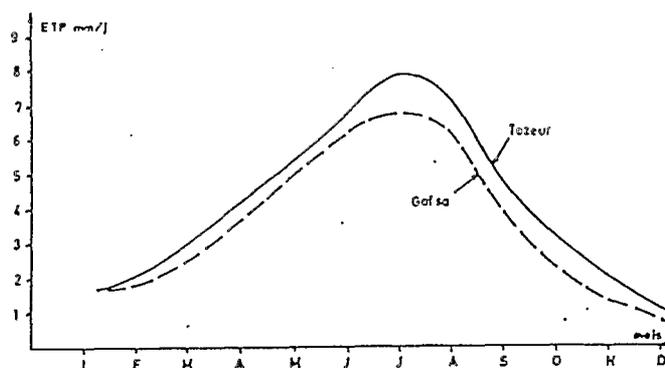


Fig.2.9- ETP(Penman) journalières à Gafsa et Tozeur (100 km au sud-ouest de Gafsa).

2.3.4- Conclusions partielles.

La bioclimatologie et le parcellaire sont donc intimement liés. Un calcul des bilans salins sur l'ensemble de l'oasis, nécessitant la connaissance en chacun de ses points de l'ETR n'est donc pas envisageable dans notre étude, la variabilité du couvert végétal étant trop grande d'un point à un autre.

2.4- Géologie et hydrogéologie.

L'oasis d'El Guettar appartient au groupe des oasis de montagne. En Afrique du Nord et au Proche orient, ces oasis se développent soit sur les terrasses d'oueds (Ouarzazate au Maroc), soit autour de sources artésiennes situées sur des lignes de failles (Palmyre en Syrie, Tamerza, Chebika et Gafsa en Tunisie). Elles sont donc étroitement associées à des conditions géologiques particulières qu'il n'est pas sans intérêt de détailler, la géomorphologie et l'approvisionnement en eau conditionnant la localisation des sels dans le milieu.

La gestion de l'eau et son utilisation seront présentées dans le chapitre suivant sur le milieu anthropisé.

2.4.1- Environnement géologique et système des failles de Gafsa.

Les reliefs de Tunisie sont soumis à deux contraintes géotectoniques majeures: l'une orientée dans le sens Nord-Ouest Sud-Est de la Dorsale (fig.2.10), l'autre provenant de la réaction du bouclier saharien, qui lui est opposée.

De là proviennent les trois linéaments Nord-Ouest Sud-Est centrés sur Kasserine, Gafsa et Tozeur. Au Miocène inférieur, se mettent en place la faille de Gafsa et les Jebel Younnes et Orbata de part et d'autre de l'accident de Gafsa. Lors des phases de compression du Pliocène les plis déjà ébauchés sont déformés et le paysage actuel se forme (Castany, 1951).

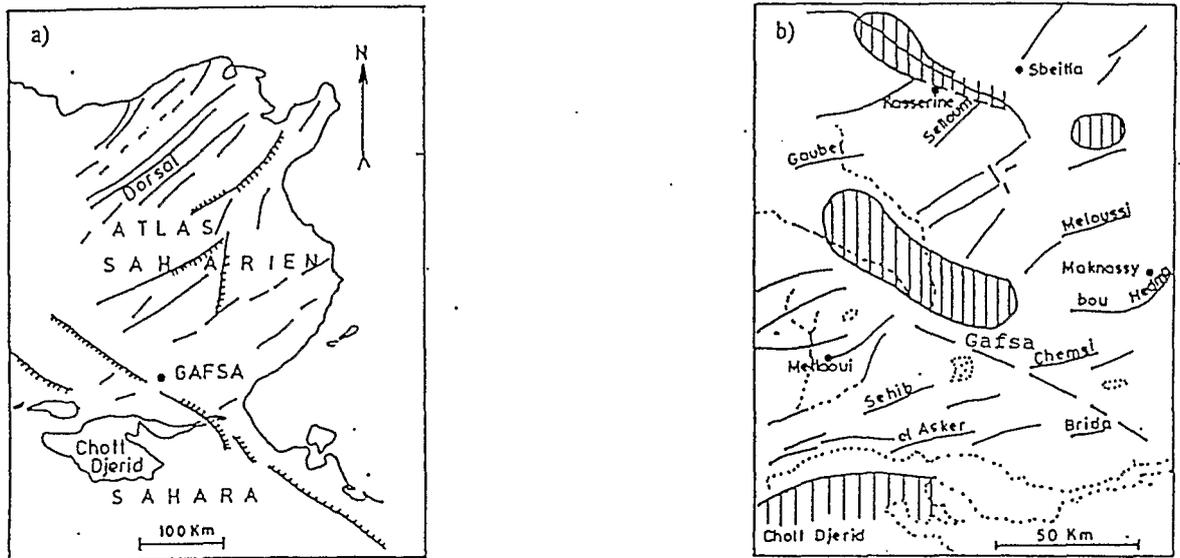


Fig.2.10- En a) Les contraintes géotectoniques en Tunisie, et en b) le système de failles et les oasis de Gafsa (d'après Castany, 1951).

Les oasis sont réparties sur les versants sud des reliefs, face au soleil et à proximité immédiate des sources artésiennes remontant par les failles. L'oasis d'El Guettar se trouve à l'aval des foggaras représentées fig.2.11, agrandie en fig.2.12.

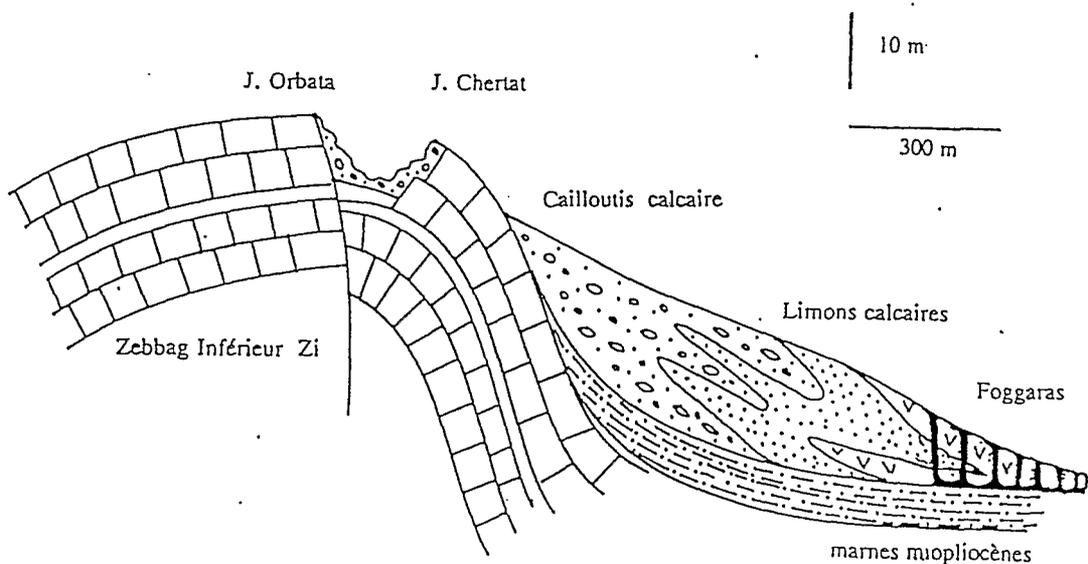


Fig.2.11- Failles au pied des Jebel Orbata et Chartat. (D'après Berkaloff, 1933 modifié).

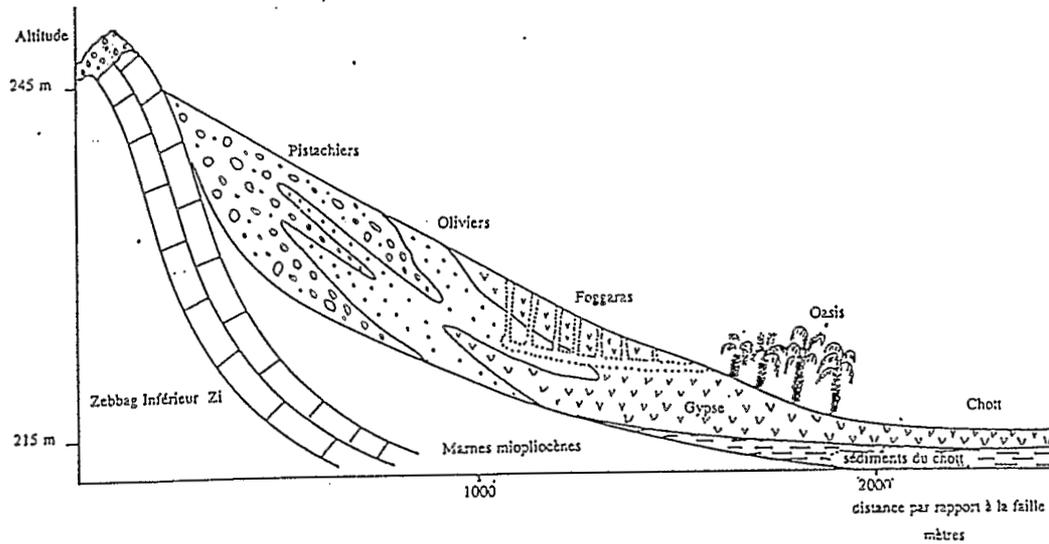


Fig.2.12- Position de l'oasis d'El Guettar par rapport aux formations géologiques et répartition du couvert végétal naturel.

L'oasis d'El Guettar se trouve au pied du Jebel Orbata, entre le piedmont et le chott El Guettar qui occupe le synclinal entre les Jebels Orbata et Berda (fig.2.12). Dans ces deux chaînes, à partir de l'altitude 250m jusqu'à 450m sont représentés successivement, l'Aptien, le Cenomanien, et le Coniacien. Les formations de piedmont sont essentiellement miopliocènes (Pontien).

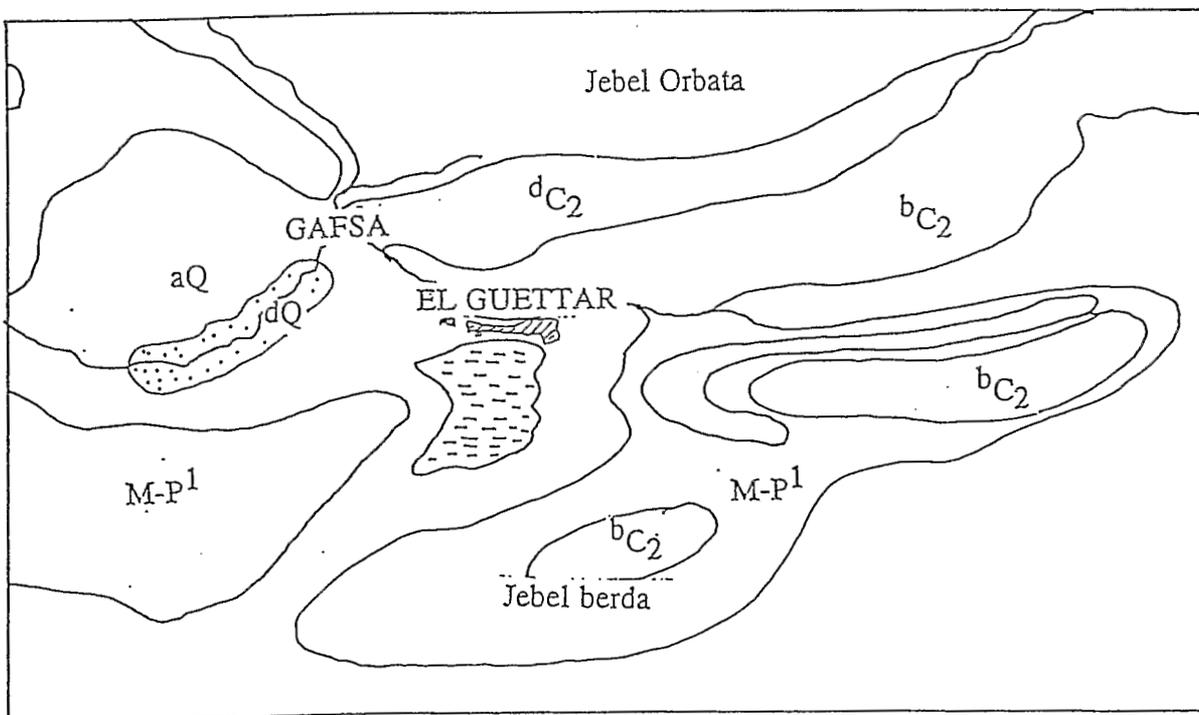


Fig.2.13- Géologie du bassin versant d'El Guettar (Office de la Topographie et de la Cartographie, échelle 1/500 000, Tunis, 1985).

aQ : alluvions récentes

M-P¹: Mio-Pliocène

dQ : dunes quaternaires

d_{C2}: Sénonien supérieur

b_{C2}: Cénomanien

2.4.2- Géomorphologie.

Deux caractéristiques importantes retiendront notre attention:

- 1- L'évasement entre les Jebels Orbata et Chertat, qui forme entonnoir et donne aux oueds qui sortent vers l'oasis une grande compétence. Un piemont important en résulte.
- 2- 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.

L'anticlinal du Jebel Orbata a été érodé au cours du Miopliocène en son centre. La forme en cuvette qui en résulte favorise le rassemblement des eaux de ruissellement consécutives aux fortes pluies dans des oueds de grande compétence, générateurs d'amples cônes de déjections (Planche 1.2, page 6). Les formations crétacées riches en dolomies fournissent au système des colluvions et alluvions riches en calcium et magnésium. Les colluvions des oueds sont constituées de cailloutis calcaires grossiers en amont et de limons calcaires plus en aval. Une arboriculture adaptée s'y est développée (fig.2.12).

- Le chott.

C'est une étendue plate de 36 km², 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⁻¹, mais peut atteindre localement des valeurs supérieures à 50 dS.m⁻¹.

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, MgSO₄, Na₂SO₄ se concentrent sur place. Ces sels repassent en solution lors des pluies importantes, envahissant les parties basses de l'oasis.

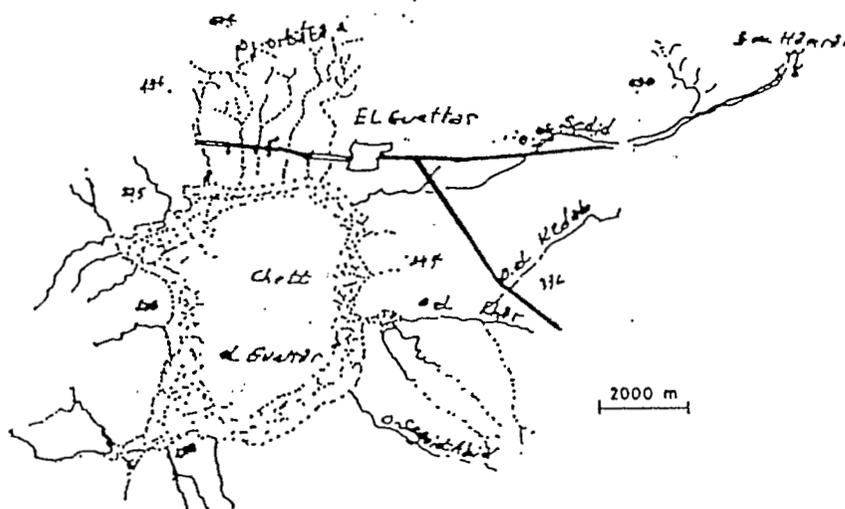


Fig.2.14- Endoreisme du Chott.

Les argiles du milieu du chott sont à dominante de montmorillonite en profondeur et de montmorillonite associée à de la kaolinite et de l'illite en surface. Les formations mio-pliocènes détritiques de la bordure sud du chott sont caractérisées par une association palygoskite-montmorillonite avec un cortège d'autres argiles. Cela semble indiquer une grande diversité des sources d'alluvionnement (Sassi 1962).

Du point de vue géomorphologique, il n'y a pas de transition entre le chott et l'oasis, car cette dernière gagne sur le chott de plus en plus. Les sols de bordure cultivés se différencient cependant des sols de chott par un horizon organique et une salure de surface beaucoup moins élevée.

2.4.2- Hydrogéologie.

Il y a trois sources d'alimentation en eau du système. Les eaux de surface, la nappe des éboulis qui draine l'inféro-flux dans l'oasis puis alimente la nappe phréatique qui débouche sur le chott, enfin l'aquifère du Zebbag inférieur, composé de calcaires turoniens et cenomaniens à pendage très élevé. La couche imperméable du système est constituée de marnes gypseuses miopliocènes qui tapissent le fond du chott.

Réseau hydrologique de surface.

Il 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.

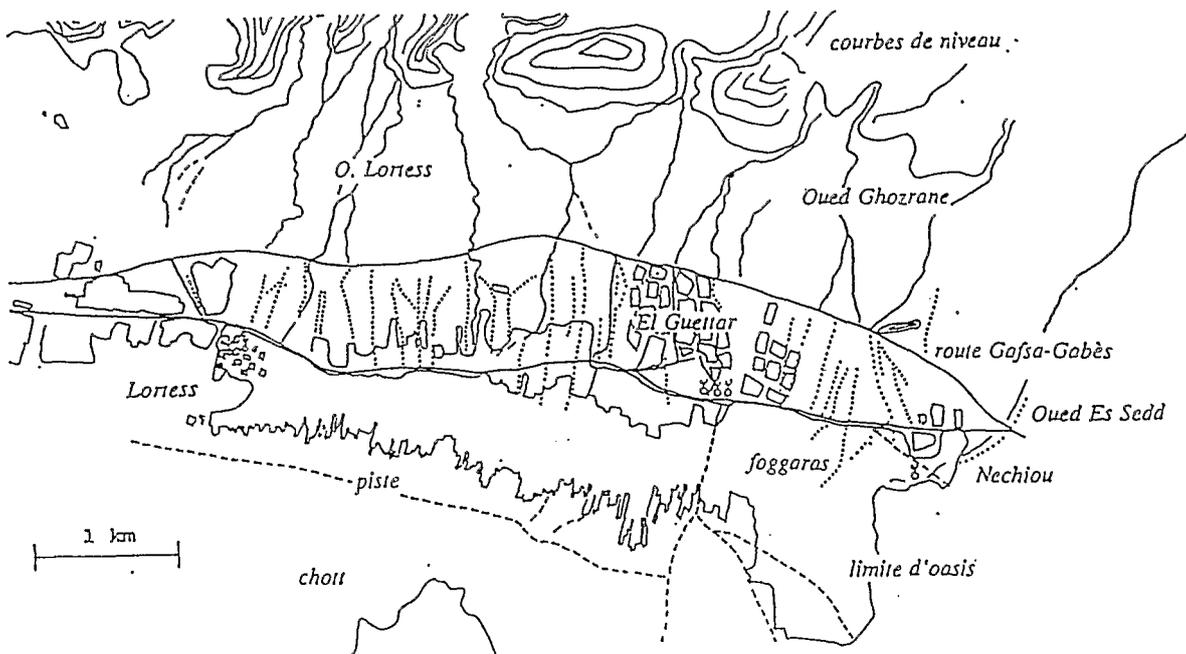


Fig.2.15- Le bassin versant d'El Guettar. Réseau hydrographique de surface et foggaras.

Actuellement les travaux de conservation des eaux et des sols entrepris dans le lit des oueds favorisent l'infiltration des eaux de surface avant qu'elles n'atteignent l'oasis. L'épaisseur des colluvions et la grossièreté des matériaux qui les constituent le permettent.

Les oueds ont un écoulement sporadique et violent. Seules les pluies supérieures à 30 mm.h⁻¹ 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.

L'oued El Mellah qui appartient au bassin versant de Gafsa-Sud, séparé de celui d'El Guettar par un seuil a toutefois changé de cours lors des pluies spectaculaires des 23 et 24 janvier 1990, en atteignant un débit de pointe de 18000 m³s⁻¹ après des pluies de 247 mm en 48 heures. Le chott s'est alors rempli jusqu'à la cote 220 m. Il s'agit là d'un événement exceptionnel mais qui joue un rôle significatif sur l'équilibre du système oasis-chott. Le chott s'est rempli partiellement en 1969 et en totalité en 1990, les annales ne citent pas d'autre antécédent.

2.4.3- Les aquifères.

Trois formations sont susceptibles d'emmagasiner de l'eau (fig.2.12):

- les calcaires du Zebbag inférieur à pendage élevé (Z_i),
- les galets et éboulis de piemont (G_a E_b),
- les gypses de bas de pente et les alluvions du chott (G_y).

La formation du Zebbag inférieur.

Le Zebbag inférieur est une formation karstique du Crétacé moyen, composée de calcaires dolomitiques et dolomies. Elle est très hétérogène et relativement fissurée (la transmissivité varie de 5.10⁻¹ à 2,8.10⁻⁵ l.s⁻¹.m⁻² suivant Ben Marzouk 1982). Cet aquifère fournit la quasi totalité de l'eau d'irrigation de l'oasis à travers six forages (tab.2.5):

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.2.5- 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. L'épaisseur maximum des éboulis est d'une centaine de mètres, son volume de l'oued El Abiad à l'oued Es Sedd de 2 km³ à peu près. Cet aquifère est exploité par un forage public, pour l'eau potable et quelques puits de surface dans la partie amont de l'oasis, surtout dans les jardins et olivettes du nord de la voie ferrée et sur les bordures est et ouest de l'oasis où les éboulis sont encore épais.

En 1980 il y avait encore 50 puits privés produisant un débit fictif continu estimé à 20 l.s⁻¹ (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. A cet endroit les deux nappes communiquent, l'une étant le prolongement de l'autre. La distinction se justifie par leur alimentation différente. La nappe phréatique circule dans les formations gypso-marneuses.

De l'ouest de Gafsa à l'est d'El Guettar la nappe phréatique constitue une seule entité hydrogéologique (Ben Marzouk, 1982). Au niveau d'El Guettar elle est alimentée soit par les crues des oueds, soit par infiltration directe, soit encore par drainage des eaux d'irrigation. 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. Seuls sont productifs ceux qui utilisent la nappe des éboulis en amont de la voie ferrée.

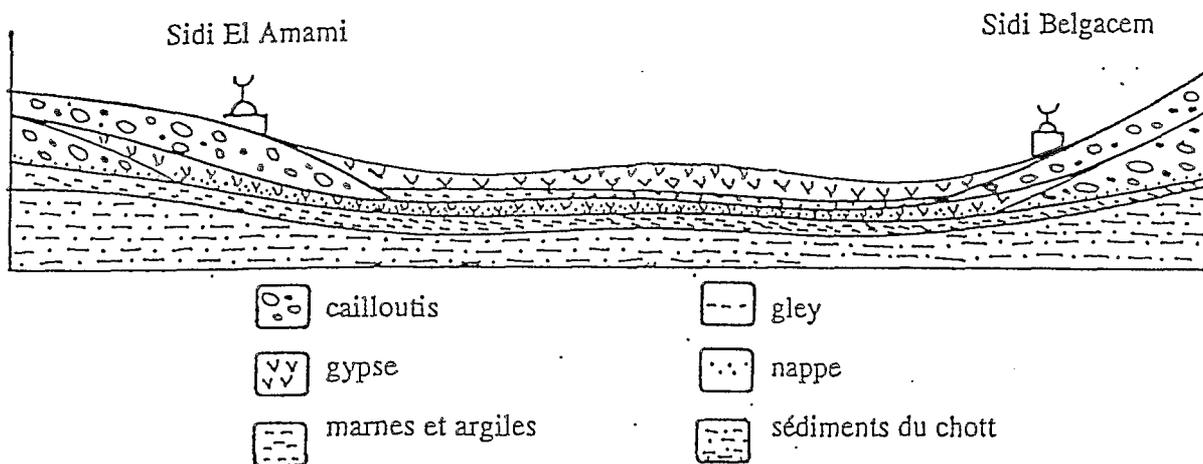


Fig.2.16- Coupe Est-Ouest de la bordure aval de l'oasis.

2.5- La végétation.

Le milieu naturel est caractérisé d'abord par des associations végétales typiques des sols gypseux, des sols salés, des cailloutis, des glacis calcaires de parcours et ensuite par une frontière très nette avec le milieu artificialisé que constitue l'oasis. C'est une végétation de steppe clairsemée, à cycle de végétation court. Elle est adaptée à l'aridité et à la salure, quelquefois aux deux. Le sol reste exposé directement au rayonnement. Les remontées capillaires sont importantes.

2.5.1- Sur les piemonts.

Sur les cailloutis de piemont formés par les cônes de déjections des oueds qui descendent du Jebel Orbata, des limonophytes: *Artrophytum scoparium*, *Anabasis aphylla*, des gypsophytes: *Moricandia arvensis*, *Tenerium polium*, et plus généralement les plantes de steppe de ces climats, *Thymelea hirsuta*, (metnen), *Ruta chalapensis*, *Artemisia campestris* (tgouf), *Artemisia herba alba* (chir), *Diploaxis harra* (harra), *Gymbopagon scolimanthus*.

La présence de plantes gypsophiles ne révèle pas de formation gypseuse bien définie, mais l'accumulation localisée de débris arrachés aux formations crétaées de la montagne. Aucune végétation arborée n'a le temps de s'installer sur ces pentes fréquemment remodelées par le débordement des oueds.

2.5.2- En bordure et dans le chott.

La végétation est moins diversifiée en espèces, on y trouve très nettement séparées:

- Dans le fond du chott, essentiellement: *Artrophytum glaucum*, *Mesembryanthemum nodiflorum*, avec invasion de *Tamarix* après la submersion de 1990-1991.
- Dans les cuvettes salées, *Artrophytum Glaucum* sur de petites buttes et *Tamarix sp.* (tarfa). Cette dernière espèce colonise les parties salées les plus humides.
- A partir d'un mètre au dessus du niveau le plus bas du chott, on trouve le groupe écologique gypsophile-halocline caractéristique de l'association: *Traganum nudatum* (dahran) *Suaeda mollis*, *Salsola tetrandra* et *Salicornia spp*, avec *Aeluropus littoralis* dans les parcelles cultivées en limite du chott.
- Sur les glacis de pente à l'ouest, sur des sols gypseux d'alluvions d'oueds traversant le Miopliocène: *Limoniastrum guyonianum* (zita), *Atriplex halimus halimus* (quetaf), *Zygophyllum album* (bougriba), *Frankenia thymifolia*, *Peganum harmala* (harmel), cette dernière étant plus spécifiquement saharienne.

Cette végétation ne se retrouve partiellement à l'intérieur de l'oasis que dans les parcelles négligées ou abandonnées. L'invasion commence par *Aeluropus littoralis* et *Suaeda mollis* que l'on rencontre dans les parties basses dès qu'un an se passe sans labour, suivi par *Salicornia sp.* sur les bords de parcelles et *Tamarix sp.* qui envahit les planches. Dans les parties hautes c'est *Limonium tumetatum* et *Zygophyllum album* qui s'installent au pied des terrassements négligés.

CHAPITRE III- LE MILIEU ARTIFICIALISE.

3.1- Les cultures oasiennes.

L'oasis couvre à peu près 500 hectares dont 170 ha de palmeraie traditionnelle, le reste étant planté en oliviers en association avec des cultures maraîchères au sol. L'oasis traditionnelle s'organise autour de la culture du palmier.

3.1.1.- Le palmier-dattier.

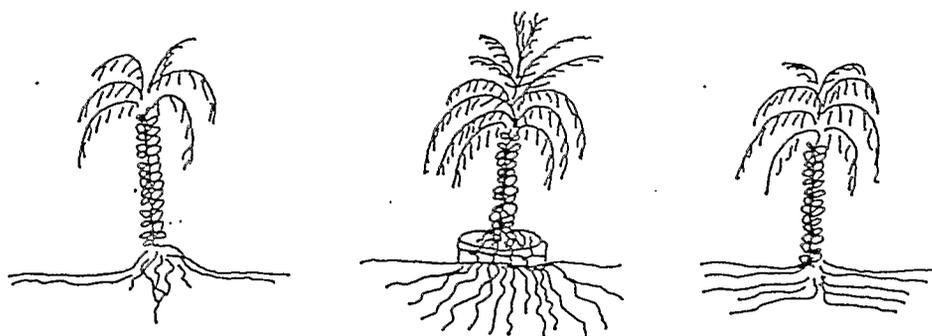
Le palmier (*Phoenix dactylifera*) est une monocotylédone dont la tige (stipe) porte des palmes et des inflorescences (dattes). Le palmier est dioïque, les rejets qui poussent au pied du stipe d'un individu femelle, de trois à sept, servent au bouturage de nouveaux arbres. Les pieds producteurs sont espacés de 8 m en moyenne à El Guettar. Chaque propriétaire possède un ou deux pieds mâles (zokkar) pour la fécondation.

L'oasis compte 32500 palmiers appartenant à sept "variétés" différentes: Deglet nour, Aaligue (ou Ftimi), Kenta, Besser Hellou, Kseba, Quabrichou, Hammouri. En réalité, les populations que l'on trouve dans les oasis sont considérées soit comme des races ou métis (Munier, 1973), soit comme des cultivars (Abdallah, 1990).

Enracinement.

En sol sain irrigué, les racines adventices du palmier partent d'un épais chevelu à la base de la tige. Elles prospectent un volume de sol considérable horizontalement, jusqu'à 20 m de diamètre. Elles sont réparties uniformément dans les deux premiers mètres du sol si l'humidité est homogène. La morphologie de l'enracinement dépend des conditions de compacité et d'humidité du sol (fig.3.1), de la présence ou l'absence de gypse induré (terch*).

La densité racinaire diminue fortement dans les horizons hydromorphes des sols à pseudo-gley de bordure de chott. Les rendements diminuent fortement, mais dans les sols inondés, certains palmiers (variété Deglet) ont survécu à une durée de submersion atteignant seize mois.



a) superficiel (sans irrigation). b) normal (sols sains irrigués) c) réduit (sols hydromorphes).

Fig.3.1-Système racinaire et nature du sol.

Avant la plantation, au printemps et en été, le sol est nivelé. Des rejets de 3 à 4 ans sont plantés, palmes rassemblées et nouées dans des trous cubiques de 50 cm de côté préalablement fumés. S'il y a un encroûtement gypseux, il est défoncé pour que les racines du rejet puissent se développer librement. Les déblais de gypse obtenus servent à la construction des chemins si l'encroûtement est tendre et des murets de protection des racines si c'est une croûte dure (planche 2, photos P.2.3 et P.2.4, page 39).

Les premières floraisons apparaissent à trois ou quatre ans. L'inflorescence porte des milliers de fleurs enfermées dans une bractée appelée spathe. Jusqu'à cinq ans les fleurs sont supprimées pour ne pas épuiser l'arbre. A la sixième année on ne laisse que deux inflorescences (El Fekki, 1966). Petit à petit on laisse toutes les inflorescences. A l'âge de douze ans l'arbre est adulte. Les régimes sont alors ciselés, c'est à dire éclaircis par ablation de quelques pédicelles sur chaque régime. Cette pratique évite les inconvénients de l'alternance des rendements et améliore la qualité des fruits.

Suivant une tradition multimillénaire, (cf. reproduction du sceau-cylindre babylonien en page de garde), la fécondation est assurée en avril par l'homme en fixant dans chaque inflorescence une grappe de pollen. Chaque inflorescence doit être fécondée sous peine de ne rien produire, car il n'y a pas de fécondation par les insectes.

La récolte a lieu d'octobre pour les variétés précoces (Besser Hellou et Goundi) à décembre pour les variétés tardives (Deglet noir, et Ftimi). Chaque pied produit de 20 à 80 kg de dattes. Les palmes (jerid) qui dessèchent à la base du panache sont coupées après la récolte. Les palmiers produisent pendant une cinquantaine d'années. Ceux qui ne produisent plus sont coupés. Les troncs servaient d'armatures aux terrasses des maisons et aux ponts qui enjambent les parcelles. Actuellement ils sont brûlés dans les bains maures.

Distribution.

La variété Deglet, est traditionnellement plantée en bordure Sud. L'ensoleillement y est plus important qu'ailleurs, mais il y risque d'inondation. C'est une variété noble, de très bon rapport.

C'est pourquoi même à l'intérieur de l'oasis, les vieux arbres des autres variétés sont progressivement remplacés par des Deglet Nour. Ce remplacement se justifie d'autant plus que les variétés qui servaient à l'alimentation des ânes et des chameaux ont de moins en moins de raisons d'être.

3.1.2-autres strates de culture

L'arboriculture fruitière.

La strate arborée est présente partout où la nappe phréatique est à plus d'un mètre cinquante de profondeur. Elle est la seule couverture végétale des parcelles pionnières en amont de l'oasis (oliviers seuls ou oliviers et pistachiers pour les parcelles plus récentes).

Dans l'oasis traditionnelle l'olivier voisine avec le figuier et l'abricotier. Cette association traduit le souci des propriétaires de diversifier les récoltes pour la consommation de leur famille.

La strate herbacée.

Elle complète normalement les deux étages supérieurs quand l'irrigation est pratiquée de manière fréquente et régulière. Elle est composée de fourrages, essentiellement luzerne, bersim et sorgho fourrager, de cultures maraîchères d'hiver: navets, betteraves, radis ou d'été: poivron, aubergine et piments quand l'ensoleillement de la parcelle est suffisant. Les parcelles cultivées sur trois strates sont extrêmement morcelées (une planche de culture fait de 10 à 25 m²).

3.2- Fonctionnement agronomique.

3.2.1- La logique d'extension.

Le développement de la palmeraie traditionnelle est prisonnier de l'héritage historique et technique qui groupe les familles exploitant une même foggara suivant une mince lanière de dix mètres de large suivant la ligne de plus grande pente. Il obéit aussi à une logique de rentabilisation des terres dès le début de la mise en culture des terrains vierges. Aux jeunes plantations de palmiers sont donc associés des plants d'olivier de table, de grenadier et de figuier, et plus rarement d'abricotier ou pistachier et des pieds de vigne. La répartition des arbres fruitiers et leur nombre dépend essentiellement de la position de la parcelle et de son ensoleillement.

Pour rentabiliser les cultures, on installe dès la première année des cultures maraîchères d'hiver (fèves, navets, carottes, oignons), d'été (piments, rarement tomates ou melons) et des cultures fourragères (luzerne, bersim, sorgho, orge en vert).

Chaque parcelle, dont la taille moyenne dans l'oasis traditionnelle est de 800 m² est subdivisée en planches de 10 à 50 m² où sont réparties ces cultures suivant les besoins du propriétaire. Les façons du sol se limitent à deux à quatre labours par an à l'araire et à l'apport de fumier (mélange âne et mouton) en quantité variable, pouvant atteindre 10 kg par mètre carré et par an. L'engrais chimique est peu utilisé.

3.2.2- La stratégie de mise en culture.

La stratégie de mise en culture de la strate basse (au sol) dépend du temps que l'agriculteur veut bien consacrer à sa parcelle, de la quantité d'eau qu'il est prêt à payer et de l'ensoleillement de la parcelle pour le maraîchage d'été. Lorsque la palmeraie grandit, ce système évolue en fonction du temps:

- soit le propriétaire garde les trois étages (20% des parcelles),
- soit il ne garde que les deux étages supérieurs, 25% des parcelles),
- soit il ne garde que les palmiers (40% des parcelles).

Dans ce dernier cas, il s'agit la plupart du temps de palmiers Aaligue et le propriétaire n'irrigue qu'une ou deux fois par an, en été, pour assurer une récolte. Un certain nombre de parcelles n'est pas irrigué du tout.

Dans la partie basse de l'oasis, seule la configuration palmier-strate herbacée est pratiquée, à cause de la proximité de la nappe qui interdit l'arboriculture (illustrations 2.2 et 2.3, page 39). Cette dernière configuration représente à peu près 15% des parcelles.

3.2.3- Le calendrier cultural.

Culture	Sept	Oct.	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Jui	Août
Luzerne												
Fèves												
Sorgho fou												
Orge vert												
Piment												
Aubergine												
Courgette												
Radis												

Culture	Sept	Oct.	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Jui	Août
Palmier		Ciselage	Récolte	Emondage			Plantation	Fécondation				
Olivier					Récolte	Taille						
Pistachier	Récolte				Fécondation							
Figuier												

Fig.3.2- Calendrier cultural simplifié pour les principales cultures dans l'oasis d'El Guettar.

Le sol est suffisamment meuble pour être travaillé à la main, ou labouré à l'araire tractée par un âne. Le tracteur n'est utilisé que dans les extensions récentes qui sortent du cadre de l'oasis.

3.3- La gestion de l'eau.

Les besoins en eau des cultures sont assurés par un tour d'eau régulier et une irrigation à la planche.

3.3.1- La gestion traditionnelle: les foggaras.

Le système de collecte par foggara, bien qu'abandonné en 1969 sera décrit brièvement car c'est lui qui a imposé sa forme au profil des pentes et déterminé la taille des parcelles. Nous verrons par la suite combien ces deux éléments sont importants.

Les foggaras sont des galeries souterraines creusées à la base des éboulis dans un matériau limoneux calcaire qui draine les eaux d'infiltration du piémont jusqu'à la couche de marne sous-jacente (fig.3.3).

La galerie repose sur une marne imperméable. Sa hauteur est suffisante pour permettre la circulation d'un homme courbé chargé de l'entretien. Tous les dix mètres en moyenne un puits permet l'évacuation des déblais de galerie. Les galeries sont alignées sur la ligne de plus grande pente. Chaque ligne de puits constitue une foggara, appelée aïn (source, pluriel: aïoun). Il y a 21 aïoun d'ouest en est, totalisant 600 puits à peu près.

La galerie souterraine (ngoula) a une pente plus faible que la surface des éboulis. Elle débouche donc dans l'oasis un peu en aval du niveau de la voie ferrée. A partir de là l'eau est répartie entre les tenants de l'aïn suivant un tour d'eau régulier.

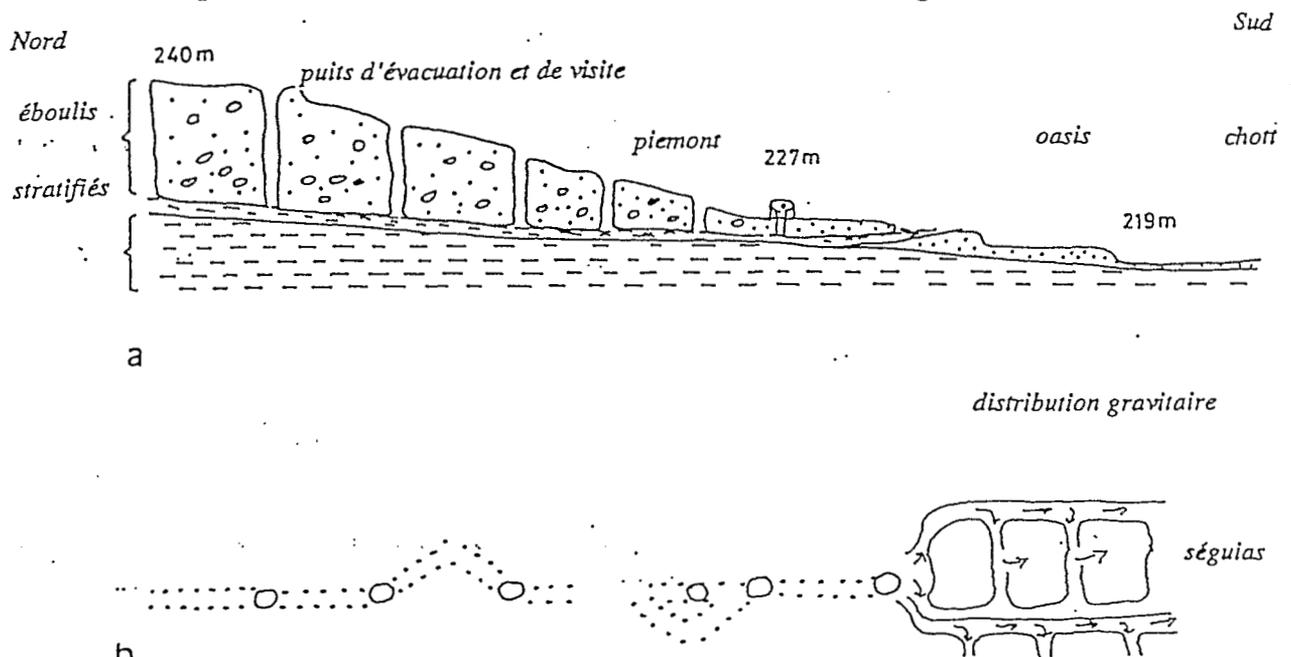


Fig.3.3- Le système des foggaras a)- Coupe longitudinale, b)- Vue en perspective cavalière.

Le milieu artificialisé.

Cependant l'eau est rare, deux à trois litres par seconde et par foggara (Bursaux, 1910), soit 60 l.s^{-1} pour 20 foggaras et 100 ha d'oasis en 1910, par exemple. Ce qui correspond à une lame d'eau de 1890 mm par an. C'est une quantité suffisante pour le palmier dattier (El Fekih 1965), mais elle ne permet pas l'extension des cultures propres au maintien de l'équilibre entre la population et sa production.

Lorsqu'une foggara ne débite plus assez, une galerie en diverticule est creusée pour collecter une part plus importante de l'inféro-flux. Chaque aïn est entretenue par les membres d'une famille qui ont installé leurs parcelles le long des lignes de plus grande pente, tout en rattrapant la topographie par des terrasses pour permettre l'irrigation par gravité. D'où la morphologie particulière des parcelles le long de chaque profil.

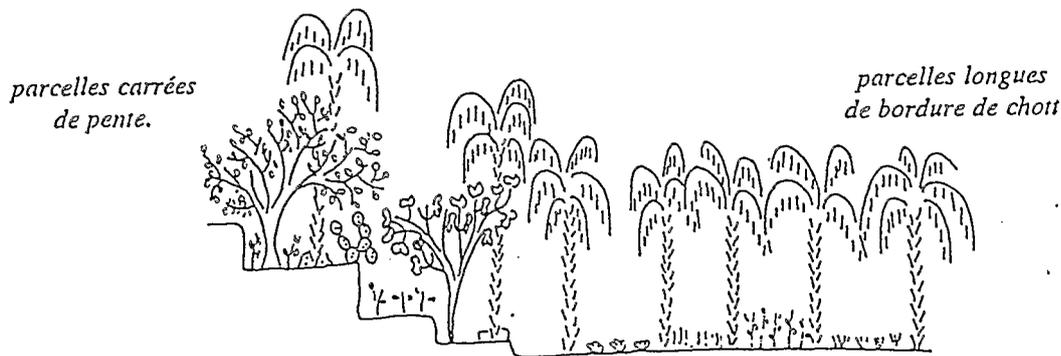


Fig.3.4- Morphologie des parcelles et topographie.

- 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, leur longueur peut atteindre 200 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 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 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.

Le système d'alimentation par foggara est resté actif jusqu'aux grandes pluies de 1969 qui ont provoqué des éboulements et des obstructions de galeries.

3.3.2- La gestion actuelle.

Actuellement deux types d'alimentation sont utilisés:

- D'abord les puits exploitant la nappe phréatique.

Le milieu artificialisé.

Leur profondeur varie entre 25m au bas des éboulis et 2m au niveau du chott. Seuls les puits d'une profondeur supérieure à 10 m sont utilisés, encore que la plupart soient recreusés jusqu'à 35 à 45 m pour atteindre les calcaires du Zebbag inférieur qui renferment une eau moins salée, mais de faible débit. On estime leur débit total de 40 à 60 l.s⁻¹ (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⁻¹. 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⁻¹.ha⁻¹ ou 1150 mm d'eau par an. Cela n'empêche pas les extensions, mais ne permet pas de cultiver au maximum toutes les parcelles. Il y donc une stratégie de culture toute particulière. 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⁻¹ 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.3.3- Qualité des eaux d'irrigation (juin 89) en mel⁻¹.

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

- Gestion de l'eau au niveau de la parcelle.

Un questionnaire a été soumis aux agriculteurs en mars 1991 pour évaluer les quantités d'eau utilisées et leur incidence sur la salure des sols. Des mesures de salure du sol ont été faites dans chaque parcelle ainsi que des prélèvements d'échantillons pour analyse chimique (tab. 3.4).

Nom	Num	Sup.	Str	Hr Fre	CEV/CEH	θ	rap	Irr	CEst
T. B. BELG	2D	1600	ac	21/8	65/52	18	1.2	70+	3.7
	2C	5600	abc		90/60	16	1.4	80+	4.4
	2B	3600	a		78/50	22	1.7	70+	3.6
A. CHEHOUD	1	650	abc		30/16	15	1.3		0.7
	1A	800	a		225/188	21	1.2		15.4
NACEUR CHE	4	1260		54/10	58/36	16	1.4	1540	2.4
AMOR B HAJ	5	1430		50/10	55/36	20	1.4	1250	2.4
SAID ARBI	6A	650		45/10	81/46	12	1.4	2450	1.0
	6B	400			85/67	16	1.2		5.0
	6C	1350			170/110	19	1.5		8.6
	6D	1000			110/65	19	1.6		4.8
H. BACHOURI	7	43200	bc	38/16	274/267		1.0	115+	16.7
AL BRAHIM	8M	30000	abc	125/16	147/87	20	1.7	150+	6.7
SALMAOUI	9M	1450	ab	36/8	265/215	20	1.2	900	17.4
S. KHEDIR	10M	28000	abc	93/11	174/202	24	0.9	150+	16.3
HACHANI	11M	3350	abc	25/7	176/143	24	1.3	300+	8.3
SOLTANE	12Ma	1600	abc	46/8		24		1050	
	12Mb	350			225/256	19	0.9		20.8
LAFFI	14	45000	bc	160/15	125/95	28	1.5	150+	7.3
AM. SOUDA	15	2000	abc	52/10	132/89	21	1.4	950	6.8
HAFSIA	17	1600	abc	78/14	247/172	22	1.4	1750	13.8
A B AMOR	21	1400			36/12			900	19.9
M MAZOUZI	22	1800	abc	96/12	165/121			1900	9.5
M. B ALI	23	3000	abc	42/12	156/96			500	7.4
Y FATTOUHA	24	360	abc	36/24				3600	

Tab.3.4-Enquête sur l'utilisation de l'eau dans l'oasis.

- Sup = superficie mesurée irrigable en m².
 Str = étages cultivés: a=palmiers, b=arbor., c=herbac.
 Hr = heures d'irrigation par an (moyenne:1988-89).
 Fr = nombre d'irrigation par an.
 CEH/CEH = CEM ramenée à $\theta_p=20\%$.
 θ_p = humidité pondérale du sol au moment de l'enquête.
 rap = valeur du rapport CEV/CEH.
 Irr = irrigation en mm/an à partir des forages AIC.
 70+ = complément d'irrigation par puits équipé.
 CEcn = conductivité de l'extrait 1/5ème des sols.
 CEst = conductivité de l'extrait de pâte saturée (dS/m).

(Les hauteurs d'irrigations sont calculées avec un débit de 10 l.s⁻¹ à la parcelle).

Cette enquête a été faite par questionnaire verbal chez des propriétaires qui entretiennent bien leurs parcelles et en tirent un revenu. Les quantités d'eaux déclarées ont été vérifiées auprès de l'AIC. Il apparaît cependant que la quantité d'eau utilisée varie dans de grandes proportions d'un agriculteur à l'autre:

1- les petites parcelles sont souvent sur-irriguées, car la main d'eau est d'une heure quelle que soit la taille de la parcelle. La fréquence des irrigations oscille autour de 12 fois par an.

2- presque tous les propriétaires disposent de plusieurs parcelles, situées la plupart du temps dans une région anciennement alimentée par la même foggara, mais souvent distante de 50 à 250 m. La répartition de l'eau entre ces parcelles ne peut pas être vérifiée.

Par contre, il semble d'après une enquête menée pendant deux ans sur 64 parcelles contiguës dans l'oasis traditionnelle que l'utilisation de l'eau croît et la salure décroît avec le nombre de strates cultivées (fig.3.6 et 3.7). Nous reviendrons plus en détail sur ce point important.

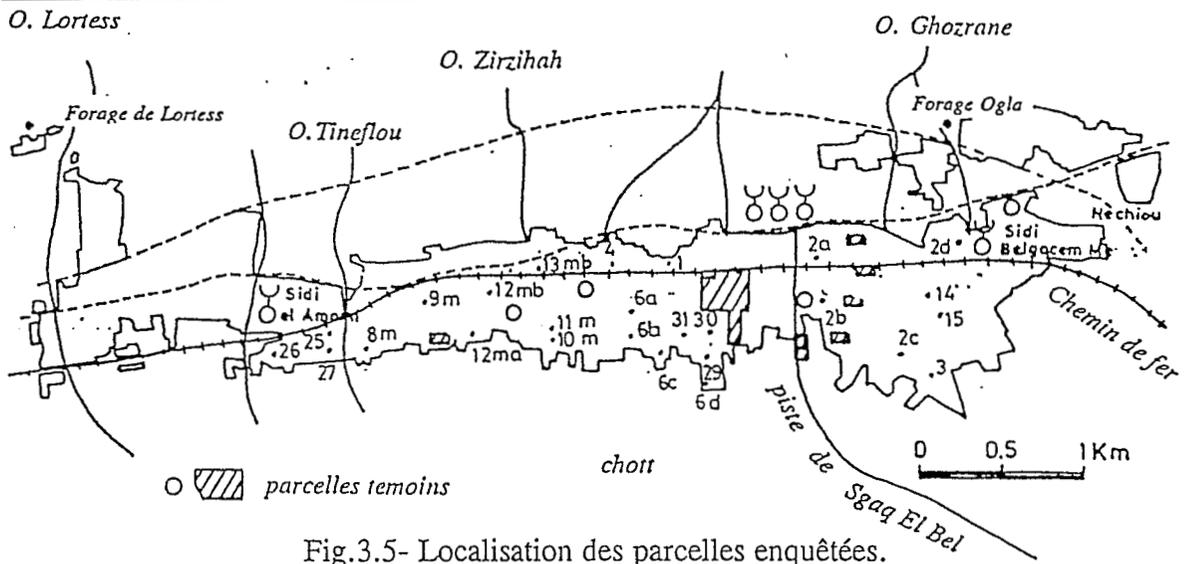


Fig.3.5- Localisation des parcelles enquêtées.

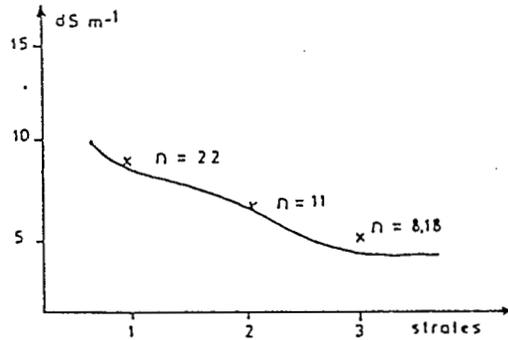


Fig.3.6- Salure moyenne par strate pour un nombre n de parcelles.

Les enquêtes ne permettent pas d'attribuer la différence de salure observée d'une parcelle à une autre à la seule utilisation de l'eau, d'autres facteurs pouvant jouer, l'ETR par exemple. Un test de cohérence entre les réponses fournies pour les années 1989 et 1991 et les souches de l'AIC a conduit à éliminer 32 réponses sur les cinquante que comportait l'enquête au départ. D'autre part, l'enquête confirme que les agriculteurs irriguent régulièrement sans tenir compte des pluies, sauf après des pluies exceptionnelles.

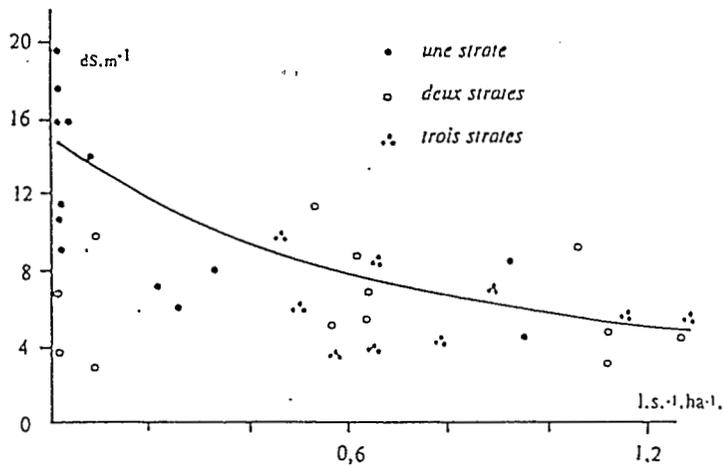


Fig.3.7- Utilisation des eaux dans un sous-ensemble homogène de 64 parcelles salées.

Conclusions partielles:

Il est donc difficile de connaître la gestion de l'eau par parcelle sur tout l'oasis. L'expérience nous a prouvé que ceci est vrai non seulement à El Guettar, mais dans tous les périmètres irrigués. On peut dire que l'utilisation de l'eau dans l'oasis n'est pas homogène. 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.

Il faut souligner d'ores et déjà que 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.

3.4- Colonisation des bordures amont et aval.

Voici donc, brièvement décrite, la logique agricole de notre oasis, coincée entre un piemont caillouteux et un chott salé. Quel avenir peut-on prévoir pour un terroir limité par des frontières aussi ingrates ? Quel développement pour un ensemble de parcelles petites, délimitées dans le paysage par la tradition hydraulique des foggaras en minces lanières qui épousent la ligne de plus grande pente pour ne pas s'éloigner de l'eau ?

Dès 1910, Burseaux annonce les difficultés auxquelles est soumise l'oasis d'El Guettar. Il annonce la fin des foggaras. Il est vrai que le système des foggaras ne s'est maintenu que jusqu'en 1969, mais l'oasis traditionnelle s'est agrandie jusqu'à cette date, et les cultures des extensions, céréales, fourrages et olivettes n'ont cessé de gagner du terrain depuis, vers l'amont et aussi vers l'aval.

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 (figurées en vert sur la fig.3.8), 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.

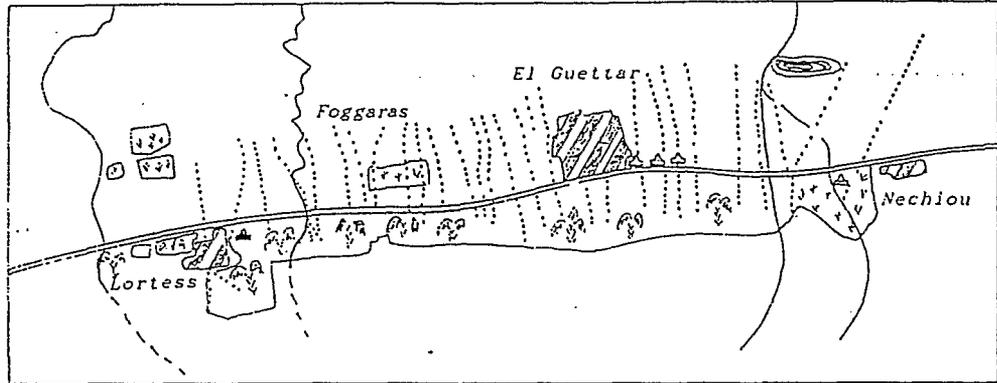


Fig.3.8a- L'oasis d'El Guettar en 1910 (d'après Bursaux).

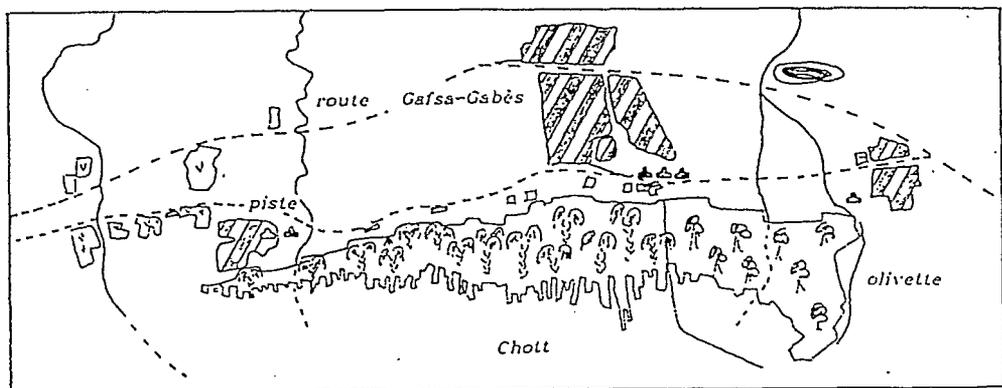


Fig.3.8b- L'oasis d'El Guettar en 1965 (D'après photos aériennes).

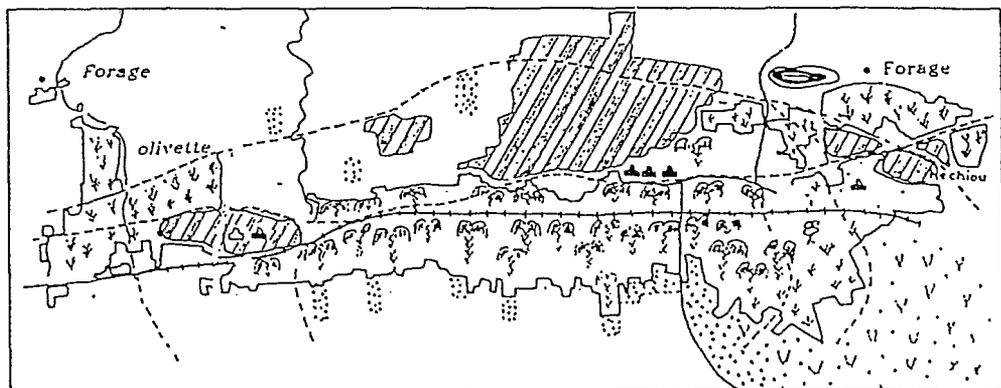


Fig.3.8c- L'oasis d'El Guettar en 1988 (d'après la plan 1/2000 ème du Génie rural).

3.4.1- Le développement par l'amont.

La prise de possession du paysage vers l'amont de l'oasis se fait actuellement par stabilisation des sols par des jessours* suivie de la plantation en oliviers ou en pistachiers. Ce sont les seules cultures possibles sans irrigation et ces terres disponibles à la colonisation sont toutes situées en amont des forages. L'irrigation par gravité n'y est donc pas possible.

3.4.2- Le développement par les cotés.

C'est le plus important en superficie, car les sols colonisables dans la partie sud-est sont faciles à mettre en culture. Des puits sont forés dans la nappe phréatique qui se trouve entre 3 et 7 mètres de profondeur dans cette zone, mais les résultats sont médiocres à cause de la salure de l'eau.

3.4.3- le développement par l'aval.

C'est le plus important en nombre de parcelles mises en culture. En effet l'héritage historique du temps des foggaras a imposé des propriétés orientées dans le sens de la plus grande pente. Les propriétaires situés en bordure sud peuvent donc gagner à leur gré sur le chott en le colonisant dans le prolongement de leur parcelle, perpétuant ainsi la tradition d'extension. La mise en culture se fait en travaillant les horizons superficiels et en les irriguant peu pour ne pas provoquer de remontées de la nappe qui se trouve souvent à moins d'un mètre cinquante de la surface. Seules les cultures maraîchères sont possibles avec cette technique, la nappe étant très salée à cet endroit, comme nous le verrons (cf. page 72).

3.5- Conclusion partielle: vitalité et ressemblance avec d'autres sites.

Le caractère dominant du fonctionnement agronomique de l'oasis est d'abord sa grande complexité:

- de par l'extrême morcellement des parcelles (2450 propriétaires pour 500 ha),
- de par les multiples possibilités de les mettre en culture et de gérer leur sols,
- de par la complexité de la gestion de l'eau.

Mais c'est aussi sa grande vitalité: l'extension continue des surfaces cultivées depuis 1906 a été rendue possible par un accroissement des ressources en eau et sa distribution par canaux bétonnés, mais aussi et surtout parce que la pression de l'homme existe et que les sols peuvent toujours y être retournés à la main ou ameublés à l'araire grâce à leur structure particulière et leur texture légère.

Les cultures traditionnelles peuvent donc perdurer. En marge de l'oasis se développe une agriculture mécanisée dans les zones d'extensions, la topographie et le parcellaire le permettant. Chaque système utilise au mieux la topographie.

Ces conditions sont celles de beaucoup d'oasis traditionnelles en Tunisie, qui représentent encore en 1988 90% de la superficie des oasis (Lasram, 1990). Elles peuvent se retrouver dans un contexte géologique semblable dans d'autres pays. En effet, si la situation de chaque oasis est particulière (il y a une centaine d'oasis en Tunisie seulement), on peut quand même grouper les oasis traditionnelles, en grandes catégories (Charoy et Torrent, 1988):

- les oasis de dépression, (Lybie, Tunisie, Algérie),
- les oasis de montagne, (Aïr, Tibesti, Tunisie, Maroc, Tunisie, Iraq, Arabie Séoudite, Yemen),
- les oasis fluviales (Maroc, Egypte),

Classification à laquelle il faut ajouter les oasis maritimes (Golfe de Gabès, Djibouti).

El Guettar se classe parmi les oasis de dépression qui doivent leur alimentation à leur position en contre-bas de reliefs montagneux. En milieu aride, les situations endoreiques prédominent et l'association oasis-chott qui caractérise la situation à El Guettar, est fréquente.

A ce titre, les études sur les sols salés que nous allons faire à El Guettar pourront servir de base d'étude, à défaut d'être directement transposables, à d'autres situations semblables, celles des oasis de bas de piemont (Tozeur en Tunisie, Palmyre en Syrie par exemple) dont la vitalité et les possibilités d'extension obéissent aux mêmes impératifs.

DEUXIEME PARTIE- REPARTITION SPATIALE DES SOLS ET DE LEURS SELS.
--

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

4.1- Choix de la méthode.

Les premiers essais d'étude de répartition des sels dans le sols ont été faits au voisinage des canaux d'irrigation (Wadleigh et Fireman, 1949 in USSSL, 1954) sur de petites parcelles. A cette échelle, le 1/15 ème, et sur une seule parcelle, on peut prélever des échantillons et de faire l'analyse de leur extrait de pâte saturée. Dès que l'échelle diminue ou que la surface que l'on étudie augmente, le nombre d'échantillon devient trop élevé pour que cela soit possible.

4.1.1- Problèmes posés par l'étude spatiale.

De plus, quelle que soit l'échelle, dès que la variance de la salure est significative, la quantité de sels mesurée sur un échantillon ne peut plus être extrapolée à un grand volume de sol, et le suivi dans le temps oblige à prélever plusieurs fois des échantillons, donc à perturber le milieu.

Il faut pouvoir analyser la variance de la distribution spatiale, donc disposer d'un grand nombre de mesures, sans multiplier les prélèvements d'échantillons. D'où le recours aux techniques de prospection géophysiques, conçues pour donner une image d'un grand volume de sol.

4.1.2- Les méthodes disponibles.

Les premiers essais ont été les mesures électriques par des électrodes d'écartement variable, dites électrodes de Wenner, plantées dans le sol (Rhoades et Ingvalson, 1971; Le Dain, 1977; Bottraud et al., 1984). Le volume de sol exploré est variable mais le système est encombrant et l'étalonnage difficile.

Une sonde plus pratique, rassemblant les quatre électrodes sur une même tige est venue compléter la panoplie des instruments de mesure de la conductivité électrique des sols in situ (Rhoades et Schilfgaard, 1976). Mais le volume de sol exploré est de l'ordre de quelque dm³ seulement, et le contact des électrodes avec le sol est imparfait aux faibles humidités.

4.1.3- La méthodologie choisie.

C'est pour explorer un volume plus important que les mesures de prospection électromagnétiques, également issues de la géophysique (de Jonc et al., 1979), ont été utilisées. Le contact sol-appareillage n'est plus obligatoire. Cette méthode n'a été que récemment adaptée aux sols (Mc Neill 1980b; Tabbagh 1986) à cause de la difficulté d'obtenir un champ ne pénétrant le sol que sur une profondeur compatible avec le fonctionnement agronomique. Un appareil permettant une profondeur d'investigation inférieure à 150 cm a été mis au point récemment (Job et al, 1992).

L'application principale de la méthode été jusqu'à présent la cartographie des sols salés (Cameron et al., 1981; Williams et Baker 1982; Job 1985a, Boivin et al, 1988).

Le développement récent de **conductivimètres électromagnétiques** permettant les mesures numériques et non plus analogiques a encore accru la possibilité de rétrécir la maille des mesures sur le terrain 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**. On dispose ainsi d'outils d'étude spatiale permettant 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.

4.2- La conductivimétrie électromagnétique.

4.2.1- Principe de la méthode.

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 captées par une spire receptrice qui affiche une déviation galvanométrique proportionnelle à leur intensité.

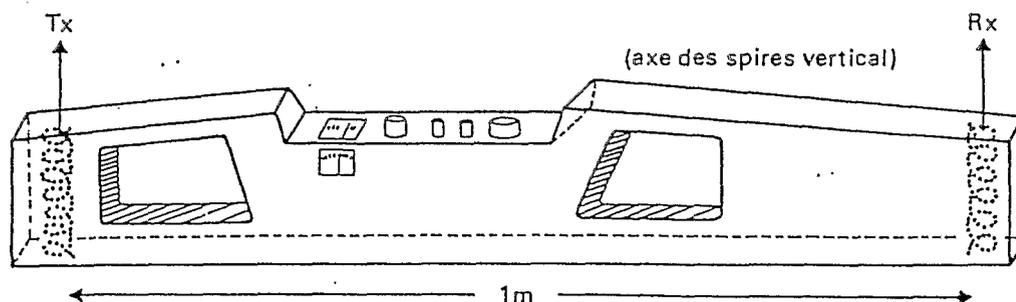
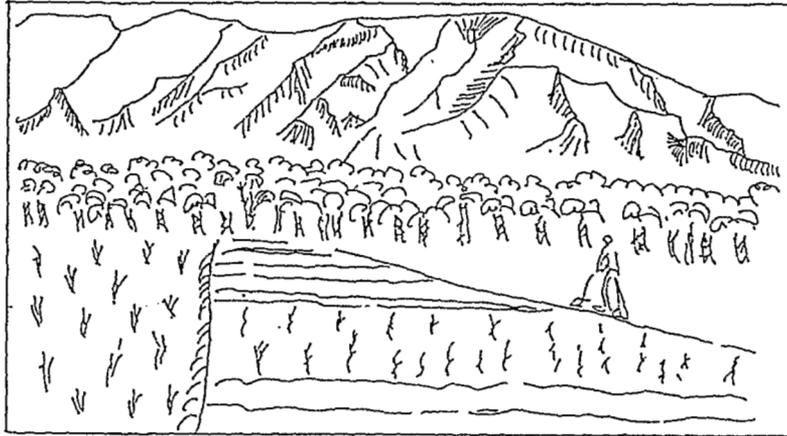


Fig. 4.1- Appareillage de mesure de CEM (Geonics E-M38). Tx est la spire émettrice, Rx la spire receptrice. L'appareil est en position de mesure verticale CEV (c'est à dire l'axe des spires est vertical).

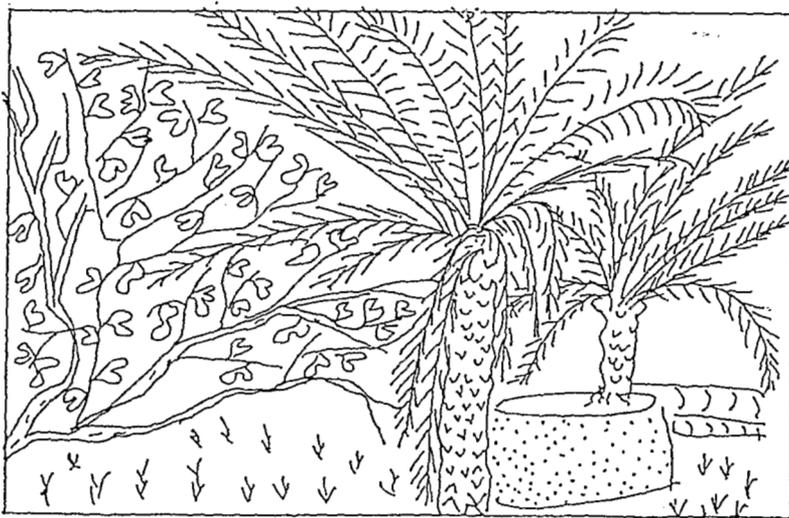
La mesure finale dépend directement de la conductivité propre du sol, plus celle des sels, intégrée sur une profondeur voisine de deux mètres (McNeill, 1980a).



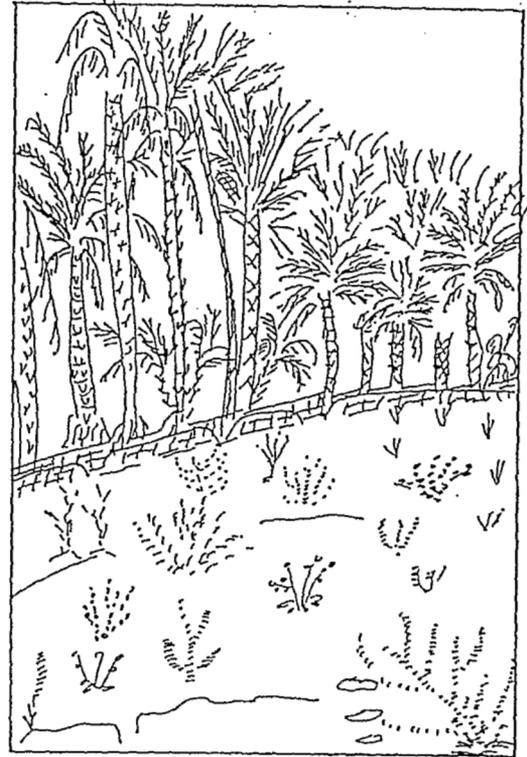
PL.2.1- Parcelle pionnière récupérée sur le chott après les inondations de 1990.



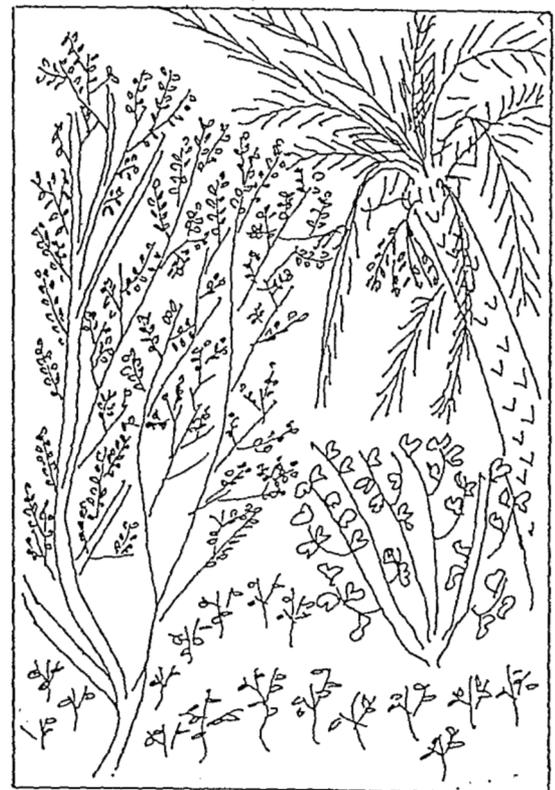
PL.2.3- Parcelle à deux étages de cultures: palmiers Deglet Nour et feverolles.



PL.2.4- Parcelle à deux étages: palmiers et figiers.



PL.2.5- Parcelle cultivée sur trois strates.



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.

4.2.2- Théorie du fonctionnement (McNeill 1980a).

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.4.2). Ces courants produisent à leur tour un champ secondaire H_s qui est mesuré à l'aide d'une spire secondaire. Ss. 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 .

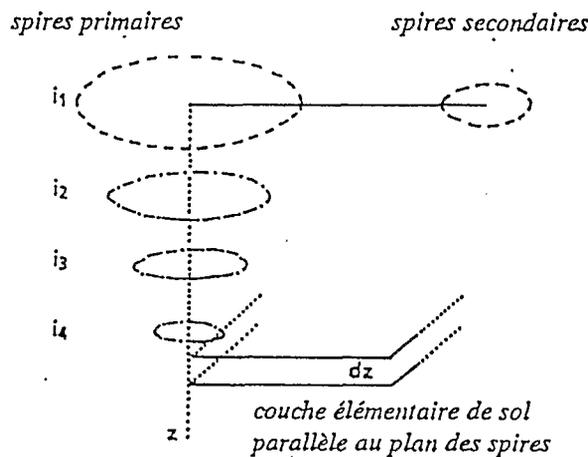


Fig.4.2- Principe de la mesure.

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

$$\begin{aligned} i^2 &= -1, \\ \mu_0 &= \text{permissivité de l'air}, \\ Y_2 &= 2\pi f \mu_0 \sigma, \\ H_s &= \text{champ reçu par Rx dans le vide}, \\ H_p &= \text{champ reçu par Rx dans le milieu mesuré}, \end{aligned}$$

on a, en mode vertical:

$$(H_s/H_p)_v = 2(9 - [9 + 9ys + 4(ys)^2 + (ys)^3]e^{-ys}) / (ys)^2 \quad (3)$$

et, en mode horizontal:

$$(H_s/H_p)_h = 2[1 - 3(ys)^{-2} + [3 + 3ys + (ys)^2][e^{-ys} \cdot (ys)^{-2}] \quad (4)$$

On peut simplifier ces formules en introduisant l'épaisseur d'atténuation δ , distance de parcours pour laquelle l'amplitude de l'onde incidente est divisée par $1/e$:

$$\text{soit:} \quad \delta = (1/\pi f \mu_0 \sigma)^{1/2} = (2i)^{1/2}/y \quad (5)$$

d'où: $ys = (2i)^{1/2} s / \delta = B(2i)^{1/2}$ avec: $B = 1/\delta$ pour $s=1$.

B est appelé nombre d'induction. La mesure de la salure des sols se fait à faible nombre d'induction. en effet, si $B \ll 1$, on peut négliger les interactions entre boucles de courant qui n'apparaissent pas aux faibles courants. De plus, si la conductivité du sol est suffisante, le champ magnétique secondaire rétrodiffusé par le sol, est bien supérieur à la réponse de la susceptibilité magnétique en quadrature que l'on peut négliger (Tabbagh, 1974).

Dans ces conditions, les formules (3) et (4) se simplifient et on obtient finalement une conductivité électrique apparente σ_a du milieu telle que:

$$\sigma_a = 4(H_s/H_p)^{\perp} / 2\pi f\mu_0 s^2 \quad (6)$$

La conductivité globale apparente mesurée est 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.

Notons que négliger le couplage entre les lignes de courant revient à dire que si la conductivité d'une couche horizontale augmente, l'intensité du courant induit dans cette couche et dans cette couche seulement augmente. Cela justifie le calcul de la contribution élémentaire pour chaque couche et la différentiation entre strates que nous utiliserons par la suite.

4.2.3- Utilisation dans un milieu homogène (McNeill 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:

$$\text{en mode vertical:} \quad \Phi_{v(z)} = 4z / (4z^2 + 1)^{3/2} \quad (7)$$

$$\text{et en mode horizontal:} \quad \Phi_{h(z)} = 2 - 4z / (4z^2 + 1)^{1/2} \quad (8)$$

Soit en intégrant:

$$\int \Phi_{v(z)} dz = -1 / (4z^2 + 1)^{1/2} = R_{v(z)} \quad (9)$$

$$\int \Phi_{h(z)} dz = 2z - (4z^2 + 1)^{1/2} = R_{h(z)} \quad (10)$$

z est une variable adimensionnelle (rapport de la profondeur à la distance interspire s). Dans l'appareil que nous avons utilisé, un EM-38 de Geonics Ltds, s est égal à 1.

4.2.4- Résolutions de niveaux de salinité différente: le profil salin.

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 valeur $z=0,6$:

En comparant les graphes des équations (7) et (8), on voit qu'en mode horizontal les couches superficielles donneront une réponse relative plus grande que les couches profondes (fig.4.3). 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.

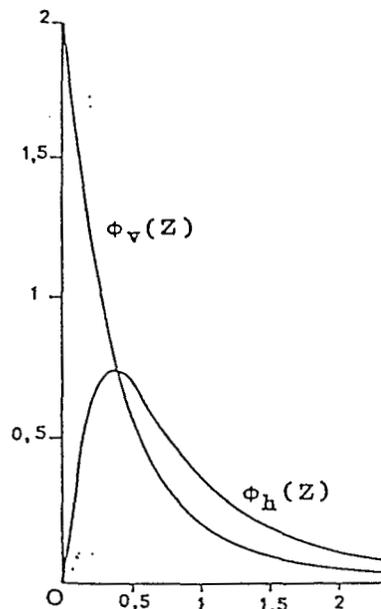


Fig.4.3- Graphe des équations (7) et (8).

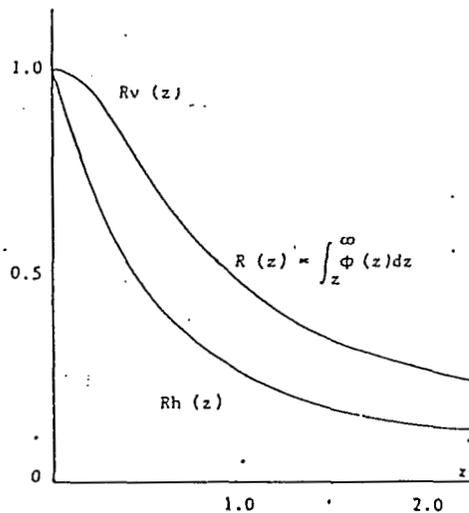


Fig.4.4- Graphe des équations (9) et (10).

Supposons que pour rendre compte du mouvement des sels dans le sol après une irrigation qui pénètre jusqu'à 50 cm de profondeur, nous voulions différencier les salures respectives S_1 et S_2 (en unités quelconques) des niveaux 0-50 cm et 50-200 cm. On peut théoriquement écrire (d'où l'indice t):

$$CEV_t = I_2.S_1 + I_4.S_2 \quad (11)$$

$$CEH_t = I_1.S_1 + I_3.S_2 \quad (12)$$

avec:

$$I_1 = \int_0^{0,5} 4z.dz/(4z^2+1)^{3/2} \quad (13)$$

$$I_2 = \int_0^{0,5} (2-4z)dz/(4z^2+1)^{1/2} \quad (14)$$

I_3 et I_4 étant les mêmes fonctions intégrées des bornes 0,5 à 2.

L'intégration conduit à:

$$CEV_t = 0,29.S_1 + 0,71.S_2 \quad \text{et} \quad CEH_t = 0,58.S_1 + 0,41.S_2$$

Système qui admet comme solutions:

$$S_1 = 2,45.CEH_t - 1,45.CEV_t \quad \text{et} \quad S_2 = 2.CEV_t - CEH_t$$

Soit, si l'on pose $r_t = CEV_t/CEH_t$:

$$S_2/S_1 = (r_t - 0,5)/(1,2 - 0,7r_t) \quad (15)$$

On mesure r_t et on en déduit le rapport S_2/S_1 .

On peut donc, en théorie, et en restant dans les conditions de validité des équations (7) à (10), séparer deux horizons de salure différente. Dans la pratique, on mesure CEV_e et CEH_e , on calcule $r_e = CEV_e/CEH_e$. On calcule ensuite les mesures de CEM en fonction du rapport S_2/S_1 mesuré sur les échantillons (cf. Annexe H). Les écarts observés par rapport à la théorie viennent de deux causes principales:

1- D'abord parce que les lignes de courant se concentrent dans le premier milieu conducteur qu'elles rencontrent. Les écarts seront minima pour les sols à accumulation de sels en profondeur et maxima dans le cas contraire.

2- Ensuite parce que la théorie est basée sur une teneur en eau des sols, une porosité et une température constantes avec la profondeur, ce qui n'est pas toujours le cas, tant s'en faut. On peut en effet négliger l'effet de la porosité si le sol n'a pas été labouré récemment (Job et Loyer, 1988), on peut considérer que la température du sol varie peu dans les conditions habituelles de mesure (le matin), mais la teneur en eau ne peut être considérée comme approximativement constante que si le ressuyage est achevé.

4.2.5- Conductivité des sols.

La conductivité des sols dépend de la conductivité propre du sol, de la porosité, de la teneur en eau, de la teneur en sels et de la température.

- Effet de la porosité.

Soit σ_x la conductivité propre du sol et σ_1 celle du liquide remplissant les pores. On démontre que le rapport σ_1/σ_x diminue dans l'ordre pour les roches dures, les argiles, les grès, les sables, les diatomées. Plus la porosité est grande, plus l'effet de l'électrolyte interstitiel est important.

Si π_0 est la porosité, on peut écrire pour un empilement régulier de sphères de rayon petit par rapport à la distance de leur centre:

$$\sigma_x/\sigma_1 = (\pi_0)^n \quad \text{(relation d'Archie)} \quad (16)$$

ou encore:

$$\sigma_x/\sigma_1 = 2\pi_0 / (3 - \pi_0) \quad \text{(relation de Maxwell)} \quad (17)$$

L'exposant n variant de 1,2 pour des sphères parfaites à 1,85 pour un empilement de particules plates. Ces deux relations ne s'appliquent qu'à des sols saturés en eau. Si seulement une fraction f de la porosité est remplie par de l'électrolyte, on a:

$$\sigma_x/\sigma_1 = f^2 \quad (18)$$

Si f est petit, la conductivité mesurée peut également être très petite. Dans la pratique il est donc préférable de faire les mesures à un taux d'humidité du sol assez élevé pour les sols peu ou moyennement salés en tous cas. Une formule plus précise a été développée (Rhoades Raats et Prather, 1976):

$$(\sigma_x - \sigma_s) / \sigma_1 = \theta (a\theta + b) \quad (19)$$

Formule dans laquelle:

σ_s = conductivité de surface dépendant de la teneur en argile et de sa capacité d'échange,

θ = humidité volumique,

a,b = coefficients de texture.

La relation (19) montre qu'aux salures et humidités faibles, l'influence de l'argile est prépondérante, au contraire, aux fortes salures, le rapport σ_s/σ_1 reste faible et la conductivité du sol dépend fortement de θ et de σ_1 .

Elle est intéressante car elle tient compte du cheminement des ions conducteurs à la surface des argiles. Par contre elle n'est pas utilisable sur le terrain car on ne peut pas raisonnablement mesurer les conductivités de surface et les coefficients de texture à chaque point de mesure. C'est pourquoi nous proposons une méthode plus simple dans le paragraphe suivant.

Méthodologie.

Ces remarques préliminaires nous permettent de définir les conditions de mesure sur le terrain: la salure d'un sol sera d'autant plus fidèlement mesurée que l'humidité sera proche de la capacité au champ sur la profondeur maximum.

Nous interviendrons donc après irrigation quand le sol contiendra entre 20 et 35 % d'eau par unité de volume sur 120 cm de profondeur.

4.2.6- Conductivité des matériaux constitutifs.

Les argiles ont une conductivité qui augmente avec leur saturation en cations et l'humidité volumique (tab.4.1). La conductivité apparente de la roche mère est déterminée séparément, en dehors d'une zone salée. Dans l'équation qui lie la salure vraie à la salure globale apparente, cette valeur est l'ordonnée à l'origine (voir tab. 4.2 et détail au chapitre suivant).

Materiau	σ_1 mS/m	Θ_v %	réf.
60% kaolinite, 20% clastique	1	46	(1)
80% " " 20 " "	16	42	(1)
95% " " 5 " "	1	25	(1)
15% " " 65 " " , 20 montmor.	65	21	(1)
dolomies	0.2 à 3	sec	(2)
argiles	5 100	var	(4)
alluvions et sables	1 100	var	(3)
calcaires	0.5 16	var	(3)

Tab.4.1- Conductivités de quelques argiles et roches.

Un certain nombre de données ponctuelles ont été obtenues expérimentalement dans des matériaux gypseux semblables au gypse qui constitue le squelette des sols de notre oasis (tab.4.2):

aridisols divers	CEV mS/m	Θ_p . %
98% gypse lenticulaire (Sebkha Jiroud, Syrie)	6	4
98% gypse lenticulaire (Euphrate, Syrie)	12	
95% " " " (Dune Bir Tlili)	8	2
calloutis et dolomies (Orbata, Tunisie)	16	8

Tab.4.2- Conductivité globale apparente de quelques formations superficielles de pays arides.

(1) Walker J.W., & al., 1973- Observations of the Electrical Conductivity of the Tropical Soils of Western Puerto Rico. *Geol., Soc., Amer., Bull.*, Vol. 84, p:1743-1752.

(2) Telford W.M., & al., 1976- *Applied Geophysics. Chap.5, Cambridge Univ., Press, New York.*

(3) Culley R.W., & al., 1975- *E-phase System for Detection of Buried Granular Deposits. Symposium on Modern Innovations in Subsurface Exploration, 54th annual Meeting of Transport Research Board.*

(4) Sellman P.V., 1976- *Preliminary Evaluation of New LF Radio Waves and Magnetic Induction Resistivity over Permafrost Terrain. Nat., Res., Council Canada Techn. Mem n°119. Symposium on Permafrost Geophysics.*

4.3- 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). Chaque mesure prend une trentaine de secondes seulement. La contribution individuelle de chaque couche de sol espacée de 30cm à la lecture finale est schématisée par des barres horizontales de différentes longueurs (Dans l'exemple choisi, la salure et l'humidité du sol sont supposées être réparties de manière uniforme de 0 à 200 cm de profondeur).

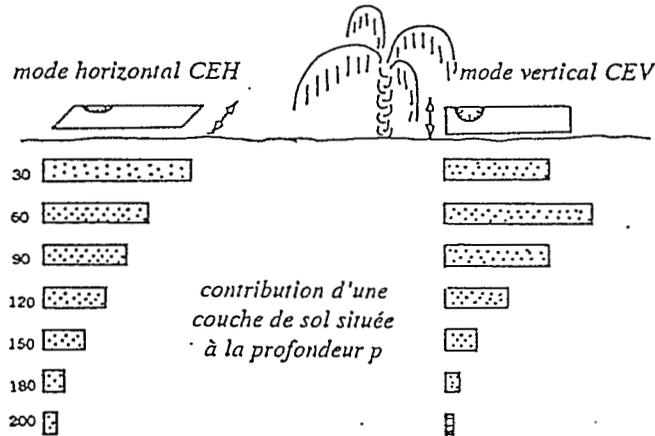


Fig.4.5- Pratique des mesures sur le terrain.

4.3.1- Etalonnage sur les sols d'El Guettar.

- Principe.

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, intégrée de 0 à 120 cm. On peut étalonner de même les valeurs CEV sur une profondeur de 200 cm. Compte tenu des caractéristiques de nos sols et de la proximité de la nappe en certains endroits, nous utiliserons pour l'étalonnage les mesures en mode horizontal CEH.

On mesure sur une vingtaine de points les conductivités électromagnétiques CEV et CEH du sol, les conductivités au cinquième, au dixième et à saturation: CE_{cn} , CE_{dx} , CE_{st} ainsi que l'humidité pondérale Θ_p d'échantillons prélevés tous les 20 cm jusqu'à 120 cm de profondeur.

Les relations linéaires entre ces paramètres sont ensuite établies et toute mesure de terrain est ainsi transformable en conductivité d'extrait, pourvu que l'humidité du sol puisse être évaluée.

Les mesures CEV et CEH dépendent en même temps de la concentration saline dans le sol et de son humidité. Il faut donc évaluer l'influence propre de chacun de ces deux paramètres, par une régression multiple, par exemple.

- Etalonnage par régression multiple.

Pour l'interprétation des données de terrain CEH en terme d'extrait saturé de sol moyen de 0 à 120 cm, sur toute la gamme des concentrations, on a prélevé 31 profils de sols dont on mesuré l'humidité et les conductivités électriques CEst CEcn et CEdx tous les 20 cm. La gamme des concentrations couvertes est de 2 à 45 dSm⁻¹ en terme de CEst et la gamme des humidités pondérales de 5 à 31 %

La régression multiple conduit à:

$$CEH(\Theta_p) = 70,3 * CEcn + 4,6 * \Theta_p - 136 \quad r=0,964 \text{ et } 1,5 < CEcn < 8 \quad (20)$$

Ces résultats sont utilisables pour la famille des sols gypseux de l'oasis, dans un grand domaine d'application.

échant.	CEV	CEH	Θ_p	CEcn	échant.	CEV	CEH	Θ_p	CEcn
G14/DC89	200	235	21,0	4,05	G15/DC89	250	170	23,2	3,30
G22/DC89	420	300	25,0	4,20	GUE7/889	38	23	5,0	2,00
GUE6/889	78	48	17,3	2,20	GARE/290	58	45	18,6	2,03
ET490	339	304	23,0	4,35	ET590	270	230	22,1	3,90
ET690	306	260	29,2	4,10	ET790	412	426	28,2	3,12
RGET1	335	342	18,6	5,40	RGET2	119	93	20,6	2,30
SGET1	340	454	17,2	5,30	SGET2	125	107	20,3	4,21
SGET3	372	487	17,5	4,16	SGET4	463	540	22,8	8,03
GAD1/290	66	50	17,0	2,08	2262/290	170	105	27,6	2,14
239A/290	217	195	34,2	2,60	MAR1/290	80	50	14,5	2,14
SID1/290	110	70	15,3	1,84	2262/C89	80	66	14,4	1,50
ET190	205	185	19,7	3,20	ET390	345	445	18,8	5,84

Tab.4.3- Echantillonnage à différentes humidités pour l'étalonnage.

On peut donner alors un tableau de correspondance pratique qui permet d'estimer les valeurs de la conductivité globale apparente des sols de 0 à 120 cm de profondeur, pour une teneur en eau donnée:

CEH	50	100	150	200	250	300	350	400
Θ_p 15	2	7	12	16	21	26	30	35
Θ_p 20	<1	5	10	14	19	23	28	33
Θ_p 25	1	2	7	12	17	21	26	31

Tab.4.4- Correspondance entre les valeurs de CEH (mS/m) et celles de l'extrait saturé moyen (dS.m⁻¹) à différentes humidités du sol.

La mesure de référence est l'extrait à saturation (Campbell, in USSSL, 1954). On sait que cette mesure est particulièrement fiable (Job, 1979; Pleyjsier, 1986), cependant il est plus pratique de faire des extraits au cinquième ou au dixième. Pour cette raison nous avons établi les relations entre ces différents extraits.

En prenant le maximum d'échantillons pour lesquels on a des couples de résultats d'analyse d'extraits, on obtient les résultats suivants :

$$CEst = 6,61 \times CEcn - 8,8 \quad r=0,994 \quad CEcn > 1,4 \quad n=91 \quad (21)$$

$$CEst = 6,22 \times CEcn - 7,43 - 0,02 \times \text{Gypse}\% \quad n=91 \quad (22)$$

$$CEcn = 1,84 \times CEDx - 0,99 \quad r=0,960 \quad n=50 \quad (23)$$

Ces dernières équations peuvent être utilisées dans toutes les formations de piémont des jebels de la région de Gafsa, dont les sols ont une composition semblable (Belkhodja et al., 1973), bien que le gypse ne s'y trouve pas sous la même forme. Toutefois, comme le montre le calcul des résidus (fig.4.6), l'erreur d'estimation de CEst à partir de CEcn est importante à partir de 26 dS.m⁻¹ de valeur estimée pour CEst.

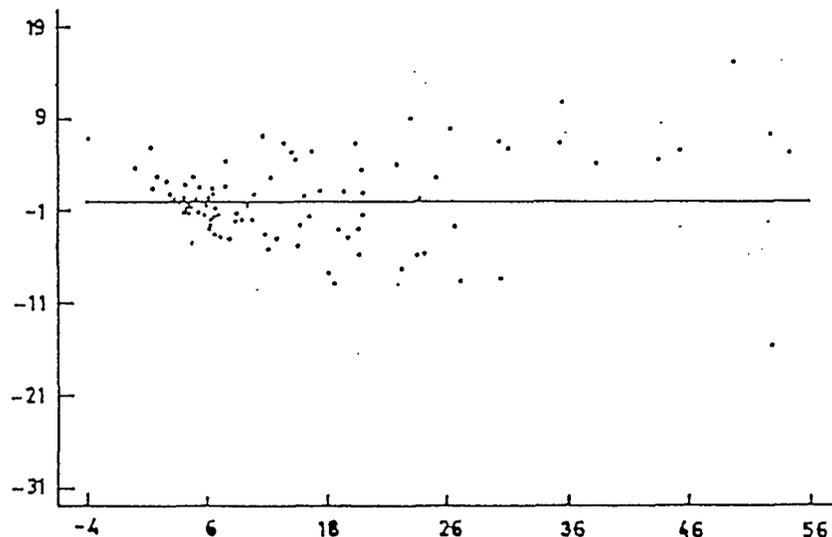


Fig.4.6- Erreur d'estimation (résidus) dans le calcul de CEst à partir de CEcn (en dS.m⁻¹ sur les deux axes).

En définitive, en combinant (20) et (21), on obtient:

$$CEst = 0,094 \times CEH_{(20)} - 4,68 \quad \text{avec:} \quad 50 < CEH_{(20)} < 150 \quad (24)$$

Equation qui servira dans toute la suite à mesurer la salure apparente globale sur 120 cm, soit CEst, qui sera la variable permettant d'évaluer l'intensité de la salure du sol.

4.3.2- Le plan d'échantillonnage sur tout l'oasis.

L'oasis comporte 2543 parcelles de taille moyenne 30x30 m Elle est stratifiée suivant la topographie. Nous avons donc adopté un plan d'échantillonnage semi-aléatoire qui convient en pareil cas (Webster et Oliver, 1990): chaque parcelle est d'abord repérée par rapport à un système d'axes orthonormés.

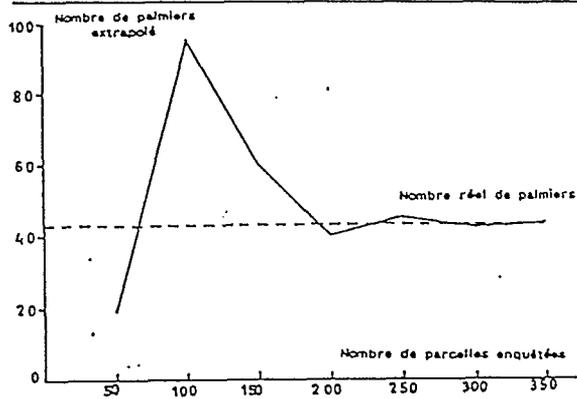


Fig.4.8- Convergence des estimations du nombre d'arbres totaux à partir de tirages d'un nombre n de parcelles mesurées.

1. The first part of the document is a list of names.

2. The second part is a list of dates.

3. The third part is a list of locations.

4. The fourth part is a list of events.

5. The fifth part is a list of people.

6. The sixth part is a list of organizations.

CHAPITRE V- LES SOLS DANS LE PAYSAGE NATUREL.

5.1- Introduction.

Le bassin versant d'El Guettar est constitué de sols jeunes, d'apport colluvial ou alluvial dans la partie amont, d'apport éolien dans la partie aval. Ils sont peu évolués et n'ont plus de rapport géochimique avec leur roche mère d'origine, située à plusieurs kilomètres de l'oasis même.

Il n'y a pas d'horizon diagnostique textural, en effet les sols se sont développés soit à partir de colluvions calcaires, soit à partir de gypse éolien. Dans les deux cas la teneur en argile est faible, de 10 à 15 % et les possibilités d'évolution limitées dans le contexte climatique aride. Par contre 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, objet de ce chapitre, 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- Le paysage amont: le piemont non salé.

5.2.1- Les sols de piemont.

Ce sont des cailloutis calcaires colluvionnés par les oueds qui érodent les formations crétacées du synclinal du jebel Orbata (voir fig.2.12 et 2.14, pages 18 et 19). Leur épaisseur varie de trente mètres au pied de l'affleurement du jebel à cinq mètres au niveau du village d'El Guettar. Cette épaisseur varie d'Est en Ouest perpendiculairement à la ligne de plus grande pente.

La fraction inférieure à 2 mm ne représente que 10 à 20% du cailloutis et la fraction supérieure à 2 mm comprend des cailloux et des roches calcaires jusqu'à 20 cm de diamètre.

Les sols.

Ce sont des sols minéraux bruts, profonds, très perméables. Leur mise en place est récente.

Depuis 1990, ils sont l'objet de travaux de conservation des eaux et des sols sur l'ensemble du piémont (banquettes, jessours), tant pour limiter l'érosion que pour conserver l'eau de pluie et permettre des cultures en sec (oliviers, pistachiers).

5.2.2- transition avec les sols cultivables.

La transition avec les sols cultivables, situés à mi-pente se fait progressivement, au niveau du village et des installations humaines qui se sont faites sur les parties hautes des cônes protégées des crues. La couverture pédologique de transition est caractérisée par une succession de paléosols enterrés sous des éboulis récents, intercalés avec des voiles de sables éoliens. On les identifie par la présence d'un mince horizon organique contenant parfois de l'outillage caractéristique, lames moustériennes ou lames à débitage levallois. Les 8 premiers mètres ont été mis en place après le paléolithique moyen puisqu'un hermaïon, sorte d'autel constitué d'un tas de sphéroïdes de silex accompagné d'outils de tradition moustérienne datés de 40.000 BP ont été trouvés à 8 mètres sous le sol actuel (Gruet 1954).

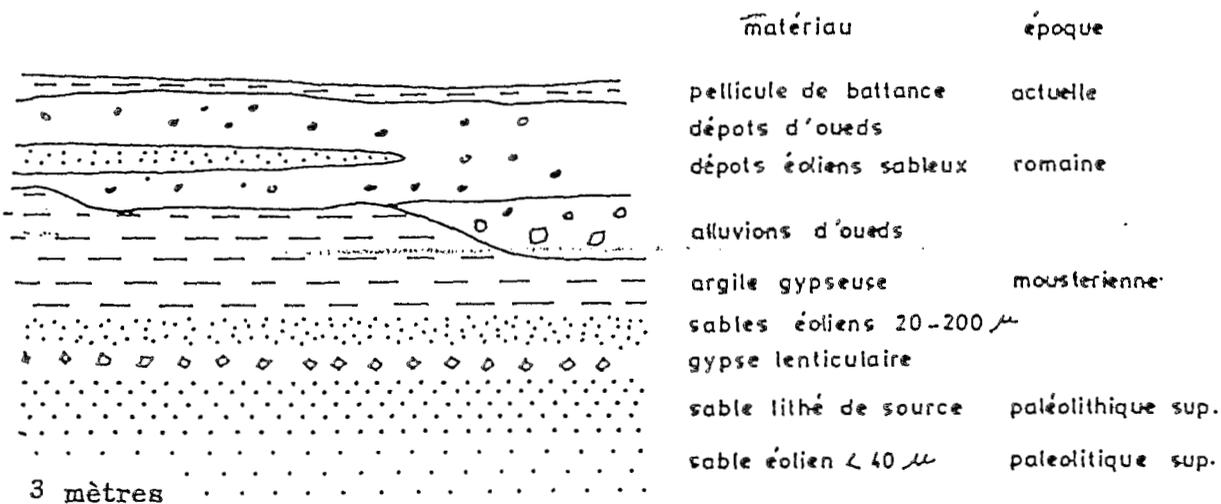


Fig.5.1- Coupe verticale schématique d'un profil de sol d'apport au niveau de la fouille du gisement moustérien, sur les trois premiers mètres.

De 0 à 8 mètres, on trouve des couches successives de formations gypseuses, intercalées de sables éoliens et fluviatiles en fines couches, ces derniers étant attribués à la proximité d'une source par l'auteur des fouilles (fig.5.1).

On distingue des phases d'apport carbonaté et des phases d'apport gypseux (fig.5.2), entre des passées de sable, avec niveaux individualisés de sels et de matière organique.

On peut dire qu'il y a très nettement séparées des phases de mise en place de colluvions calcaires, des phases d'apports fluviatiles à argiles gypseuses et des phases d'apports éoliens, sables et peut-être gypse lenticulaire. Ce dernier point pourrait indiquer que le niveau du chott était plus haut de 17 mètres que le niveau actuel, mais cela demanderait des études plus fines.

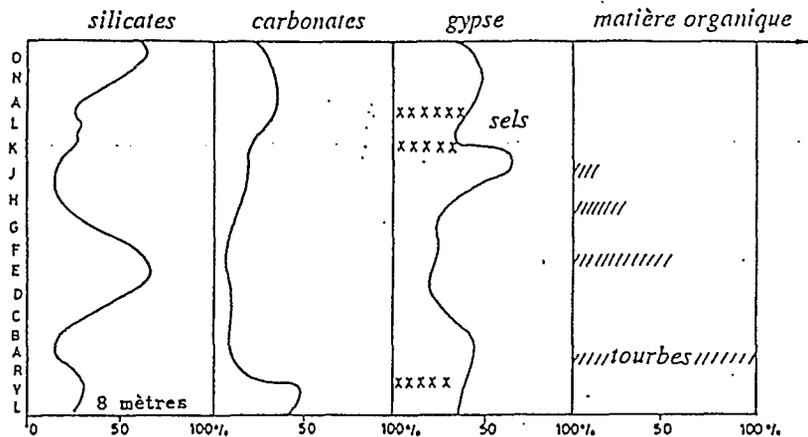
Les sols.

Fig.5.2- Teneurs en gypse, carbonate de calcium, carbone organique et silice des sols de pente au niveau du gisement moustérien sur 8 mètres d'épaisseur (d'après Gruet, 1954). Les lettres renvoient à la description archéologique originale de chaque couche sans tenir compte de son épaisseur.

5.3- Le paysage aval: le chott salé.

5.3.1- Le chott.

Le chott est constitué de sol gypseux- salin sur plus de trois mètres d'épaisseur avec un horizon hydromorphe très salé au contact de la nappe, situé entre 150 cm et 300 cm.

La mise en place de ces sols s'est faite à partir de quatre oueds qui drainent les formations miopliocènes avoisinantes. En régime normal, ces oueds ne coulent pas. Lors des pluies centenales, comme en janvier 90, (247 mm en trois jours pour une pluviométrie annuelle de 150 mm) le chott et les parties basses de l'oasis sont inondées. Il y a donc deux régimes de fonctionnement pédologique du chott:

- un régime normal pendant lequel les phénomènes les plus importants sont la remontée des sels en surface en été et la mobilisation par le vent du gypse de surface principalement en automne,
- un régime exceptionnel pendant lequel le chott est inondé et les sels redistribués dans les parties basses.

Ces phases alternées de concentrations des sels et de redistribution des sels et du gypse constituent la dynamique principale de mise en place des sels de la partie cultivable des sols du bassin versant d'El Guettar. C'est également, en ce qui concerne la redistribution des sels par les eaux d'inondations, une menace pour les sols mis en culture.

Deux méthodes ont été utilisées pour étudier la distribution des sels à la surface du sol et à l'intérieur du profil, et leur remobilisation: la conductivimétrie électromagnétique pour l'étude du régime normal et la simulation de pluie pour le régime exceptionnel.

Les sols.- Le chott en régime normal.

Le chott est un système concentrateur de sels. Par capillarité les sels s'accumulent en surface pendant les mois secs (avril à octobre).

Le profil salin, mesuré par le rapport $r = CEV_{(20)}/CEH_{(20)}$ passe graduellement de 1,1, valeur qui indique un lessivage interne entre 0 et 120 cm à 0,77, valeur qui montre une forte accumulation de sels en surface (fig.5.3).

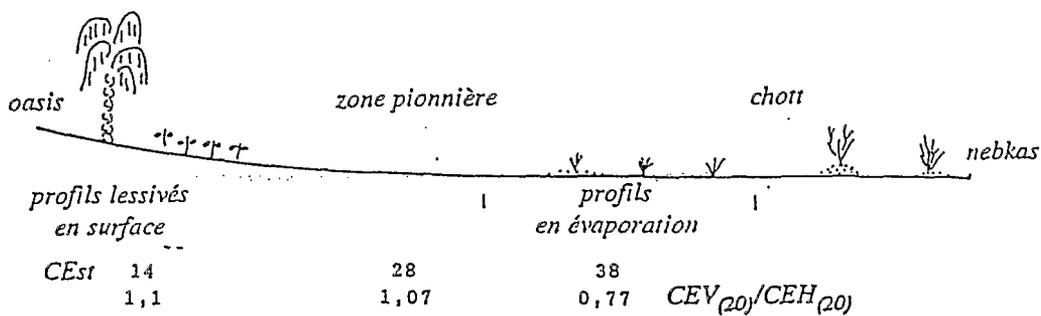


Fig.5.3- Distribution des sels à la surface du chott.
(exemple pris en automne 1989)

- Les sels de surface.

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 de ces sels est: gypse, bloedite thénardite, hexahydrate, halite, konyaïte et l'ordre de précipitation à partir de l'eau de mer: gypse, halite, bloedite, epsomite, hexahydrate (Braitsch 1971, in Gueddari p:92). A l'exception de la konyaïte et de l'eugstérite, 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.

Les sols.

En quelques endroits, les efflorescences salines contiennent de la dolomite, de la calcite et du gypse, dont on ne peut pas dire s'ils ont été précipités sur place ou non. Ces sels précipitent en effet toujours à partir d'un mince voile limoneux que l'on sait contenir ces composés de calcium, il est difficile de prélever des efflorescences non contaminées, bien qu'on ait opéré à la loupe binoculaire pour le prélèvement.

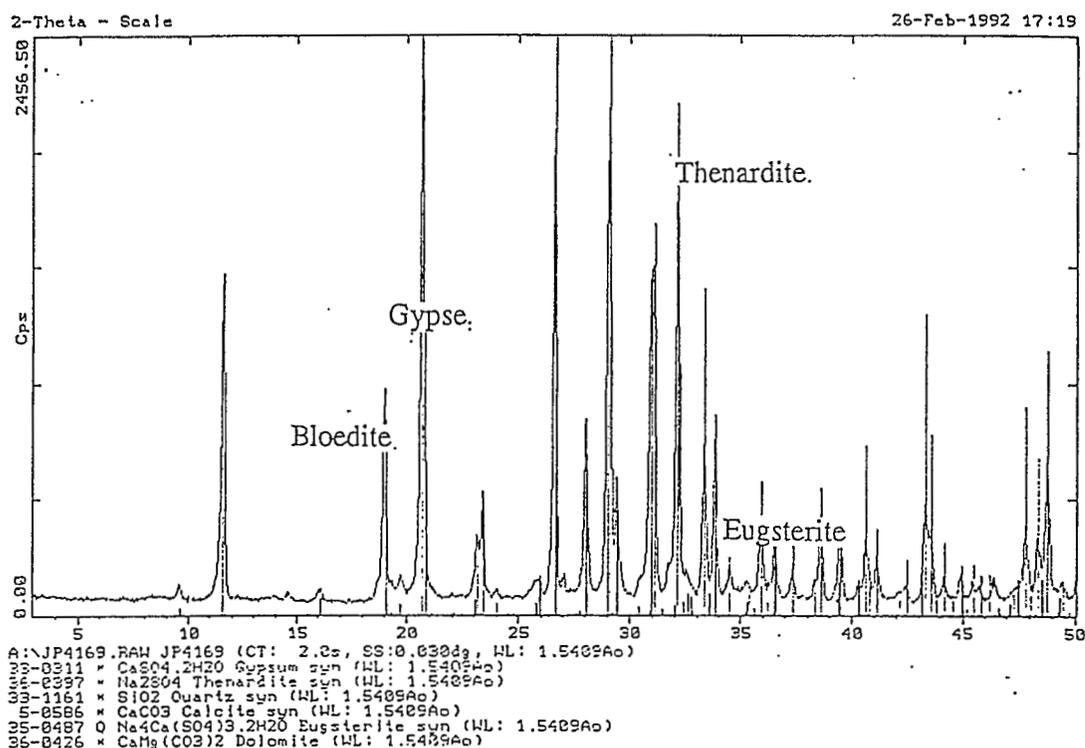


Fig.5.4- Diagrammes de diffraction X d'un sel prélevé en surface d'une parcelle de bordure de chott le 19 Nov.1991.

L'absence de kainite que l'on trouve dans ces deux dépressions s'explique par la faiblesse des concentrations de potassium à El Guettar.

Ces résultats sont en accord avec le diagramme des concentrations croissantes d'ions appariés dans la nappe présentés p.76, qui montre une prédominance des associations ioniques sulfatées sodiques et sulfatées magnésiennes, que l'on peut considérer comme des précurseurs d'espèces devant précipiter, ceci est très important.

D'autre part, on peut représenter la composition des eaux de nappe et d'extraits saturés du sol dans un diagramme de Jaenecke, même si la solution n'est pas saturée en halite. Il suffit pour cela de soustraire la concentration des ions calcium non associés aux carbonates de la concentration des ions sulfates (Perthuisot, op. cit, p:183). On voit alors la position des eaux de nappe par rapport aux domaines de stabilité des sulfates magnésiens et potassiques.

On se rend compte alors que c'est l'augmentation de la concentration en Mg^{++} par rapport à SO_4^- qui conduit à la précipitation d'hexahydrate. Ainsi se trouve confirmée l'importance de l'enrichissement en magnésium qui est le trait géochimique le plus important de notre système.

Les sols.La mobilisation du gypse de surface du chott.

Après une pluie, on peut observer dans la partie ouest du chott, le tri des particules lenticulaires de gypse en surface et leur mobilisation par le vent sur quelques centaines de mètres avant qu'elles ne buttent sur les petites nebkas de bordure au pied desquelles elles s'accumulent. L'analyse montre que la pluie sépare les cristaux lenticulaires en surface entre 100 et 300 μ en les dégageant de leur gangue argilo-calcaire et en les étalant à la surface du sol en réseau très lâche (fig.5.5).

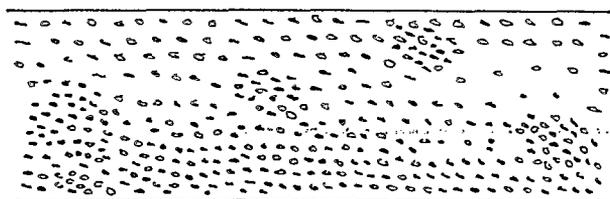
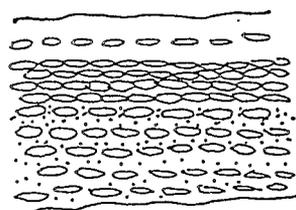


Fig.5.5- Surface du chott après une pluie de 10 mm. Tri des lentilles de gypse. (grandeur nature)

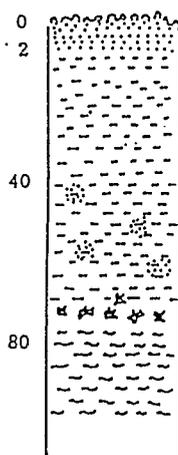


e (mm)	CaCO ₃ %	Argile %	Gypse lent. %	Min. lourds
0	0	0	99	1
10	18	10	70	2
20	32	15	60	3

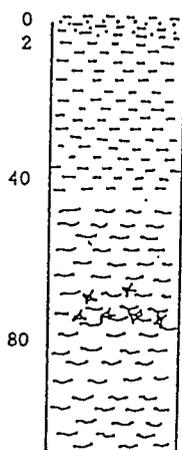
Fig.5.6- Tri du gypse lenticulaire par les pluies. Schéma de la répartition verticale du gypse et du CaCO₃.

5.3.2- Les sols non cultivés de bord de chott.

Ce sont des sols à horizon hydromorphe proche de la surface. Le profil salin est variable au cours de l'année, croissant en profondeur en hiver, décroissant en été. La végétation est claismée, *Tamarix*, *Traganum nudatum* et *Artrophytum scoparium*. La nappe se situe entre 30 cm et 200 cm de la surface. En été, l'horizon superficiel est composé de sels de sodium et magnésium précipités en boursouflures caractéristiques surmontant une moquette de limons calcaires complètement déstructurée. En hiver, les sels sont lessivés dans le profil et il ne reste en surface que du gypse lenticulaire, très bien trié autour de 0,1mm par l'action des pluies.

*Les sols.*Profil d'été:

- 0-01 boursouflures de sulfates de sodium et magnésium, blanches à jaunâtre.
- 01-2 moquette de limon calcaire déstructuré par des cristaux de sels de sodium et magnésium.
- 2-40 gypse lenticulaire à texture limoneuse, cimenté par limon calcaire, structure particulaire, tendre.
- 40-70 gypse lenticulaire avec quelques taches d'oxydo-réduction, structure plus massive.
- 70-80 gypse lenticulaire avec quelques roses des sables millimétriques.
- 80+ nappe phréatique salée, sulfato magnésienne de 12 à 20 dS.cm⁻¹.

Profil d'hiver:

- 0-01 voile de cristaux de gypse lenticulaires triés à 0.1 mm.
- 01-2 gypse lenticulaire pu calcaire (2 à 8%).
- 2-40 gypse lenticulaire à texture limoneuse, cimenté par limon calcaire, (CaCO₃ de 15 à 25%) structure particulaire, tendre.
- 40+ nappe phréatique salée, sulfato magnésienne de 8 à 15 dS.cm⁻¹.

Fig.5.7- Evolution du profil de sol type en bordure de chott, de l'été à l'hiver.

5.3.3- Fonctionnement en régime exceptionnel.

Lessivage par les pluies.

Afin de voir comment se redistribuent en surface les sels lors des fortes pluies, nous avons procédé à une simulation de pluie sur quatre parcelles représentatives de l'état de surface du chott. Les détails du protocole de simulation et de l'appareillage utilisé sont décrits dans Casenave et *al.*, 1982.

Les sols.

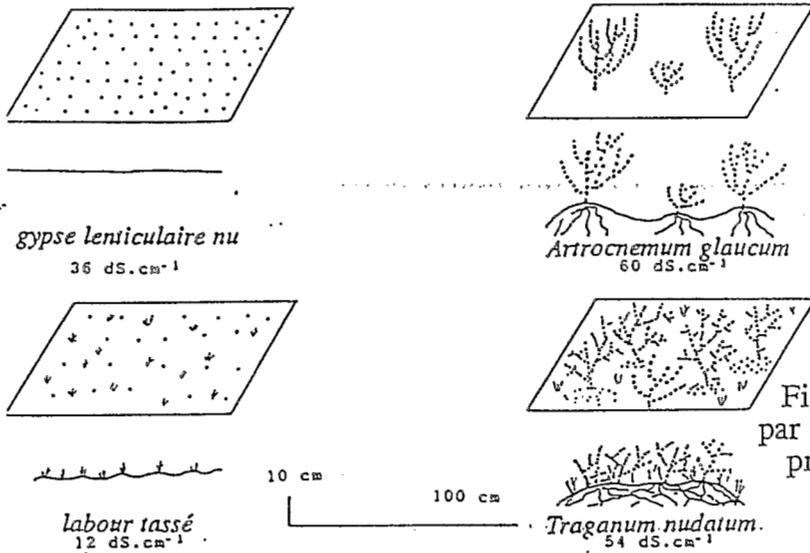


Fig.5.8- Etats de surface testés par simulation de pluie (salures du premier cm au 19 Nov.1990).

- Parcelle n°1: *Arthrocnemum glaucum*.

Le sol est couvert à 35% par des touffes d'*Arthrocnemum glaucum*, très commune dans le chott (Fig.5.8). La surface est constituée de 20% de sol nu, 8% de voile éolien dispersé, 35% de pellicule de battance. La pente est de 1,8%, la salure du premier cm en surface avant simulation est de 60 dS.m⁻¹.

- Parcelle n°2: semis d'ail.

C'est une parcelle gagnée sur le chott dans l'année après raclage de la salure superficielle, simplement labourée. La totalité du m² de simulation est constituée de gypse sableux. Il n'y a ni pellicule de battance, ni recouvrement végétal. La salure du premier cm de surface est de 12 dS.m⁻¹ seulement, la pente est nulle.

- Parcelle n°3: sol nu.

Le sol nu est constitué d'une fine moquette de mélange intime gypse, sel, carbonate de calcium, de 0,5 à 1,5 mm d'épaisseur. Il n'y a que 3% de la surface d'essais en pellicule de battance et pas du tout de couvert végétal. La salure est de 36 dS.m⁻¹. La pente est de 2,2%.

- Parcelle n°4: *Traganum nudatum*.

Le sol est couvert à 66% par des touffes de *Traganum nudatum* qui forment de petits monticules de 10 cm de hauteur où sont piégés les gypses et limons éoliens qui couvrent 17% de la surface, soit autant que la pellicule de battance (16%). La pente moyenne, assez forte, est de 8,6%.

Les résultats de six essais de pluie d'intensité programmée de 20, 30, 40, 60 et 120 mm.h⁻¹ sont les suivants:

Les sols.

1- L'érosion dépend bien sûr fortement du couvert végétal et de la pente, mais elle reste faible dans l'ensemble. Par contre le lessivage des sels est très important, surtout là où la végétation forme des nebkas qui favorisent les remontées capillaires.

2- La pluie d'imbibition est très faible, quelle que soit l'intensité des pluies.

3- Sur les sols de chott nus, dès que l'intensité des pluies dépasse 20 mm.h⁻¹, comme celles des 23 et 24 janvier 1990, (de 25 à 45 mm.h⁻¹), le coefficient de ruissellement avoisine 100%.

4- Le lessivage superficiel des sels est important dès le premier quart d'heure de pluie et diminue ensuite régulièrement quelle que soit l'intensité de pluie.

5- Une pluie de 30 mm.h⁻¹ intervenant un jour après une pluie de 40 mm.h⁻¹ remobilise un peu plus de sels au début du deuxième jour qu'en fin du premier.

6- La fréquence des pluies joue donc un rôle prépondérant dans la remobilisation des sels de surface. Cela s'explique car les sels qui précipitent en couche très mince à la surface du sol, quelques mm seulement, sont très solubles et sont dissous et entraînés par la moindre pluie qui ruisselle.

7- Ensuite, pendant l'intervalle entre deux pluies, il y a diffusion dans les premiers cm du sol imbibé par la pluie (entre 1,5 et 3 cm pour des pluies de 15 min. d'intensité de 15 mm.h⁻¹) et entraînement rapide par la pluie suivante.

8- Le gypse se dissout de manière remarquablement constante quelle que soit l'intensité de pluie et quelle que soit la parcelle testée.

9- La quantité de sels entraînée par les pluies est dans l'ordre décroissant: chlorure de sodium, sulfates de magnésium, sulfates de sodium, gypse, carbonates.

L'apparente contradiction entre l'homogénéité des sols du chott et la répartition extrêmement variable des sels en surface est maintenant explicable: la végétation crée des points de fixation des particules éoliennes. Ces nebkas accumulent par capillarité les sels qui forment une mince couche remobilisable par la moindre pluie qui ruisselle, ils s'accumulent alors dans les petites cuvettes où ils s'infiltreront localement dans les sols.

- Les inondations de janvier 1991.

La position de l'oasis en bordure du chott la rend vulnérable aux apports d'eaux de ruissellement. Les pluies exceptionnelles peuvent provoquer des inondations qui perturbent complètement le système. Cela a été le cas en 1969, et de nouveau en 1990, à la suite du détournement de l'oued El Mellah de son bassin versant vers le chott qui s'est complètement rempli sur 45 km² (Fig.2.4, page 9). Toute la bordure sud de l'oasis est restée sous l'eau, certaines parcelles pendant un an et demi avant que l'évaporation n'assèche complètement le chott, en août 1991.

On peut prévoir les sels qui vont précipiter et l'ordre de précipitation en calculant au cours du temps la concentration des ions appariés dans l'eau qui stagne à la surface:

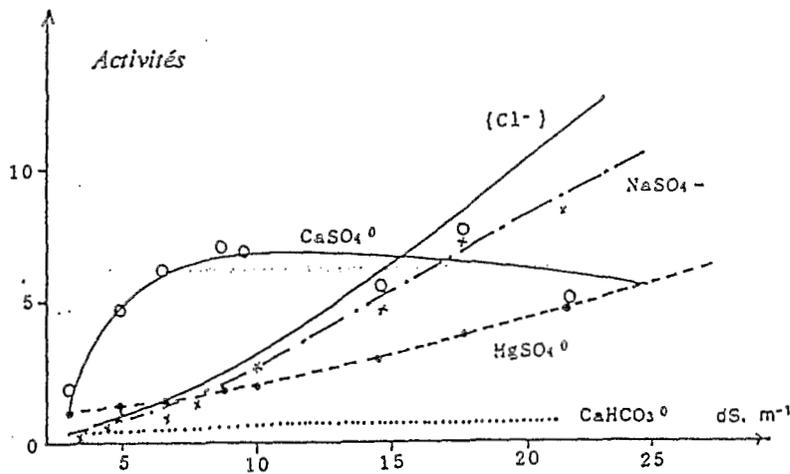


Fig.5.9- Activités des ions appariés dans l'eau d'inondation du chott au cours de l'évaporation de Février 90 à Août 1991 (calcul par le programme Bilion, Job et Cochonneau, 1985), en fonction de la conductivité électrique.

On remarque qu'il y a moins de sulfates de magnésium que dans l'eau de nappe (cf. p: 76) et qu'il faut attendre une salure de 25 dS.m⁻¹ pour que la concentration en ions MgSO₄ surpasse celle des ions CaSO₄. La sursaturation de la solution par rapport au gypse n'existe qu'au début du processus d'évaporation.

5.4- L'horizon gypseux naturel.....

Entre les sols de colluvion en amont et le chott en aval se trouvent les sols sur lesquels s'est développée l'oasis.

Ce sont des sols à texture limoneuse à limono-sableuse, leur caractère géochimique principal est une forte teneur en minéraux calciques, de 20 à 35 % en carbonate de calcium réparti dans toutes les fractions granulométriques et 25 à 60% en gypse. En moyenne de 40 à 70% en volume du sol est constitué de composés du calcium, de 30 à 40% de vides, les silicates n'occupant que 10 à 20% du volume de sol.

Leur caractère commun est un horizon gypseux que l'on retrouve à des profondeurs variables, allant de quelques cm au niveau de la voie ferrée, soit à la cote 227 m, à 80 cm dans la partie médiane.

Cette couche, non structurée, constituée de beaux cristaux lenticulaires de gypse est remarquablement homogène en texture. On la trouve sous plusieurs formes suivant son degré de pénétration par les racines et suivant la proximité de la nappe. C'est l'horizon le plus important agronomiquement de tous les sols de l'oasis car il abrite les racines et la nappe.

Ce gypse peut provenir soit d'une précipitation *in situ* à partir de l'eau d'irrigation ou de la solution du sol, comme c'est le cas dans de nombreux oasis de Tunisie (Pouget, 1969), soit d'un apport éolien.

Les sols.

Il s'agit de deux dynamiques complètement différentes et dans chacun des cas l'évolution des sols et leur comportement sous irrigation est radicalement différent.

C'est pourquoi nous avons pensé utile d'entrer un peu dans les détails de sa genèse et de montrer que sa mise en place est exclusivement éolienne.

5.4.1- Les horizons gypseux en zone aride.

Les formations gypseuses que l'on rencontre dans notre contexte climatique ont été très étudiées, en Algérie (Durand, 1963), et surtout en Tunisie où elles font partie de tous les paysages du sud. Les études ont porté d'abord sur l'inventaire et la classification (Bureau et Roederer 1960; Viellefon, 1978), la morphologie des encroûtements dits "de nappe" (Coque, 1962; Coque et Jauzein, 1966; Pouget, 1968), et leur fonctionnement hydrique, en particulier dans les oasis maritimes (Chauvet et Pouget, 1965; Gaddas 1971 et Kchouk, 1962; Viellefon et Zante, 1981; Mtimet, 1987).

Les formations éoliennes ont été signalées (Coque, 1962; Durand, 1963; Trichet 1965), mais leur importance potentielle a été sous-estimée en tant que sols cultivables. Elles sont pourtant présentes dans la majeure partie des oasis continentales situées en bordure de chott où leurs caractéristiques, nappe phréatique proche de la surface, et danger de salinisation important se retrouvent inmanquablement. Ce sont de bons repères pour suivre la formation des sols et leur différenciation sous irrigation. Le gypse est en effet un bon marqueur de la pédogénèse, pour plusieurs raisons:

- la morphologie des cristaux est une bonne indication de sa provenance et des conditions de sa formation (Trichet, 1965),
- c'est un minéral tendre qui porte les traces d'un transport éolien même sur de courtes distances,
- sa solubilité est en même temps suffisamment faible pour que l'on puisse suivre les dissolutions et assez élevée pour que l'on retrouve les ions Ca^{++} et SO_4^- dans la solution du sol,
- enfin il se prête bien à un dosage rapide par thermogravimétrie entre 60 et 120°C (Viellefon, 1978; Job et Mouheich, 1984).

Toutes ces raisons concourent à faire de l'horizon gypseux notre référence dans l'étude de la mise en place des sols.

5.4.2- Caractères pédologiques de l'horizon gypseux.

Les sols sont constitués de gypse sur une profondeur qui varie de 80 à 250 cm suivant la position topographique. Dans les sols cultivés ce gypse est enrichi en matière organique sur une profondeur qui peut atteindre 60 cm. Dans les parties basses de l'oasis ce gypse est enrichi en argile et donne naissance à un horizon à pseudo-gley. Qu'il existe ou non un horizon anthropique ou à pseudo-gley, ou les deux, on trouve toujours l'horizon gypseux. Seule son épaisseur change. Il est parfaitement homogène dans les zones non cultivées et fortement envahi de racines de palmiers dans les zones cultivées. Sa densité apparente varie de 1,45 à 1,55 en profondeur, sa teneur en argile de 5 à 15%, sa teneur en $CaCO_3$ de 25 à 10% en profondeur.

Les sols.

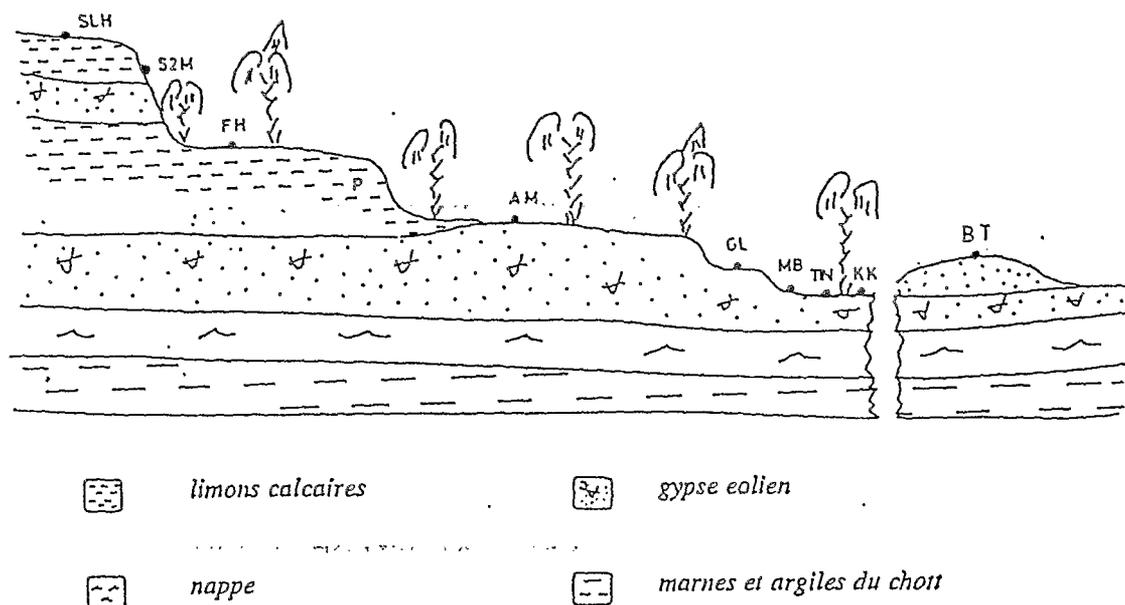


Fig.5.10- Situation topographique des profils analysés.

5.4.3- Origine éolienne de l'horizon gypseux de l'oasis.

Deux arguments démontrent l'origine éolienne de cet horizon: sa composition minéralogique et sa granulométrie.

Composition:

Les trois fractions $45-75 \mu$, $75-100 \mu$ et $100-125 \mu$, qui constituent l'essentiel de la répartition granulométrique ont à l'intérieur de chaque profil une composition semblable. La fraction $100-125 \mu$ est la plus importante et la plus homogène. On y reconnaît des proportions diverses entre lentilles et polyèdres (Pe), qui sont des fragments de lentilles cassées par le transport (Tab.5.1 et 5.2).

Contenu	Echantillon								
	U4	FH	MB	GL	SLH	AM	TN	52M	BT
Lentilles	35	25	45	98	95	80	85	60	90
Polyèdres	50	70	50	0	5	19	12	35	9
Anhydrite	5	1	1	0	0	0	1		0
Quartz	10	4	4	2	0	1	2	5	1
émoussé	***	**	****	*	**	**	***	***	****

Tab.5.1- Composition centésimale de la fraction 100-125 microns de l'horizon gypseux après lavage.

Les sols.

Contenu	Echantillon								
	U4	FH	MB	GL	SLH	AM	TN	52M	BT
argile		5	-	-	30	-	-	-	-
lentilles	30-80	5-20	20-80	30-		90		95	98
gypse Pe°	10-60	60-80	20-60	-	-	-	-	-	-
anhydrite	5-50	1-3	1-3	0-1	-	-		-	-
cendres*	oui	oui	oui	1-2	1-2			-	-
quartz	1-10	-	15					1	2
tubes	oui	-	oui	-	1-3	-	1-3	-	-
coquilles°	-	oui	-	-	-	-	-	-	-

Tab.5.2- Composition moyenne des profils analysés.

* Dans la fraction 200-300 μ seulement.

° Dans la fraction > 1 mm seulement.

On y reconnaît également, en proportion de 0,5 à 2%, les éléments allogènes suivants, qui n'ont pas pu se développer sur place:

- Des fragments de coquilles d'helicidés de petite taille, de 1 à 2 mm de diamètre que l'on trouve dans l'échantillon FH.

- Des racines calcarifiées de 2 à 3 mm de long, sans que le calcaire ni le gypse ne soient cytomorphes. Ces fragments constituent l'essentiel de l'élément minéral dans les fractions supérieures à 1 mm, le reste étant composé de petites roses des sables fortement érodées.

- Des polyèdres ou des lamelles, blanc opaque, d'anhydrite.

- Des fragments organiques noirs, de charbons ou de fragments de racines de palmiers.

- Granulométrie.

On utilise la classification suivant les valeurs de phi défini par rapport au diamètre d (mm) des particules, par:

$$2^{-\phi} = d \quad (\text{Nigli, in Brewer 1964}) \quad (25)$$

Trois valeurs de phi sont calculées (Doeglas, 1965) à partir de la courbe cumulative et placées sur deux axes faisant entre eux un angle de 45° (fig.5.11):

- Celle de la médiane de la distribution, notée M_d , portée sur l'axe à 45° C.

- Celles des premiers et troisièmes quartiles notés Q_1 et Q_3 et portés respectivement au dessus et au dessous de la valeur de M_d parallèlement à l'axe des phi.

On peut ainsi représenter de manière simple la distribution granulométrique de nos échantillons et la comparer aux domaines occupés par les dunes et les loess (Doeglas, 1965) en général.

Les sols.

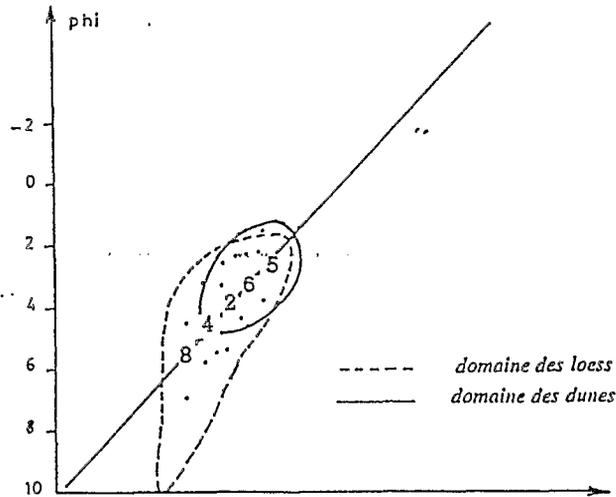


Fig.5.11- Distributions des particules de l'horizon gypseux de référence, comparées à des sables et gypses dunaires bien identifiés (échantillons: 1=FH, 2=GL, 4=U4, 5=TN, 6=MB, 8=52M).

De plus, on sait que seul le gypse se forme à partir de l'évaporation des saumures (Bellair, 1954; Murray, 1964), la présence d'une fraction, même mineure d'anhydrite indique une source allogène d'origine géologique (Murray, 1964; Conley et Jauzein, 1974, cf; note au bas de la page 68), ce qui est confirmé par la présence de minéraux lourds très arrondis.

L'origine éolienne du gypse de notre horizon est donc bien étayée par la composition et la courbe granulométrique quelle que soit la position topographique des échantillons analysés à l'intérieur de l'oasis.

- Argumentation géochimique sur l'origine du gypse.

Pour préciser l'origine des cristaux de gypse des diverses formations, nous avons fait analyser les teneurs en isotopes ^{18}O et ^{34}S des fractions gypseuses des sols de la séquence topographique déjà étudiée, de la dune fossile de Bir Tlili, des eaux de nappe du chott et des eaux de forage servant à l'irrigation. Le principe en est le suivant:

Dans un cristal de composition $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ les concentrations isotopiques étant faibles, on compare les rapports de composition en prenant comme référence des réservoirs d'isotopes supposés stables. L'eau de mer actuelle, dite SMOW (Standard Mean Ocean Water) pour ^{18}O et le sulfure de fer (troïlite) de la météorite de Canon Diavolo en Arizona, dite CDT pour ^{34}S sont les références universelles.

Pour ce dernier élément, le rapport isotopique est censé représenter le soufre primitif. On sait en effet que la composition isotopique du soufre change lors des précipitations, mais aussi et surtout lors des sulfato-réductions bactériennes (Rees, in Pierre, 1986).

$$\text{On calcule donc } \delta = [(R_e/R_r) - 1] \cdot 10^3 \quad (26)$$

avec:

R_e = rapport des isotopes lourds sur les isotopes légers dans l'échantillon,
 R_r = ce même rapport dans l'échantillon de référence (SMOW ou CDT).



Fig.5.11a- Cristaux lenticulaires de l'horizon gypseux. Photographie MEB sur échantillon non remanié (AM non cultivé):

- a1- assemblage des cristaux par points,
a2- monocristal de 10μ au contact d'un monocristal maclé.

L'assemblage est lâche, les sols sont plastiques à l'état humide.

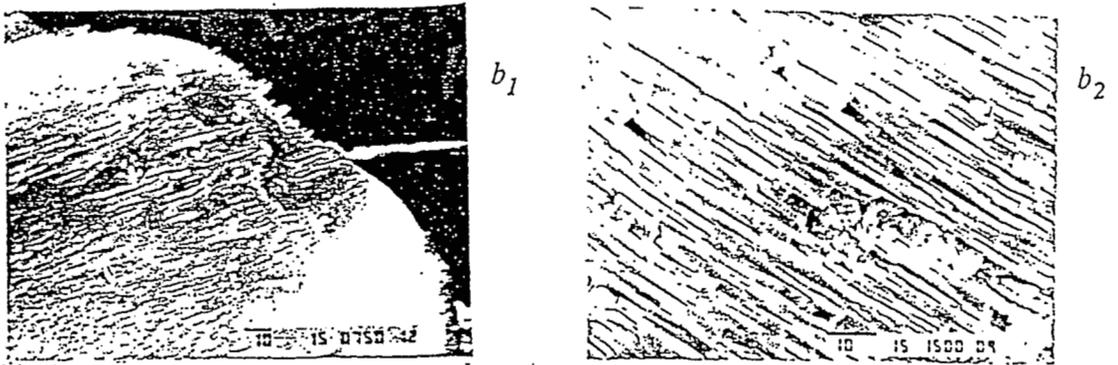


Fig.5.11b- Dissolution des cristaux de gypse:

- b1- stries de dissolution sur monocristal,
b2- détail (suivant le plan 001).

La dissolution du gypse à partir des particules de plus de 100μ de diamètre est infime.

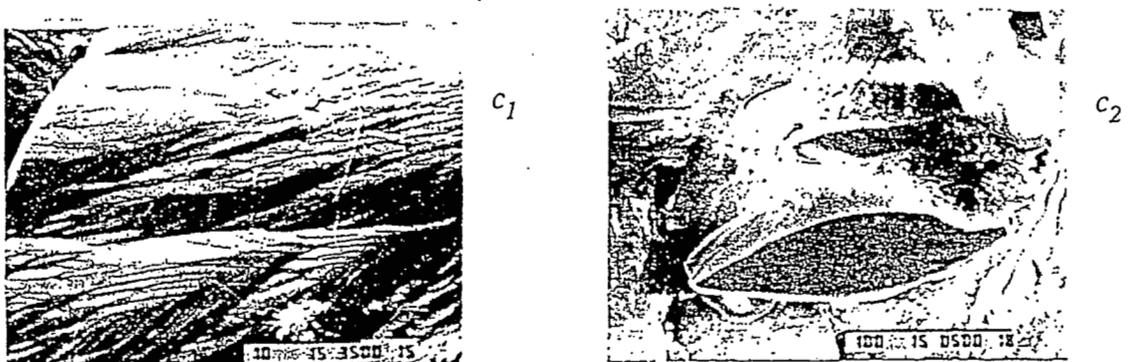


Fig.5.11c- Formation des cristaux de gypse:

- c1 stries de croissance,
-c2 coupe suivant le plan 100.

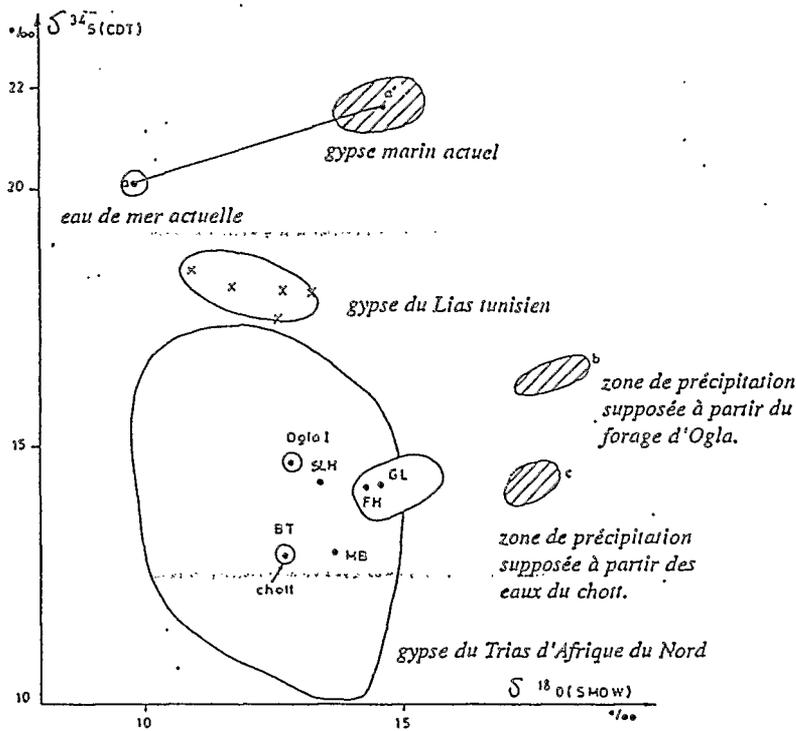


Fig.5.12- Composition isotopique des eaux de forages et des fractions gypseuses des sols.

On voit (fig.5.12) que tous les échantillons se situent dans la zone des concentrations connues du Trias tunisien (Catherine Pierre, comm. pers.). Le gypse des formations mio-pliocènes a donc probablement une origine marine triasique.

D'autre part, si le gypse provenait de la précipitation à partir des eaux du chott ou de celles des eaux du Zebbag inférieur, on aurait une composition isotopique qui se situerait dans les secteurs b et c (on détermine la position de ces secteurs en traçant à partir des points marqués "Ogla 1" et "Chott" une parallèle à aa', c'est à dire en opérant par référence à l'accroissement des concentrations isotopiques observées lors de la précipitation de gypse à partir d'eau de mer actuelle). On en déduit que le gypse présent dans nos sols ne provient pas de la précipitation des eaux actuelles du forage du Zebbag inférieur.

Par contre, si on compare les compositions de la dune fossile de Bir Tlili (BT), qui s'est formée à partir du chott et celle du gypse du profil GL par exemple, on voit que la composition de GL expliquerait une formation plus récente.

(*) On trouve de l'anhydrite géologique (vallée de l'Euphrate, en particulier au niveau de Raqqa) qui peut être remobilisé dans les terrasses des oueds, mais le seul exemple connu de formation d'anhydrite en surface se trouve en Iran en bordure du Chatt El Arab (Murray, 1964).

Les sols.

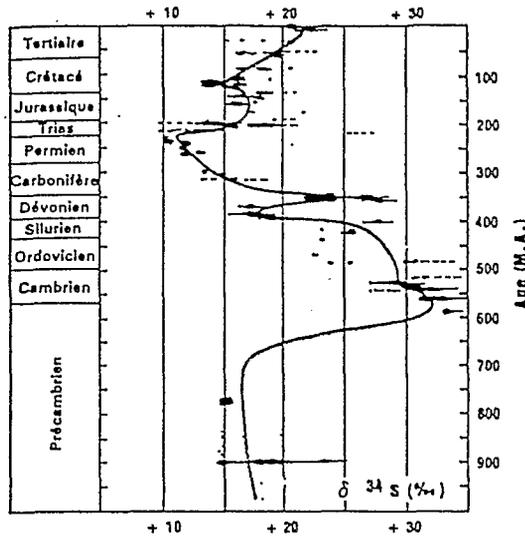


Fig.5.12a- Evolution des teneurs en ^{34}S du sulfate océanique au cours du temps (in Pierre, 1986).

Le microscope électronique à balayage permet de voir que la cristallisation s'est faite régulièrement (fig.5.11c, page 67), mais par accroissements successifs, ce qui suggère un milieu aéré (Bonneau, 1981).

5.5- Mise en place des sols de bas de pente.

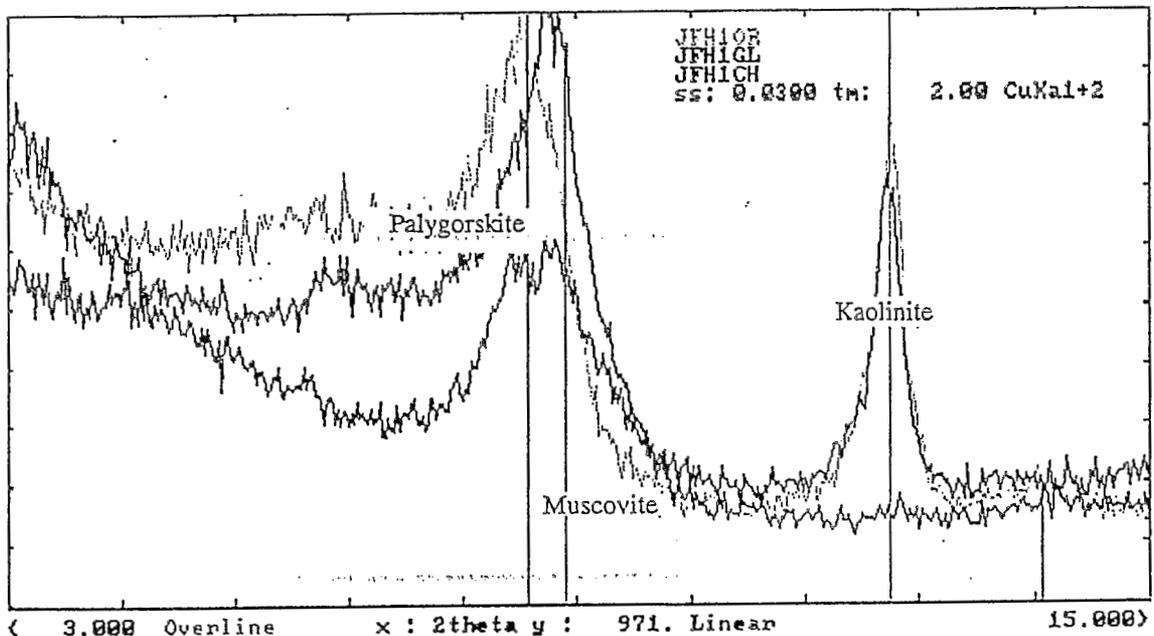
On peut montrer que la mise en place des sols de bas de pente s'est faite de manière homogène par l'analyse de leur composition minéralogique.

5.5.1-Minéraux argileux.

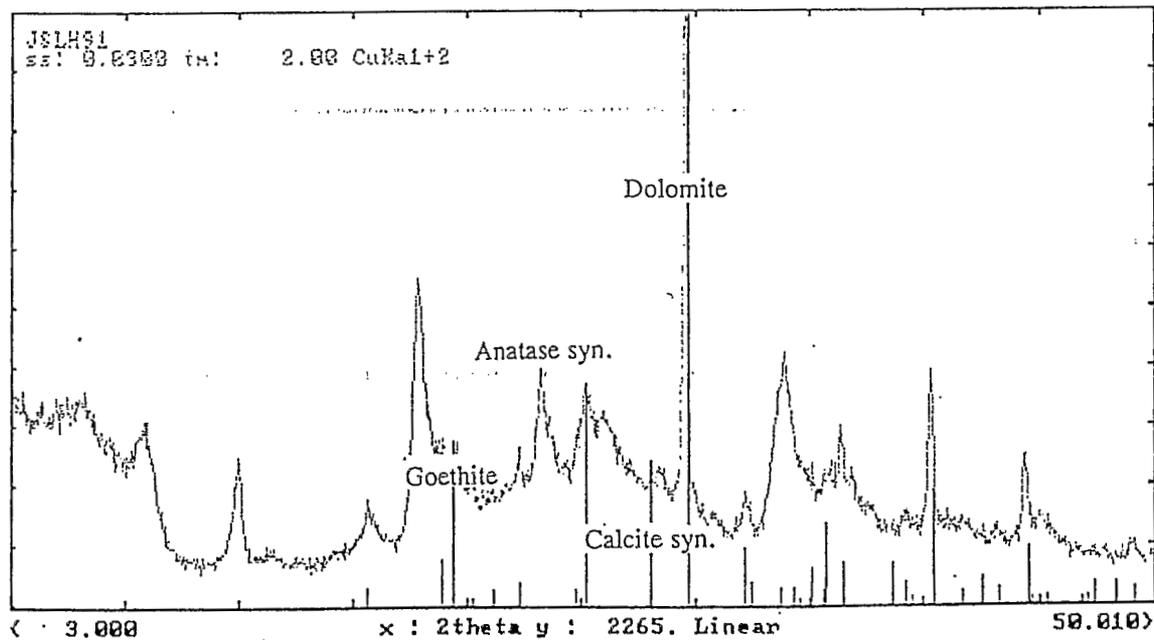
La fraction argileuse analysée par diffractométrie des rayons X, (raie $\text{Cu-K}\alpha$), montre que l'on trouve à peu près dans toutes les fractions et dans tous les profils le même faciès général:

- Un pic très net de kaolinite à 7,17 Å, un pic important d'illite à 10,06 Å et un autre de palygorskite (fig. 5.13).
- Il y a une faible proportion dans la plupart des profils de chlorite et d'une smectique non identifiée mal cristallisés. Tous ces minéraux existent dans les sols du chott et de ses environs immédiats (Sassi 1962).
- L'illite et la palygorskite viennent des dépôts du chott, on la trouve en surface. Il est normal de retrouver ces minéraux dans tous nos sols. Ce sont les premières argiles à subir la déflation éolienne.
- La montmorillonite ne se trouve en grande quantité qu'en profondeur. Elle est protégée de la déflation, sauf aux endroits où les oueds pénètrent dans le chott, mais ce sont des surfaces limitées.

Les sols.



21-0958 I (Mg,Al)₅(Si,Al)₈O₂₀(OH)₂.8H₂O Palygorskite
6-0263 I KAl₂(Si₃Al)₅O₁₀(OH)₂ Muscovite IT M RG
14-0164 I Al₂Si₂O₅(OH)₄ Kaolinite IT A RG



5-0586 * CaCO₃ Calcite syn
35-0426 * CaMg(CO₃)₂ Dolomite
33-1161 * SiO₂ Quartz syn
29-0713 I FeO(OH) Goethite

Fig.5.13- Diagrammes de rayons x.

- 1- (en haut): échantillon FH: fraction fine de l'horizon 80-100, olivette de la partie amont de l'oasis.
- 2- (en bas): échantillon SLH: sol brut de l'horizon 60-95 cm, culture sur trois strates, partie basse de l'oasis..

Les sols.

- Par contre on la trouve en grande quantité dans le Jebel Mdilla où elle constitue de 80 à 90% du stock argileux (Sassi 1962). Qu'on ne la trouve pas dans les sols de l'oasis tendrait à prouver que le versant nord du Jebel Mdillah ne participe pas à la formation des sols d'El Guettar que ce soit par transport éolien ou par érosion hydrique suivie de remobilisation par le vent.

- Quant à la kaolinite qui n'a pas pu se former dans un contexte riche en cations basiques, on la trouve dans toutes les formations mio-pliocènes environnantes en abondance. Il faut bien admettre qu'elle est alloène.

5.5.2- Minéraux lourds et calcaire.

La fraction des sables vrais, est en moyenne de 2% en poids, comme dans le chott. On trouve à tous les niveaux, de 80 cm à 180 cm de profondeur, du quartz, du rutile, de la goëthite et de l'anatase. Ces minéraux existent dans le chott à l'exception de la goëthite qui n'a pas été signalée. Leur association n'est d'ailleurs pas très caractéristique.

La dolomite et la calcite sont présentes dans tous les échantillons. L'implication géochimique de leur distribution suivant les profils sera discutée en détail au paragraphe 5.6.

5.5.3- Conclusions partielles:

La nature des argiles, la forme et la granulométrie des monocristaux lenticulaires de gypse, leur faible émoussé permettent de concevoir une alimentation à partir du chott pour le gypse et à partir de la déflation du chott et des abords immédiats du bassin versant mio-pliocène pour les argiles et la faible fraction sableuse. Cette mise en place est très homogène sur l'ensemble de l'oasis. Elle a été étudiée pour l'horizon gypseux non perturbé entre 80 et 200 cm de profondeur, mais les conclusions sont valables pour l'ensemble des sols de l'oasis.

Actuellement, les particules de gypse sont triées en surface par les premières pluies d'automne à partir du matériau en place et remobilisées par le vent. Il s'agit donc d'un processus physique et non pas d'une précipitation à partir de solutions qui se concentrent dans le chott à la différence de ce que l'on peut observer dans le chott El Jerid et la sebkha de Zarzis (Sud tunisien) par exemple.

Il y a donc deux dynamiques saisonnières:

1- une dynamique physique de remobilisation du gypse lenticulaire du chott, en automne.

2- une double dynamique chimique qui se manifeste par:

- la précipitation de sels de magnésium et de sels de sodium en croûtes de surface (en été),

- leur redistribution à l'intérieur du profil des sols de chott (en hiver).

Les sols.

5.6- La nappe phréatique.

5.6.1- Mouvement des sels.

La nappe phréatique a été captée et canalisée sous-terre par les foggaras. En amont de l'oasis elle draine les formations de piémont, en aval elle est en relation intime avec les sols du chott. Qu'en est-il au niveau des formations de l'oasis ? Pour le voir, nous avons fait une étude détaillée de la distribution des sels dans la nappe phréatique à partir de 53 puits prélevés au printemps 1991 dans la zone salée de l'oasis, complétés par 17 sondages de nappe dans les endroits sans puits. Nous avons ainsi couvert toute l'oasis avec une maille de 250x250m à peu près régulière.

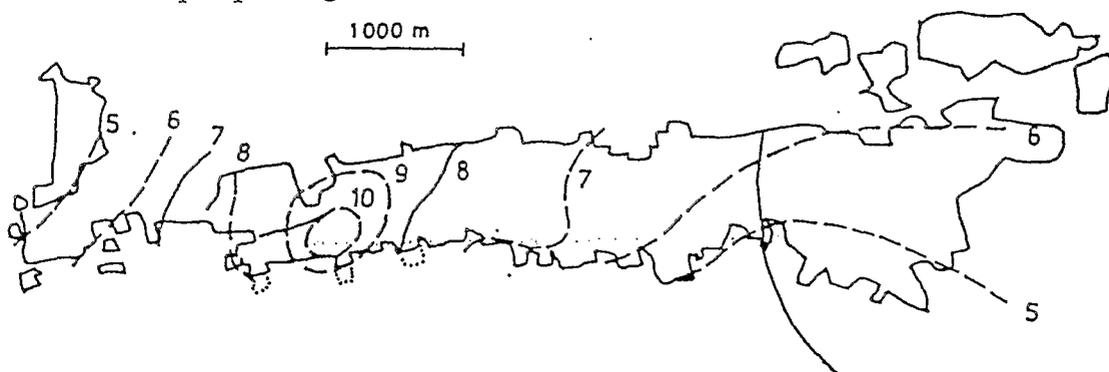


Fig.5.14- Distribution des conductivités électriques de la nappe phréatique ($dS.m^{-1}$).

Il n'y a pas de puits en amont de la voie ferrée qui est, rappelons le, une zone de jardinage habitée située à plus de 10 mètres au dessus de la nappe. Il n'y a pas non plus de puits dans le chott où la nappe affleure. Ceci explique la forme tronquée des lignes d'isosalinité de la fig.5.14 où l'on remarque par ailleurs la convergence des concentrations vers les parties basses voisines du chott.

Ce gradient 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.5.15a).

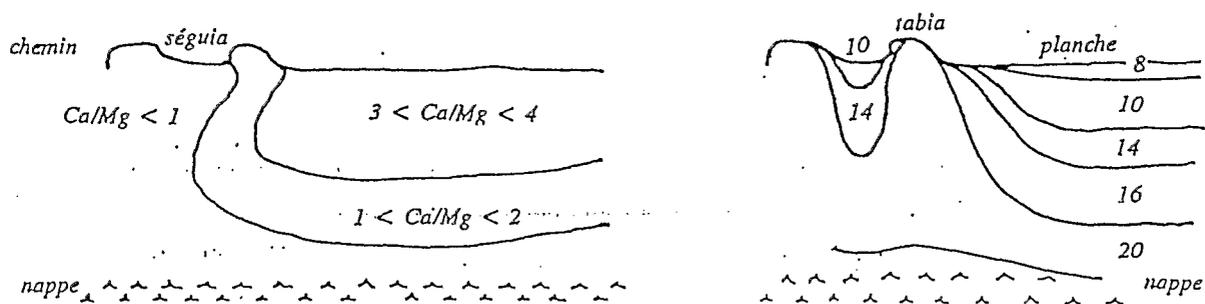


Fig.5.15 -Parcelle cultivée sur trois strates, répartition en profondeur: a)- du rapport Ca/Mg, b)- des salures en dSm^{-1} dans l'extrait à saturation.

Les sols.

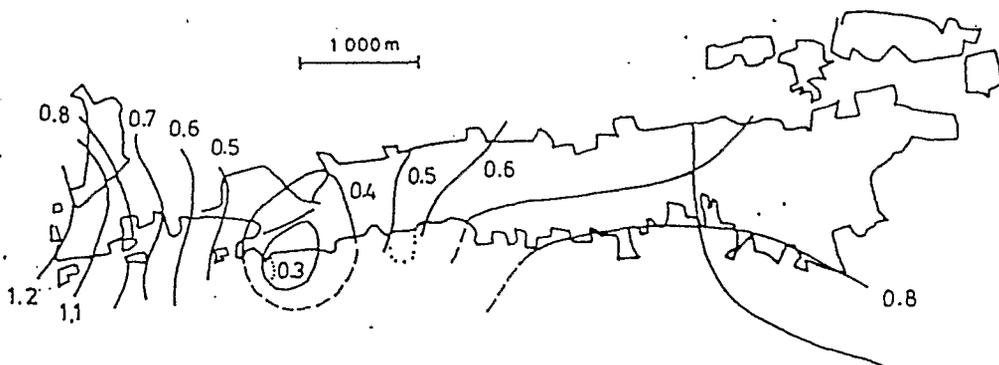


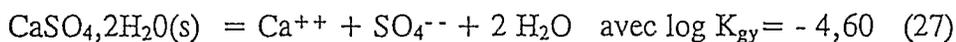
Fig.5.15c- Dissolution des sels de magnésium: carte des rapports Ca/Mg dans la nappe phréatique mesurée sur 53 puits et 20 sondages de nappe (Avril 1991).

5.6.2- Les échanges sols-nappe.

- Précipitation du gypse et de l'anhydrite.

Pour comprendre à quoi correspond la diminution du rapport Ca/Mg il faut calculer la répartition des ions dans la nappe et dans la solution du sol et replacer les concentrations de la phase liquide par rapport à la matrice gypseuse dans laquelle elle circule. Revenons d'abord sur les conditions de dissolution et de précipitation du gypse. En solution aqueuse, on a:

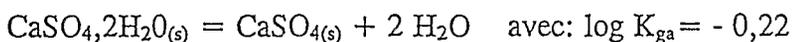
pour le gypse:



pour l'anhydrite:



En sommant (27) et (28) après avoir inversé (28) et changé le signe de la constante d'équilibre, il vient:



$$\text{soit: } \{\text{H}_2\text{O}\}^2 / \{\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}(s)\} * \{\text{CaSO}_4(s)\} = 10^{-0,22}$$

Ce qui, en considérant que l'activité de la phase solide (gypse ou anhydrite) est égale à 1, conduit à:

$$\{\text{H}_2\text{O}\} = 0,77$$

Cette valeur ne peut être atteinte pour de l'eau qui contient du gypse, puisque la précipitation du gypse commence à $\{\text{H}_2\text{O}\} = 0,98$ et se termine, par exemple pour l'eau de mer à $\{\text{H}_2\text{O}\} = 0,93$ (Perthuisot 1975, Stumm et Morgan, 1981).

Les sols.

Il ne peut donc pas y avoir d'anhydrite plus stable que le gypse aux températures et pressions rencontrées en surface, cela est d'ailleurs confirmé par les observations de terrain de nombreux chercheurs (Conley et Bundie 1968; Hardie 1967; Jauzein 1974, cf. note au bas de la page 68). Des expérimentations ont d'ailleurs montré que l'anhydrite ne se formait à la pression atmosphérique que vers 98°C (Ostroff, 1964).

L'anhydrite trouvée dans les sols de l'oasis en petite quantité est donc bien exogène.

De (28) on déduit:

$$\log \{Ca^{++}\} + \log \{SO_4^{-}\} = -4.60 \quad (29)$$

égalité qui est vraie à l'équilibre.

La droite d'équation (29) peut être représentée dans un système de deux axes qui permettent de définir l'état de saturation d'une solution par rapport au gypse pourvu que l'on connaisse les activités en solution, que nous calculerons au paragraphe suivant.

Soit $\{Ca^{++}\}$ et $\{SO_4^{-}\}$ les activités des ions calcium et sulfate respectivement, la valeur du produit ionique $PI = \{Ca^{++}\} * \{SO_4^{-}\}$ indique l'état de saturation de la solution par rapport au gypse:

- si $PI > K_{gy}$ la solution est sursaturée en gypse,
- si $PI = K_{gy}$ la solution est en équilibre,
- si $PI < K_{gy}$ la solution est sous-saturée en gypse.

Dans ce dernier cas la solution pourra dissoudre du gypse à partir du sol qu'elle traverse.

La sursaturation des solutions du sol en gypse a été mentionnée par de nombreux auteurs dans les hautes plaines de l'Algérie (Halitim, 1985), les nappes de la basse vallée de l'Euphrate (Dosso Mireille, 1980), sur les eaux de surface du Chott El Jerid en Tunisie (Perret, 1982), les sols des steppes de Tunisie Centrale (Bahri Akissa, 1982; Saffar 1983).

Cette sursaturation peut s'expliquer de plusieurs manières:

- ou bien la solution est réellement sursaturée et des raisons d'ordre cinétique empêchent le gypse de précipiter, soit que le gypse est sous forme métastable (Conley et Bundy, 1958), soit que le flux des ions SO_4^{-} et Ca^{++} alimentant le système est trop rapide (Bonneau 1981). Dans ce dernier cas la nucléation n'a pas le temps de se faire.
- ou bien le calcul des activités surévalue le produit ionique, ou sous-estime la constante K_{gy} . On sait que la détermination de la constante de dissolution du gypse n'est pas aisée (Bennett et Adams, 1967 trouvent de $10^{-4.53}$ à $10^{-4.67}$ pour des conditions expérimentales différentes). Pour cette raison nous avons représenté (Fig.5.16) dans le diagramme d'équilibre du gypse en solution aqueuse les deux courbes qui correspondent à $10^{-4.6}$ et $10^{-4.85}$ qui sont les valeurs les plus utilisées pour la constante de solubilité du gypse.
- ou bien au contact solide-solution, soit sol-solution, soit cristal-solution si la surface de contact est grande (se rappeler les photos au MEB page 67), l'activité de Ca^{++} dans la phase solide n'est pas égale à 1 (Bohn et Bohn, 1986).

Les sols.

En effet si on considère le sol comme une solution solide, on peut écrire pour chacun des constituants:

$$U_i = U_i^\circ + RT \ln g_i X_i \quad (30)$$

U_i étant le potentiel chimique de l'espèce i , le gypse mélangé à l'argile en l'occurrence, X_i sa fraction molaire, et g_i le coefficient d'activité dans la phase solide, on a:

$$PI = \{Ca\} * \{SO_4\} = g_i X_i K_{gy} \quad (31)$$

Si la solution est idéale, $g_i = 1$ et comme $X_i < 1$ alors on a forcément $PI < K_{gy}$. Cette explication séduisante est confortée par le fait qu'il existe un 'excès d'énergie libre de Gibbs associé aux grandes surfaces de contact solide-solution (Stumm et Morgan 1981).

Enfin, dans tous les cas reportés dans la littérature, la sursaturation relative des solutions en gypse est toujours bien moins grande que celle de la calcite. Dans notre cas, le problème de la précipitation de la calcite ne se pose pas dans les sols, le pH n'étant jamais supérieur à 8,0.

Il faut dire aussi que si l'on calcule les activités des ions en tenant compte de la formation d'ions appariés, on ne trouve qu'une très légère sursaturation (Guédari, 1983). Ce qui montre l'intérêt de cette démarche que nous allons présenter.

- 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°C (fig.5.16), grâce au programme BILION (Job et Cochonneau, 1985), dont on trouvera le détail en annexe F.

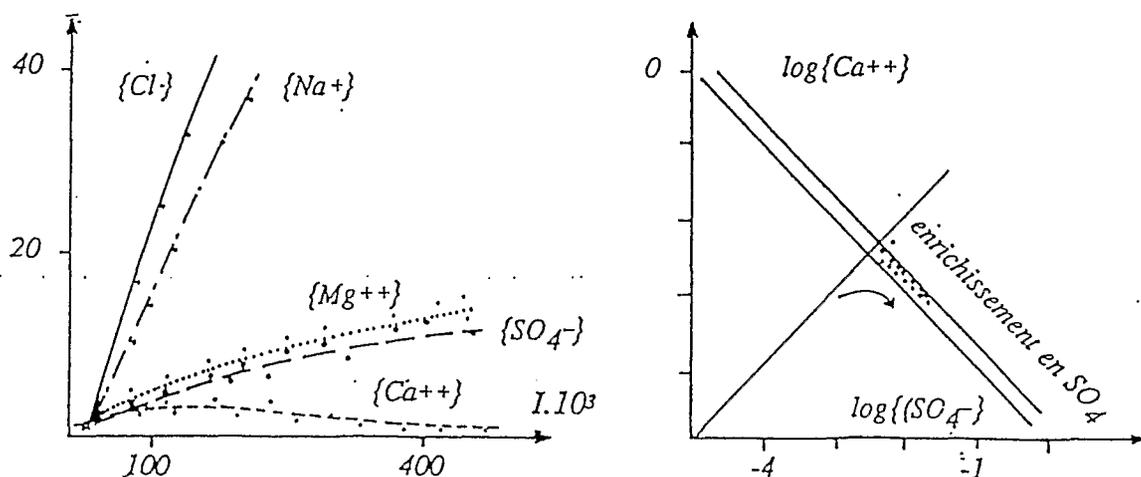


Fig.5.16- a) Activités de Ca^{++} , Mg^{++} , SO_4^{--} dans la nappe en fonction de la force ionique.
 b) Etat de saturation de la nappe en gypse.

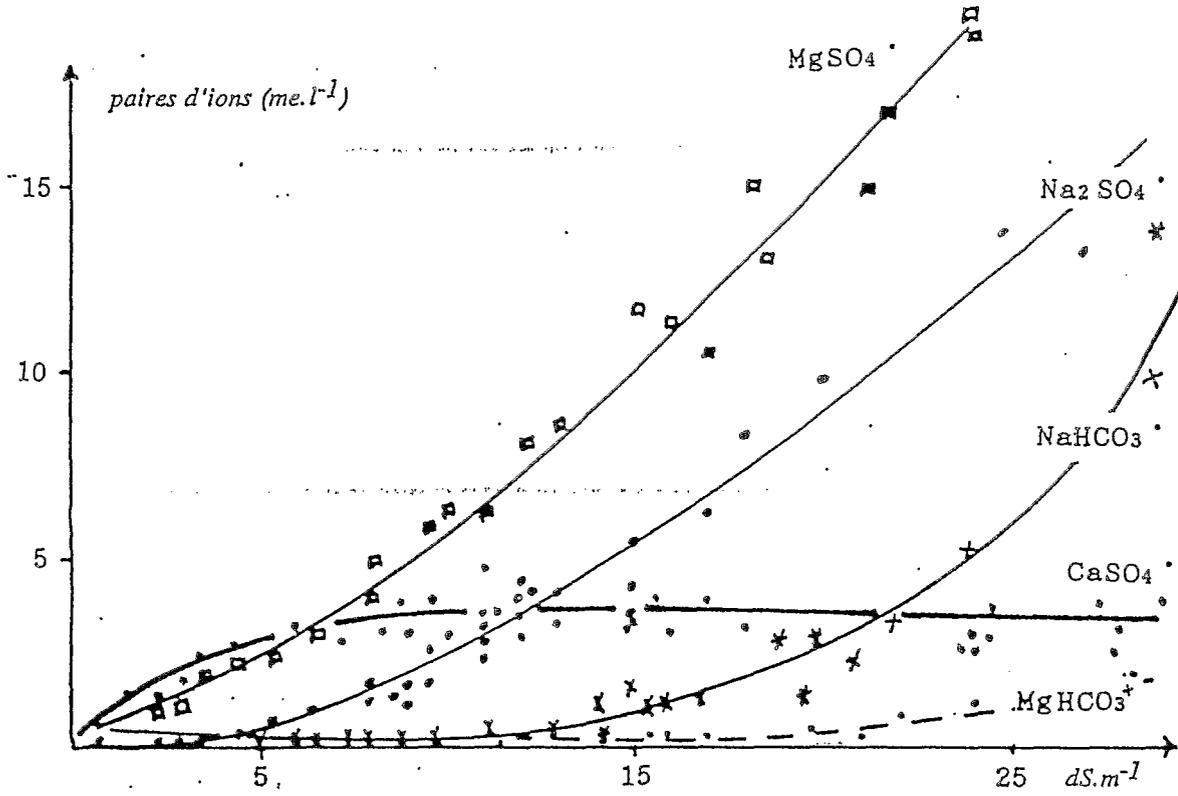
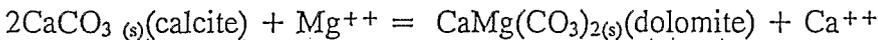


Fig.5.17- Concentrations des principaux ions appariés en fonction de la conductivité électrique de la nappe en dS.cm⁻¹.

La quantité importante de magnésium en solution nous amène à nous interroger sur la saturation de la solution vis à vis de la dolomite. Comme les mesures de pH et celles des carbonates n'ont pas été faites sur le terrain, nous ne pouvons pas calculer l'état de saturation par rapport à chacun de ces minéraux séparément. On suppose donc que la nappe est en équilibre avec la calcite dont la solubilité augmente avec la présence en solution de Mg⁺⁺ et SO₄⁻, (Akin et Lagerweff, 1965), on peut alors considérer directement la réaction:



dont la constante K peut s'écrire:

$$K = \{\text{Ca}^{++}\} / \{\text{Mg}^{++}\} = K_{2\text{cal}} / K_{\text{dol}} = 25 \cdot 10^{-18} / 2 \cdot 10^{-17} = 1,25$$

On voit fig.5.16 que l'activité du magnésium en solution est toujours trop grande par rapport à celle du calcium pour considérer que la nappe est en équilibre avec la dolomite. La dolomite n'est donc pas la seule source de magnésium.

Les sols.

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.

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.

5.6.3.- Débit de nappe.

On utilise la loi de Darcy: $Q=T.I.L$ avec:

T = transmittivité, soit $7.10^{-4} \text{ l.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$ (Ben Mazrouk, 1982),
 I = gradient hydraulique moyen, soit $7,25.10^{-3}$,
 L = front de nappe, soit 5.10^3 m d'Est en Ouest,

On trouve un débit de nappe de $Q= 25,7 \text{ l.s}^{-1}$.

On notera en passant le gradient moyen de 7 à 8 pour mille qui dénote une perméabilité plus faible qu'à Gafsa Sud-Ouest (3 à 4 pour mille suivant les mesures faites en 1978 par Ben Marzouk, 1982), ce qui montre bien que le chott El Guettar est une zone confinée.

Si on prend comme porosité efficace du sol $p=20\%$ avec un coefficient moyen de perméabilité de $2.10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, mesuré dans la formation gypseuse qui abrite la nappe avec la méthode Porchet, on obtient une vitesse d'écoulement effective, suivant la plus grande pente, de:

$$V_e = K.I/p$$

$$V_e = (2.10^{-5})(7,57.10^{-3})/0,2 = 0,7.10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$$

soit 21 mètres par an, ce qui est peu.

5.6.4- Conclusions partielles.

La nappe phréatique draine les formations du piemont en s'enrichissant en sulfate de magnésium et sulfate de sodium. Elle est rapidement saturée en gypse.

Les sols.

5.7- 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). Elle permet de distinguer trois unités de sols d'amont en aval (fig.5.18):

- les sols peu évolués non climatiques d'apport alluvial,
- les sols hydromorphes minéraux,
- les sols salso-diques.

A ces unités nous ajouterons, pour l'environnement immédiat de l'oasis, non cultivé à l'époque de la première prospection:

- les sols caillouteux des éboulis calcaires de l'amont,
- les formations éoliennes de gypse en bordure sud-ouest,
- Les alluvions actuelles des oueds.

Cette classification permet de répartir dans l'espace les sols et les sels. Elle convient bien à la carte d'aptitude des sols pour laquelle elle a été faite, par contre pour aborder le fonctionnement géochimique du système bassin versant-oasis, elle a l'inconvénient de recourir à deux classes différentes, sols hydromorphes et sols salso-diques, pour les sols constitués d'une même accumulation éolienne de gypse, qui constitue l'unique couverture pédologique de l'oasis traditionnelle:

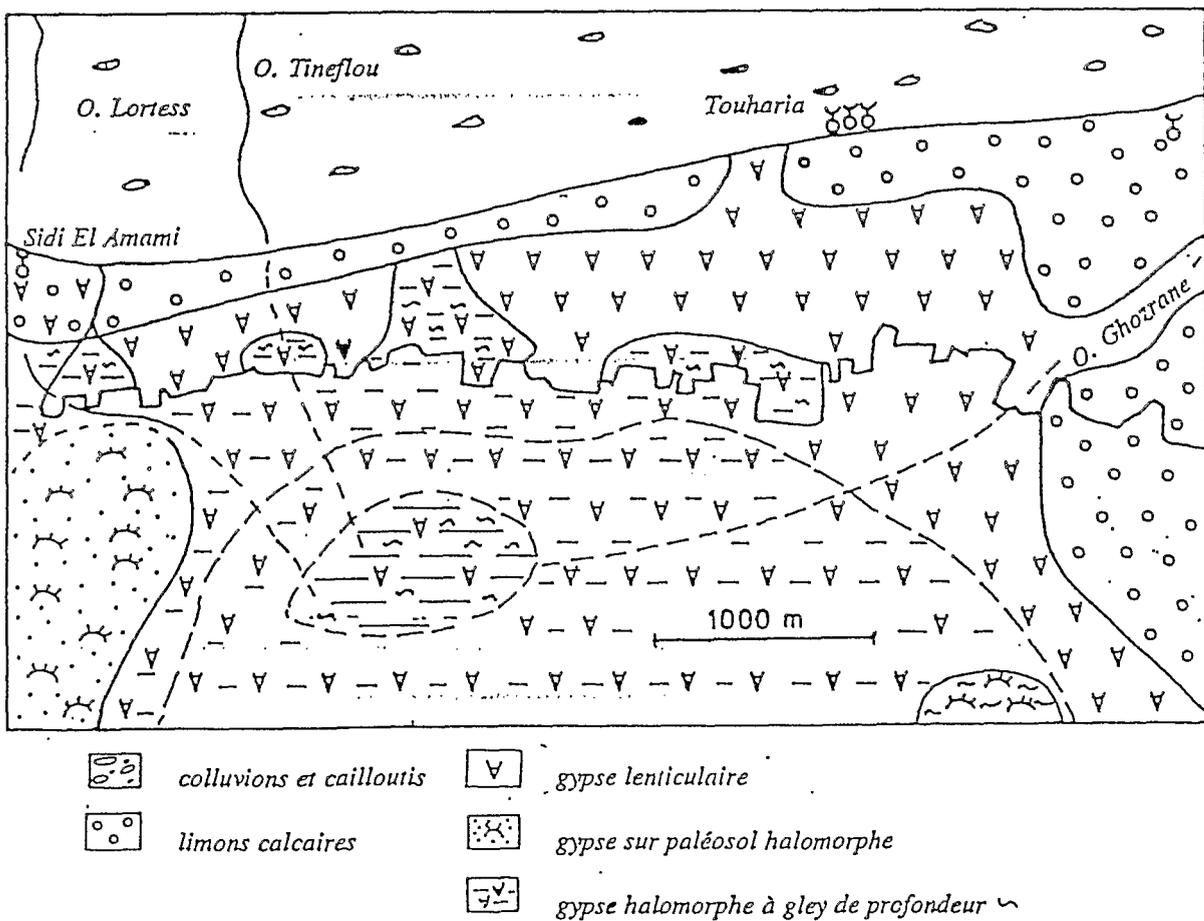


Fig.5.18- Répartition des sols dans le paysage (d'après Martini, 1965, modifié).

Les sols.

Pour mettre en évidence l'origine commune des sols et la continuité de la distribution zonale, il aurait fallu utiliser les propositions de Boyadgiev en 1988 pour la classification FAO des sols gypseux qui n'utiliserait pour nos sols que les appellations "calcisol gypsic" et "calcisols algypsic". Cette dernière manière de faire aurait eu pour avantage de montrer les rapports entre CaCO_3 et $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et de centrer le paysage sur ce couple géochimique important.

On peut maintenant représenter une toposéquence de sols (fig.5.19) sur laquelle on voit les deux sources de mise en place, la montagne et le chott, avec une zone intermédiaire.

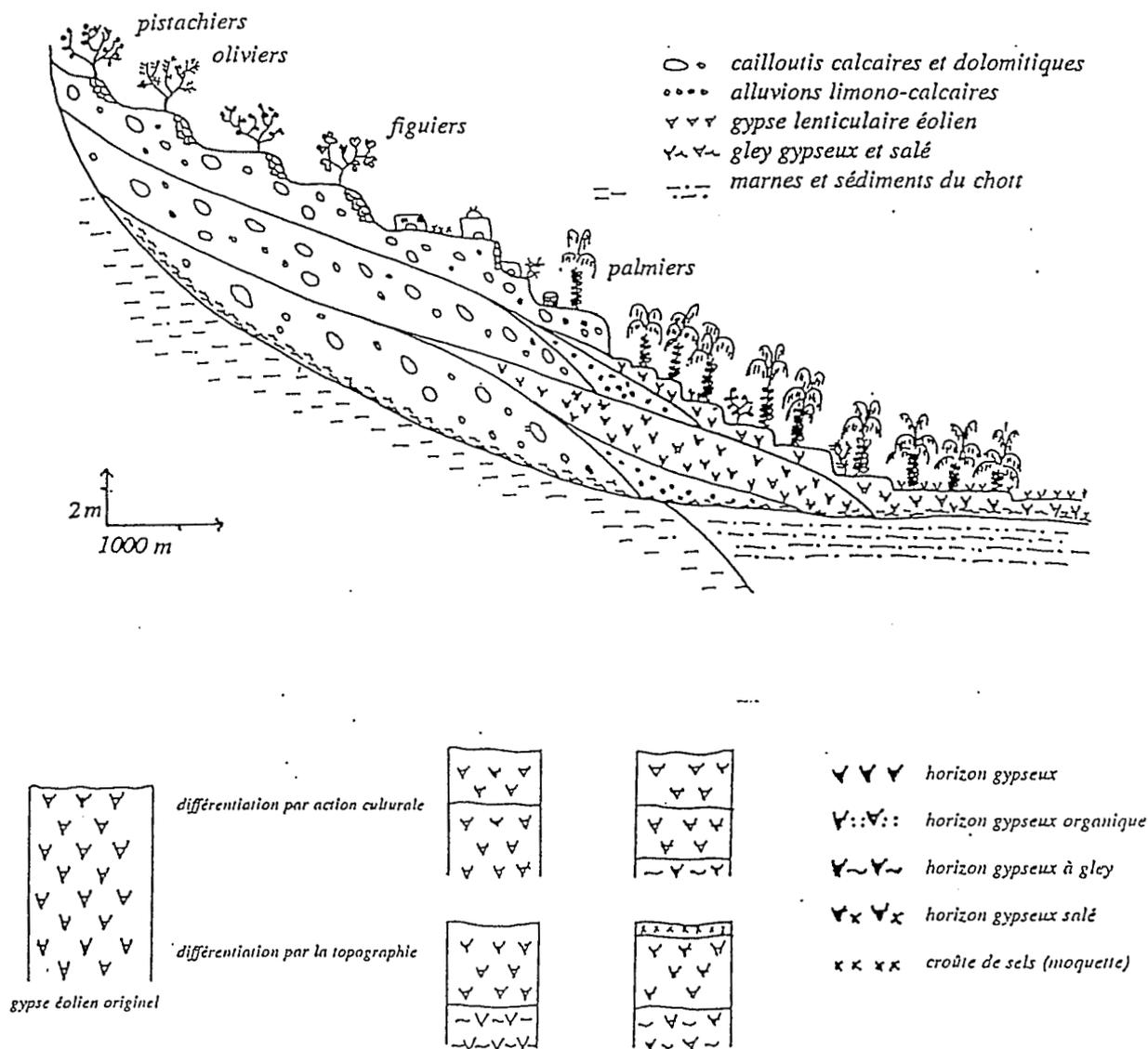


Fig.5.19- Toposéquences Nord-Sud.

5.8- Profils caractéristiques (Fig.6.1, page 81).

Dans le paysage naturel, les sols se présentent comme une accumulation très homogène de gypse lenticulaire sec et dur, consolidé par un léger ciment argileux (5 à 15%) et surmonté par un horizon de surface légèrement organique (0,5 à 1%), surmonté d'une pellicule de battance, et/ou d'un voile de gypse éolien. Suivant la position de la nappe, à une profondeur qui varie de 40 cm à plus de 250 cm, le gypse est enrichi en argile et les sulfates sont réduits. Il se forme un pseudo-gley. L'existence et l'importance relative de chacun de ces horizons est liée à la position topographique (voir annexe A2, page 124).

5.9- 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.

A la pédogénèse naturelle, s'ajoute une action de l'homme qui a enrichi considérablement les horizons superficiels en matière organique, par une fumure abondante. Il en résulte un fonctionnement salin différent, en particulier une limitation des remontées capillaires. Cette différenciation spatiale par anthropisation fera l'objet du prochain chapitre.

CHAPITRE VI- DIFERENCIATION SPATIALE PAR ANTHROPISATION.

6.1-Evolution des sols gypseux.

6.1.1- Par colonisation racinaire.

Lors de la mise en culture de parcelles pionnières, le sol est plané, et si la couche superficielle est salée, la terre de déblai est utilisée à faire les chemins. Le gypse induré est perforé aux trous de plantation des jeunes palmiers. Ces derniers sont remplis de mélange gypse-fumier. Cette manière de faire permet aux racines des palmiers de coloniser plus rapidement le sol (fig.6.1). Quand les palmiers sont adultes, les racines ont envahi complètement le sol entre 20 et 250 cm, avec une densité qui peut atteindre 1 racine par 10 cm² de section verticale.

On n'observe pas de remplissage des chenaux racinaires par le gypse comme dans l'oasis de Palmyre (Syrie), par exemple (El Khatib et Stoops, 1985).

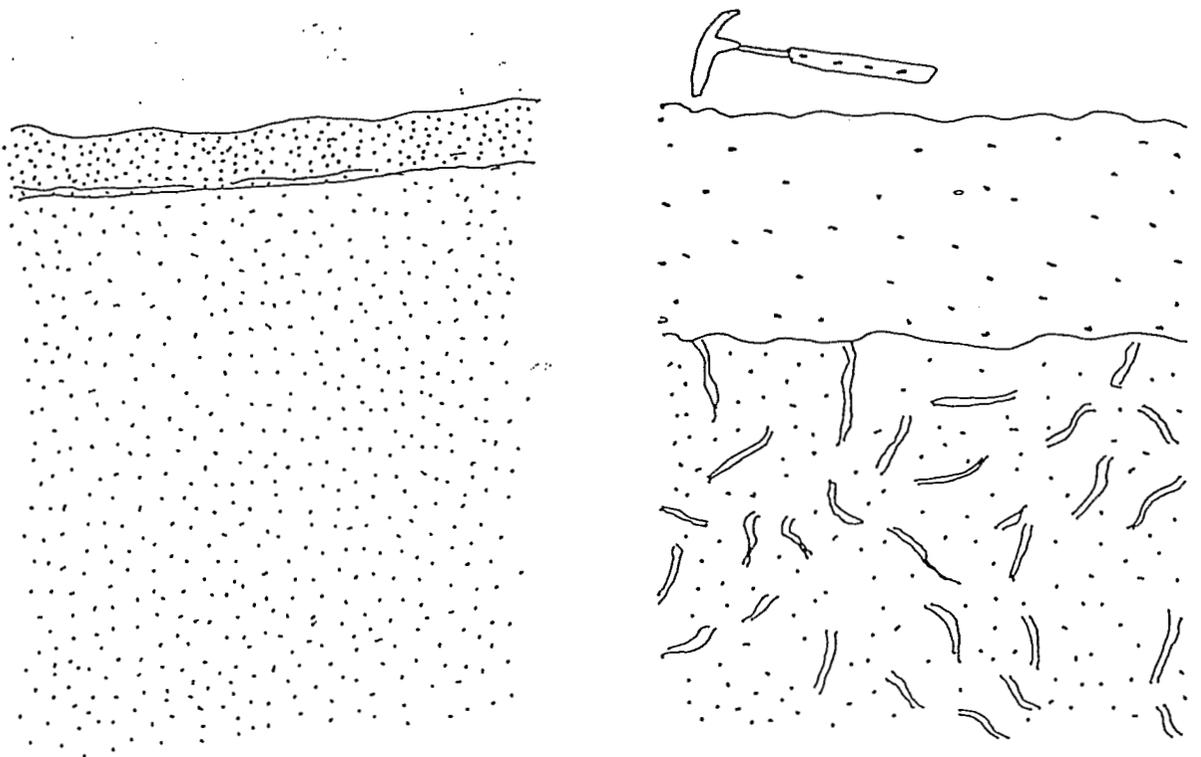


Fig.6.1- Caractéristiques physiques de l'horizon gypseux: à gauche, profil non cultivé, à droite profil irrigué. Ces deux profils sont distants de 50 mètres (Aïn Lortess).

6.1.2- Par irrigation.

A l'état sec qui est celui des sols non cultivés du bassin versant, les sols sont durs. Le gypse sert de matériau de construction (mais il doit alors être chaulé pour ne pas prendre l'eau au cours des pluies). Par contre, à l'état humide, il devient très tendre. En effet l'assemblage des particules de gypse se fait par points et la cimentation est faible (Planche 4, photo c)). Elle se fait sur place surtout par de l'argile magnésienne (diagramme de micro-sonde fig.6.2), plastique à l'état humide et très peu par des carbonates.

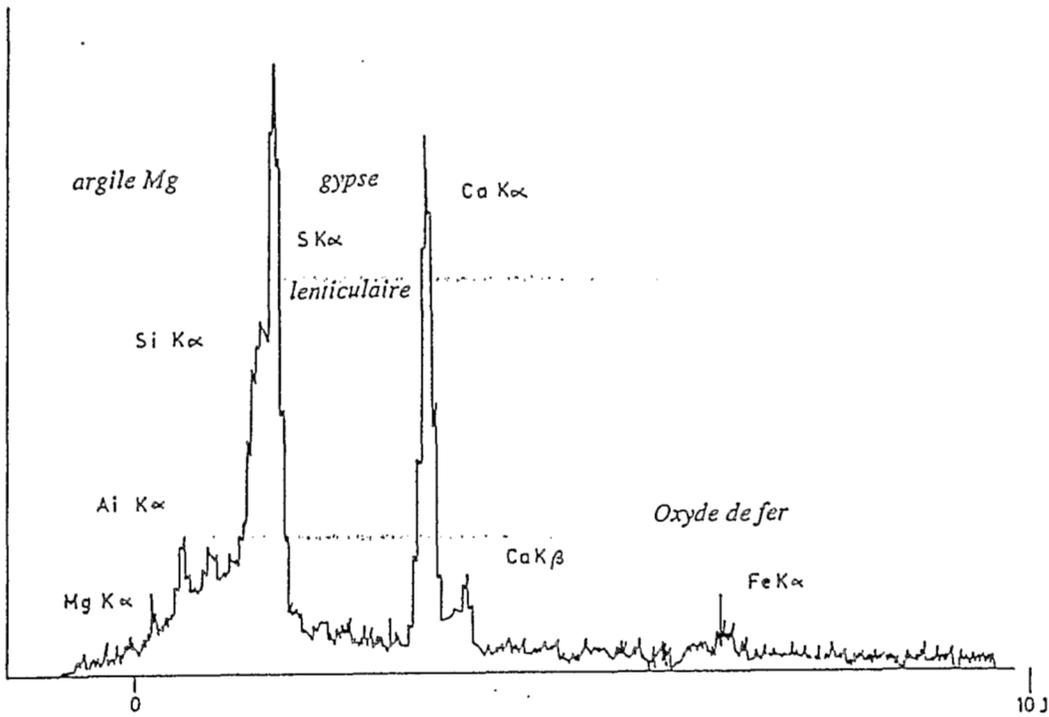


Fig.6.2- Composition des argiles de cimentation des particules de gypse (analyse à la micro-sonde, laboratoire des sols de l'ENSA, Montpellier).

La dissolution sous l'action de l'eau d'irrigation est peu importante sur les lentilles bien formées. Elle provoque des petites stries perpendiculaires à l'axe de symétrie central, donc entre les feuilletts de cristallisation (Fig.5.11, page 67).

6.1.3- Par action de la nappe.

Dans les parties basses de l'oasis, la nappe située de 120 à 200 cm provoque, si elle est permanente l'apparition d'un horizon avec des taches d'hydromorphie et même de gley. Au contact de la nappe il y peut y avoir formation de cristaux losangiques endogènes caractéristiques (Herrero et Porta, 1985) et plus souvent de petites roses des sables de taille millimétrique, rarement centimétrique, mais jamais de formation continue, susceptible de se transformer en encroûtement. Ce phénomène ne s'observe pas partout au contact de la nappe.

6.1.4- Enrichissement en matière organique.

Dans les parcelles cultivées, l'horizon gypseux d'origine est enrichi en matière organique en surface et constamment travaillé.

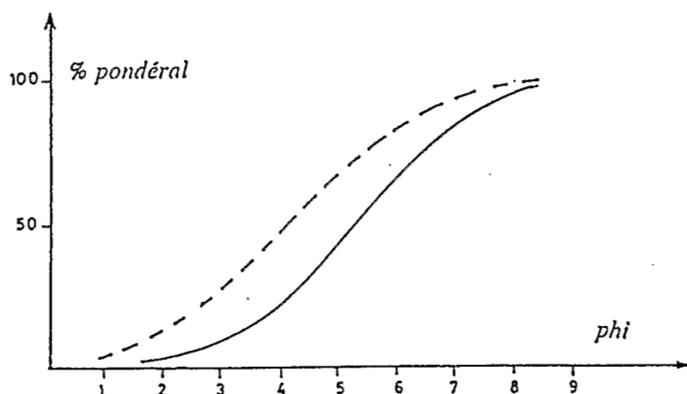


Fig.6.3- Granulométries des horizons anthropisés comparées à celles de horizons sous-jacents (en pointillé l'horizon gypseux, en traits pleins l'horizon A).

Le gypse lenticulaire des horizons anthropisés a une distribution granulométrique nettement plus fine (diamètre moyen de 20μ au lieu de 63μ , sur cinq profils différents: MB, GH, FH, SLH, 2366), plus triée et plus homogène. Cela pourrait s'expliquer de trois manières:

- soit parce que les cristaux ont été dissous et leur diamètre a diminué, mais cela supposerait que le phénomène soit observable sur une profondeur plus grande, l'eau d'irrigation pénétrant bien en deçà des 30 cm moyens d'horizon anthropique. Cette hypothèse est d'ailleurs en contradiction avec le fait que se sont les particules les plus fines qui se dissolvent en premier (Legros in: Chamayou et Legros, 1989);

- soit parce que le travail du sol détruit les particules de gypse lenticulaire, mais cela n'apparaît pas au microscope;

- soit parce que le saupoudrage éolien s'est fait avec une compétence moindre dans les périodes plus récentes.

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

6.2.1- Caractérisation générale.

- pour une typologie de la salure.

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:

Anthropisation 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),
 - la strate arboricole (oliviers),
 - la strate au sol (parcelles pionnières).

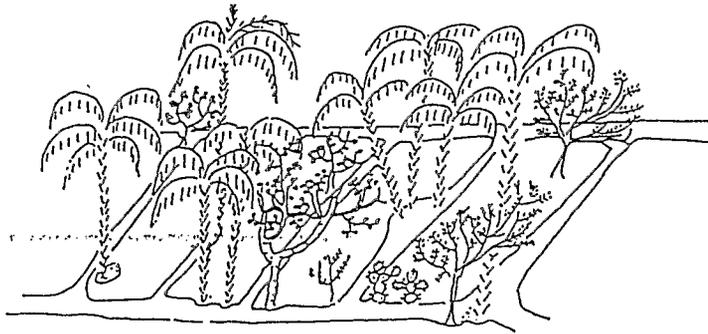


Fig.6.4.- Exemple d'étagement des cultures dans l'oasis: parcelle cultivée sur trois strates

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. Le niveau de salure, mesuré par la conductivité moyenne de l'extrait saturé dans les premiers 120 cm de sol est compris entre 2 et 7 $dS.m^{-1}$. La salure est sulfatée calcique en haut d'oasis et sulfatée magnésienne en bas (cf. annexe A11). La répartition de la salure est homogène dans la parcelle. L'horizon anthropique est assez ou très riche en matière organique. Il y a des traces de remobilisation du gypse dans les 30 premiers cm du sol. On trouve ce type d'occupation du sol dans toutes les parties de l'oasis. L'ombrage est très important: 75 % à midi en mai.

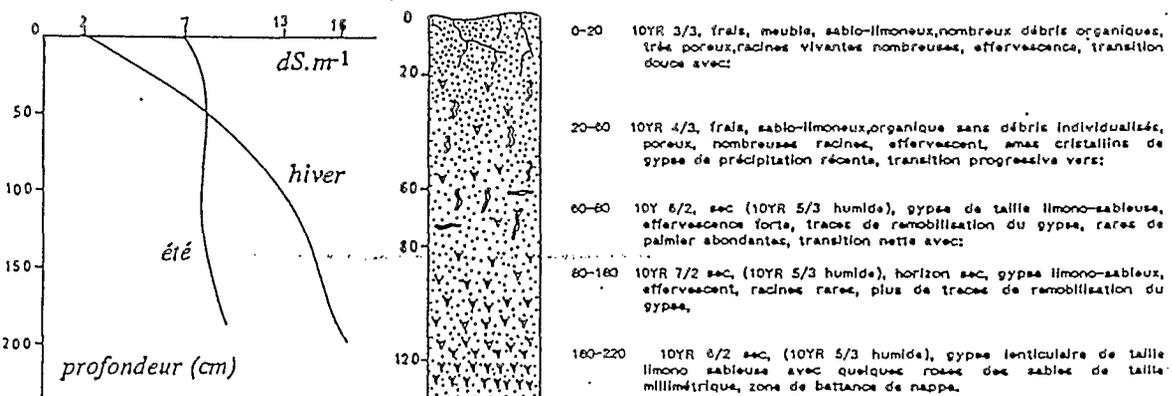


Fig.6.5- Parcelle cultivée sur trois strates: profil pédologique type et profil salin caractéristique.

6.2.3-Sols cultivés sur les deux strates extrêmes.

On les trouve dans les parties basses aux endroits où la nappe, située à moins d'un mètre de profondeur 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 est comprise entre 2 et 12 dS.m⁻¹ en surface et 10 et 25 dS.m⁻¹ en profondeur (cf. annexe A8). Elle est répartie de manière très homogène à l'intérieur d'une même parcelle.

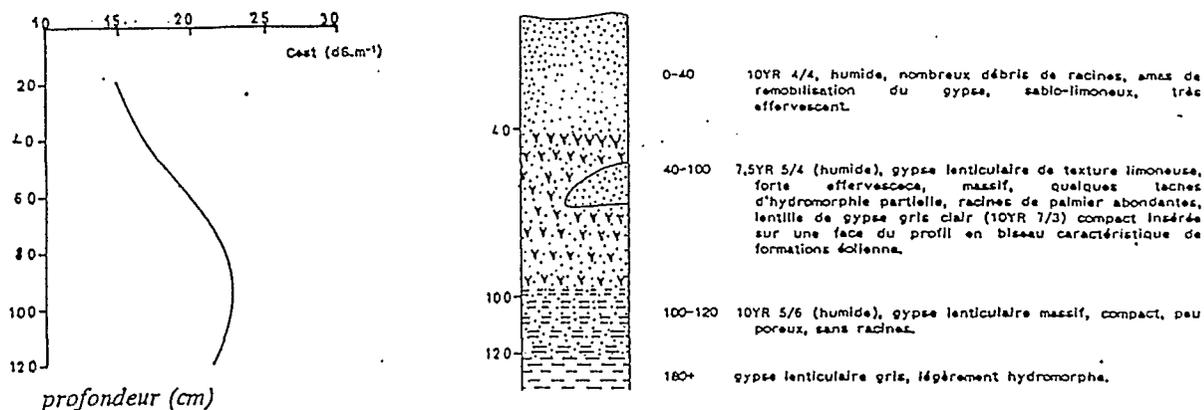


Fig.6.6- Description du profil de sol type et profil salin caractéristique des parcelles cultivées sur deux strates en bas d'oasis.

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 (cf. annexes A2 et A3). Les profils salins sont décroissants, l'horizon anthropique est réduit ou n'existe pas, le sol est compact et 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.

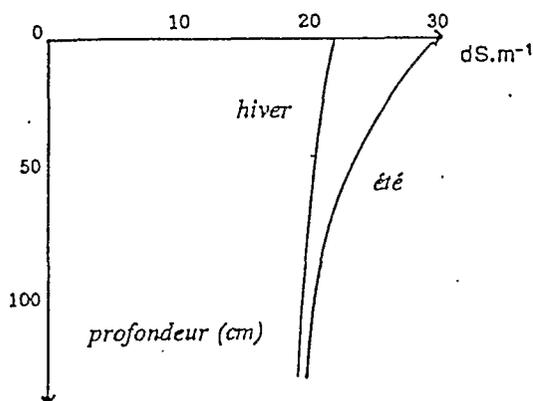


Fig.6.7- Profil salin caractéristique des parcelles cultivées sur une seule strate.

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.

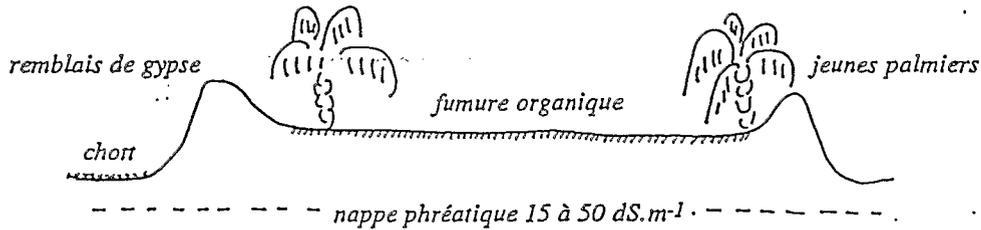


Fig.6.8- Aménagement des parcelles pionnières gagnées sur le chott.

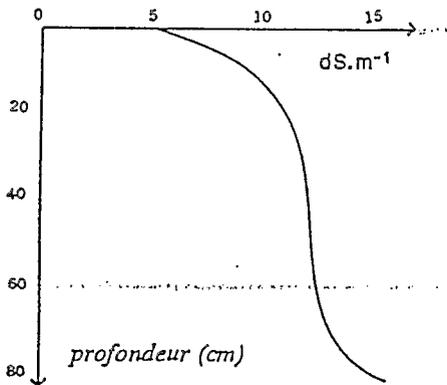


Fig.6.9- Profils salins caractéristiques des parcelles pionnières gagnées sur le chott.

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.

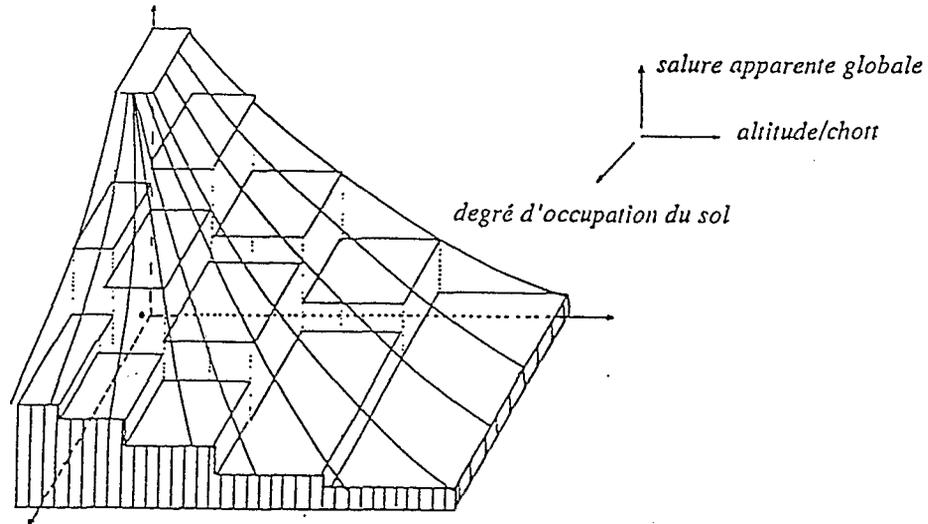


Fig.6.10- Représentation schématique de la salure moyenne d'une parcelle (axe des z), en fonction de son altitude par rapport au chott (axe des x) et de l'occupation de son sol (axe des Y).

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

6.4- Analyse de variance.

On peut alors expliquer la salure globale apparente, au point x, soit $S_{s,a}$, exprimée directement en conductivité électromagnétique mesurée en mode horizontal, c'est à dire CEH, variant de 30 à 270 $mS.m^{-1}$.

La première variable explicative placée en indice, s , est le nombre de strates cultivées, soit de 0 à 3,

La deuxième étant l'altitude, a , par rapport à la cote 220 m qui est celle du bord du chott:

- notée 0 pour une altitude de 0 à 1 m,
- 1 de 1 à 2 m,
- 2 de 2 à 4 m,
- 3 de 4 à 12 m.

Anthropisation des sols.

Avec ces conventions, $n_{1,a}$ sera le nombre de parcelles d'altitude a couvertes par une seule strate et $n_{s,2}$ le nombre de parcelles surplombant le chott de 2 à 4 m, quelque soit le degré d'occupation de leur sol par les cultures. On aura donc:

Variance intercatégories:

$$V_1 = (1/n)[n_{1,a}(S_{1,a} - S)^2 + n_{2,a}(S_{2,a} - S)^2 + \dots] \quad (32)$$

et:

$$V_2 = (1/n)[n_{s,1}(S_{s,1} - S)^2 + n_{s,2}(S_{s,2} - S)^2 + \dots] \quad (33)$$

Variance intracatégories (Résidu):

$$V_r = (1/n)\Sigma(S_{s,a} - S)^2$$

Variance totale:

$$V_i = V_i + V_r \quad \text{avec } i=1 \text{ ou } 2, \quad (34)$$

L'analyse se fait sur la valeur du rapport f de Fischer:

$$f_i = V_i(n-p)/V_r(p-1) \quad \text{avec } i=1 \text{ ou } 2, \quad (35)$$

Les résultats sont groupés dans le tab.6.2. On voit que tous les niveaux d'occupation des sols sont statistiquement différents entre eux. Il en est de même pour les altitudes par rapport au chott. Par contre une plus grande part de la variance de CEst est explicable par l'occupation du sol (valeur de f plus élevée, tab.6.3).

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	Σ 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.

Le résultat le plus important est la différence de signification trouvée pour les profils salins entre l'altitude moyenne par rapport au chott et l'occupation du sol. 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.

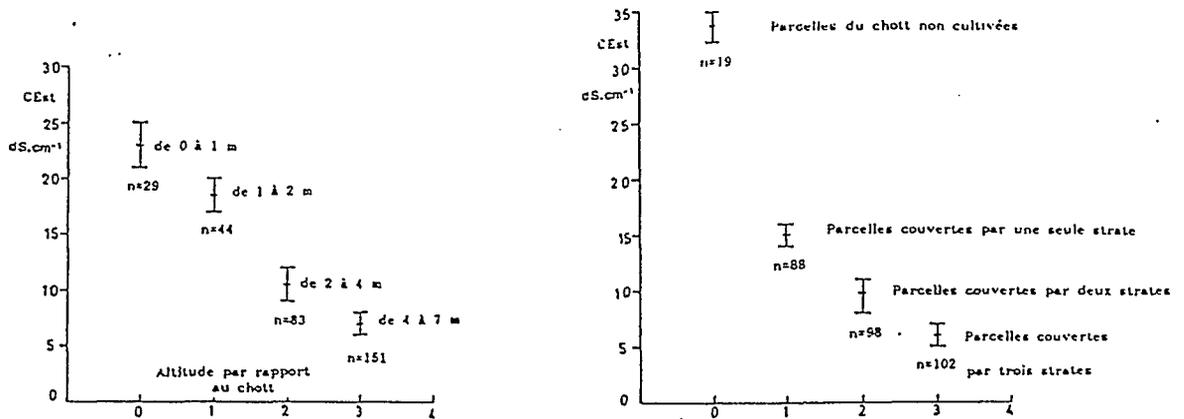


Fig.6.11- Analyse de variance de CEst, avec 4 classes d'altitude et 4 niveaux d'occupation du sol par les cultures.

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 resaliniser.

Mais cette analyse ne suffit pas en tous cas à répondre aux questions posées en début de chapitre. En effet n'apparaît pas la distribution dans l'espace qui explique les stratégies de cultures.

6.5- Répartition des sels dans le paysage.

La répartition spatiale de la salure a été mesurée dans tout l'oasis en utilisant tous les points de mesure disponibles dans notre plan d'échantillonnage, soit 396 points.

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).

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

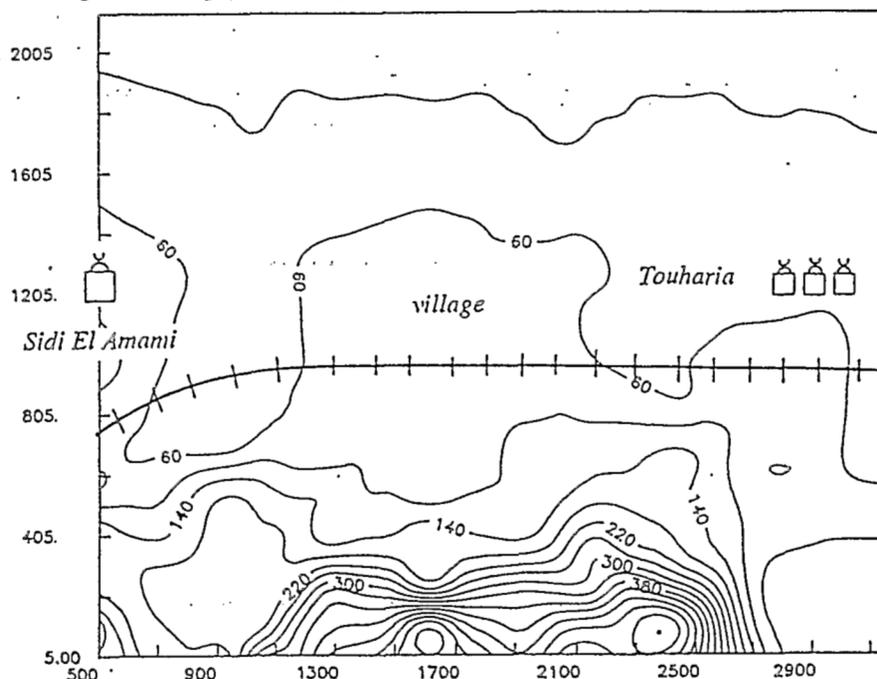


Fig.6.12- Répartition de la salure dans tout l'oasis. Les distances sur les axes sont en mètres, les valeurs reportées sont celles de CEV(20) en mai 1989, 60 dS.m⁻¹ correspond à CESt=1,9 dS.m⁻¹ d'extrait saturé, 140 à 9 et 300 à 25 dS.m⁻¹.

L'augmentation de la salure avec la diminution de l'altitude par rapport au chott est flagrante.

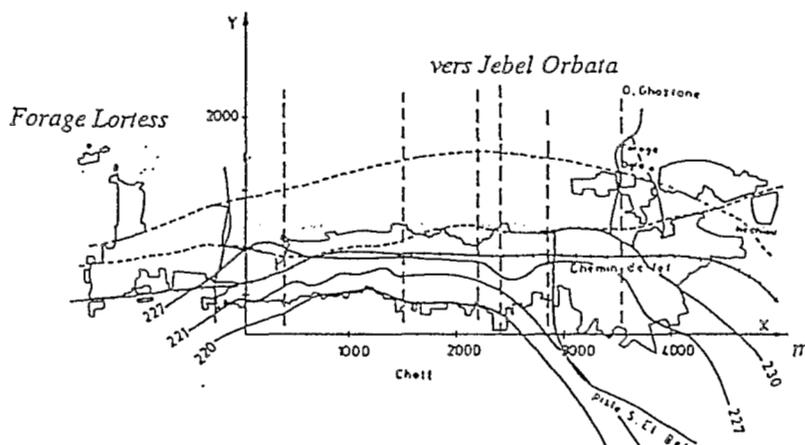


Fig.6.13- Carte topographique de l'oasis.

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.6.13. Nous obtenons les cartes de la fig.6.14.

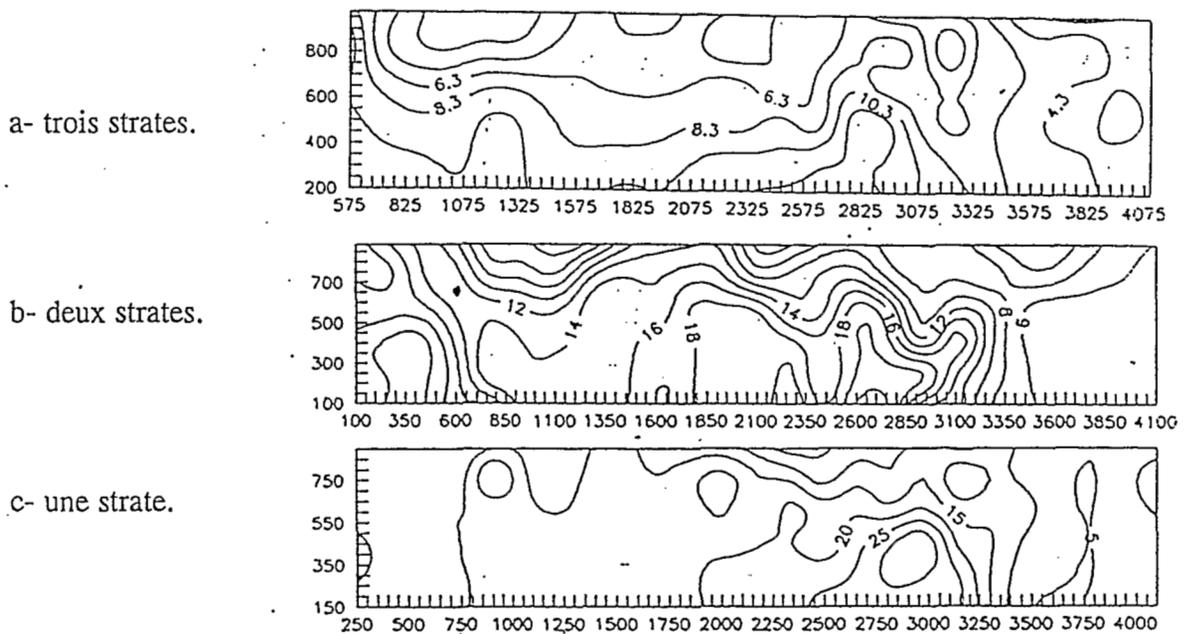


Fig.6.14- Carte de répartition de la salure par occupation du sol (valeur de CE_{est} , $dS.m^{-1}$, calculée à partir des mesures de CEH).

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 (cf. page 44), est indépendante de la topographie quelle que 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, mais caractéristique d'une occupation du sol donnée (fig.6.15). Ici se dessine l'importance du lessivage sur lequel nous reviendrons.

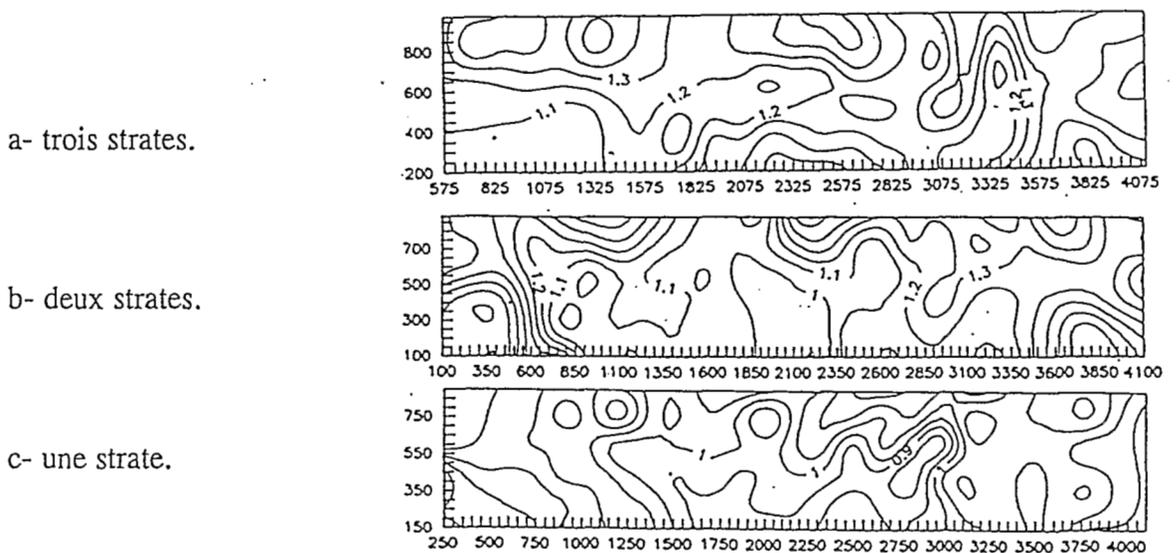


Fig.6.15- Répartition de $r = CEV_{(20)}/CEH_{(20)}$ par classe d'occupation du sol (les axes sont ceux de la fig.6.13, les distances sont en mètres).

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 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.

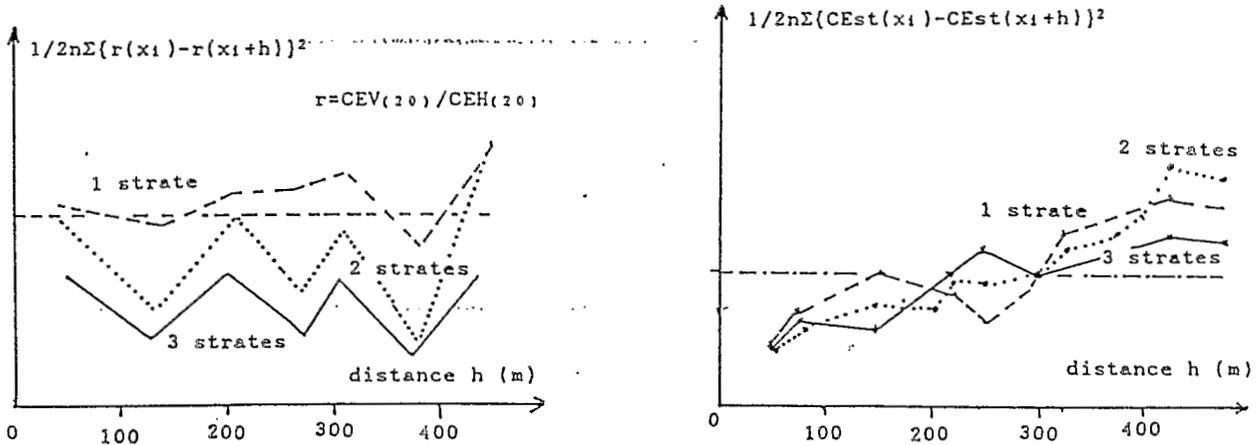


Fig.6.16- Variogrammes calculés dans la direction nord-sud pour la salure globale de 0 à 120 cm (CEst en dS.m^{-1}) et $r = \text{CEV}_{(20)}/\text{CEH}_{(20)}$.

Les variogrammes représentés fig.6.16 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 $r = CEV_{(20)}/CEH_{(20)}$ 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.

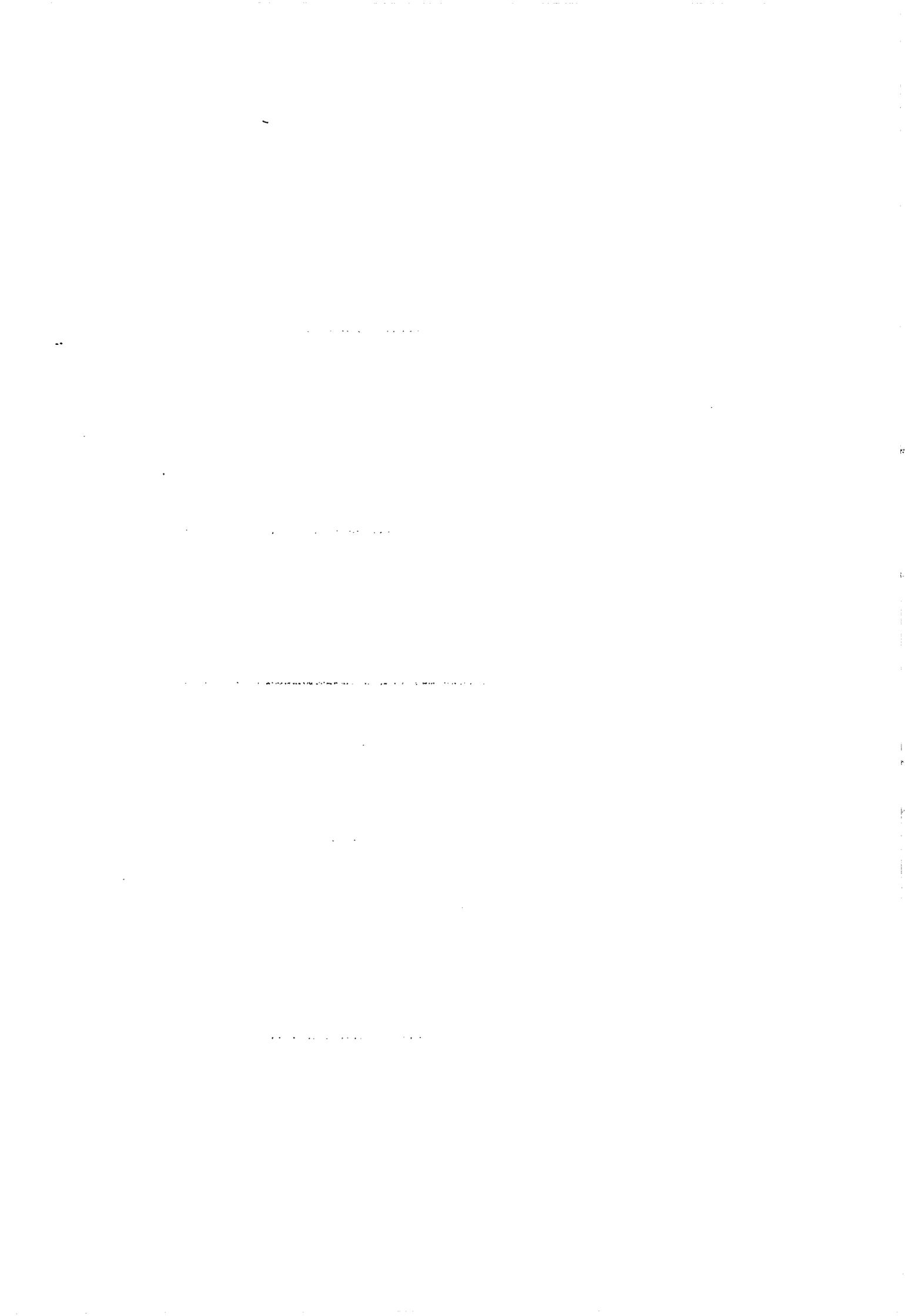
6.8- Conclusions partielles.

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.



TROISIEME PARTIE- VARIATIONS DE LA SALURE DANS LE TEMPS.

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.

Les deux premières dynamiques feront l'objet d'un chapitre commun, car ce sont des dynamiques normales et continues dans le temps pour toute l'oasis.

La troisième sera traitée séparément, car elle est associée à des pluies de très forte intensité qui provoquent des inondations de caractère exceptionnel.

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

7.1- Transport des sels par la nappe.

7.1.1- Evolution du niveau de la nappe phréatique dans le temps.

Le niveau de la nappe varie faiblement au cours de l'année (fig.7.1). Nous sommes donc proches d'un écoulement permanent et on peut considérer qu'il y a autant d'eau qui sort de la nappe qu'il n'en entre. En faveur de cette hypothèse jouent la perméabilité importante du gypse lenticulaire ($k_s=2,5.10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$), et le fait que l'on ne trouve que dans quelques rares endroits une nappe perchée indiquant une anisotropie du milieu.

Au niveau du chott la nappe remonte en hiver, entraînant une remobilisation des sels qui sera étudiée avec les dynamiques rapides.

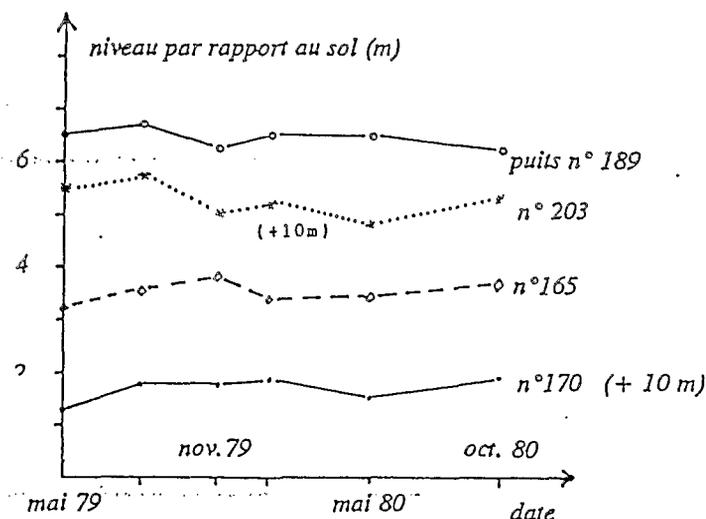


Fig.7.1- Fluctuation de la nappe au cours de l'année 1979-1980
(d'après Ben Marzouk, 1982).

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. Nous n'avons pas pu avoir plus de données sur la profondeur de la nappe avant les mesures que nous avons faites sur 70 points, en particulier sur les puits dont l'eau avait déjà été

analysée (Tab.7.1).

7.1.2- Evolution des caractéristiques chimiques.

Une étude des nappes de la région de Gafsa publiée en 1982 sur des échantillons prélevés en mai-juin 1978 à été faite par Ben Marzouk. A l'intérieur de l'oasis, seuls 23 puits sur les 103 analysés par l'auteur 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	SO4	HCO3	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	46.0	45.0	2.8	80.0	40.0	2.9	9.00	P169-78 (3)
23.7	75.0	16.0	5.1	97.0	17.0	7.0	11.50	91
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	50.0	72.5	-	-	41.0	5.4	11.63	P167-78 (6)
22.1	37.0	31.0	3.4	50.1	36.0	10.0	7.00	91
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 concentrations sont en $me.l^{-1}$, les différences 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^{++} et SO_4^{-} .

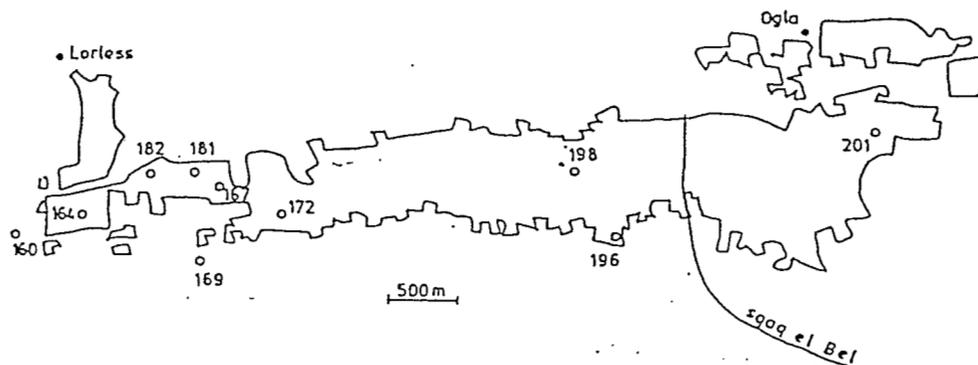


Fig.7.2- Localisation des points de mesure de variation de la qualité des eaux.

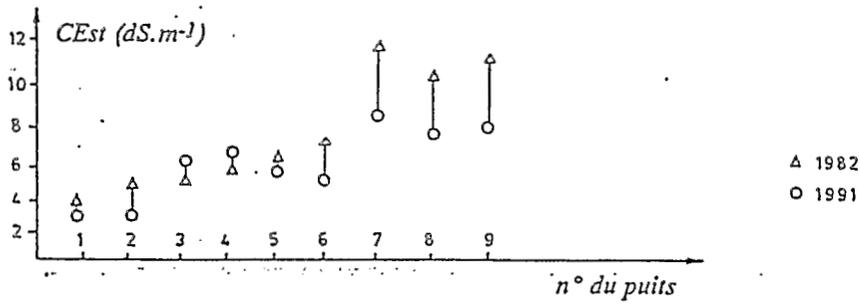


Fig.7.3- Variation des conductivités électriques de la nappe phréatique dans le temps (les numeros des puits renvoit au tableau 7.1).

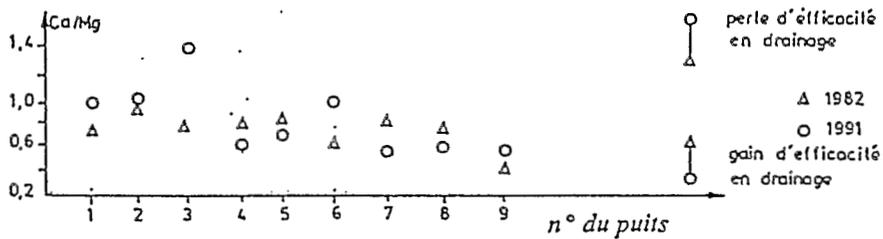


Fig.7.4- Variations du rapport Ca/Mg entre 1978 et 1991.

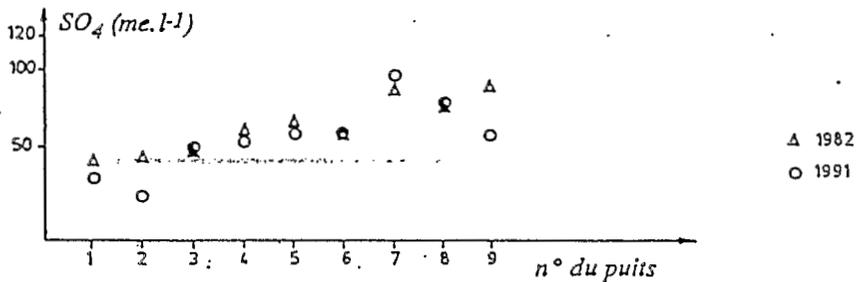


Fig.7.5- Variations des concentrations en chlore entre 1978 et 1991.

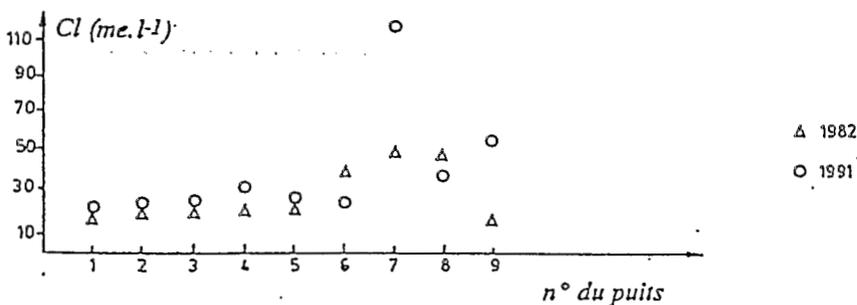


Fig.7.6- Variations des concentrations en sulfate entre 1978 et 1991.

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. Pour cela nous avons fait dans chaque parcelle, à intervalle régulier de quatre mois à peu près vingt mesures de conductivité électromagnétique en mode vertical et en mode horizontal. Les mesures ont été transformées en conductivité apparente globale exprimée par la valeur de l'extrait saturé moyen des 120 premiers cm de sol, CESt, comme précédemment.

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 cultures 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.

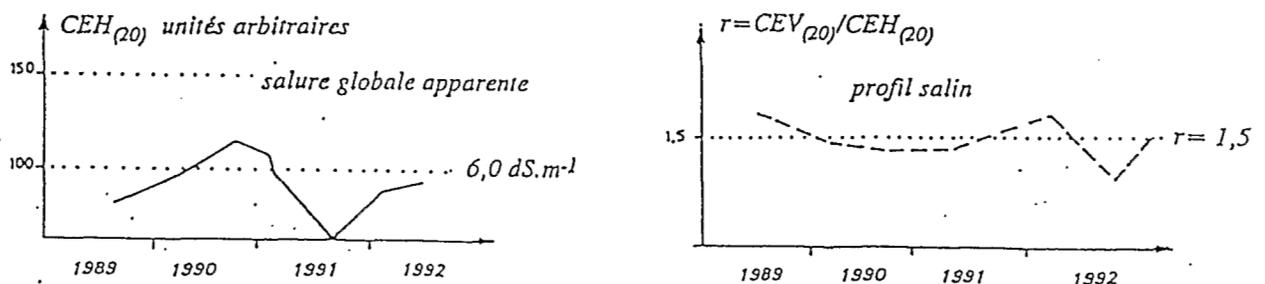


Fig.7.7- Evolution de la salure globale apparente et du profil salin de la parcelle SLH.

Les variations dans le temps.

La salure varie peu autour de 6 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			θr	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 dS.m⁻¹ de conductivité d'extrait saturé en moyenne sur tout le profil.

Les variations dans le temps.

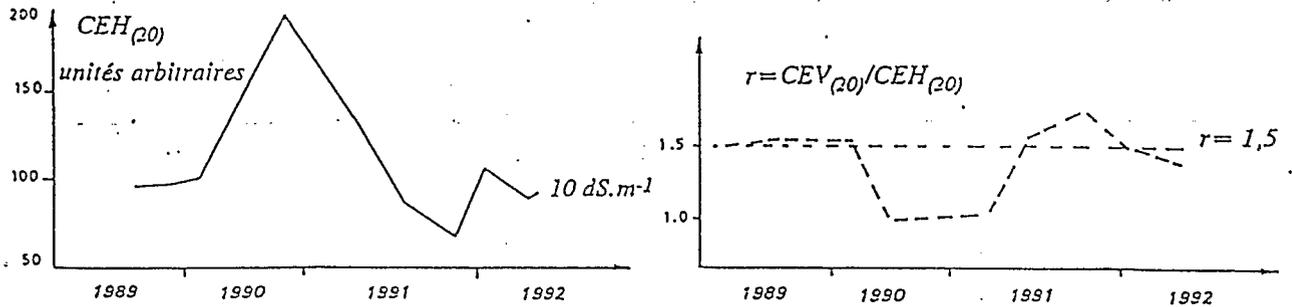


Fig.7.8- Evolution de la salure et des profils salins de la parcelle MB.

- 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	θ	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 décapé 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.

Les variations dans le temps.- Analyses physico-chimiques.

Le matériau 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	θ	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⁻¹), pF et capacité au champ θ_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⁻¹ malgré la proximité du chott.

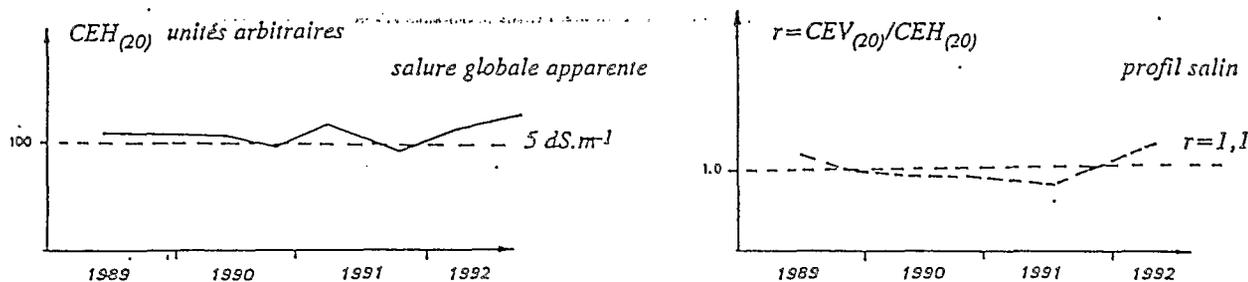


Fig.7.9- Evolution de la salure et des profils salins de la parcelle GL

La position d'équilibre se situe autour de 5 dS.m⁻¹. 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).

Les variations dans le temps.

- 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.

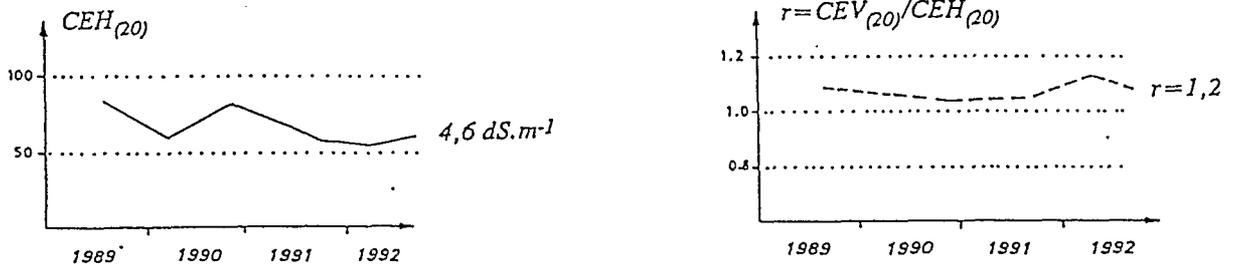


Fig.7.10- Evolution de la salure de la parcelle FH.

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 nos 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. (Rappelons qu'une valeur de r supérieure à 1 indique un sol à profil salin croissant en profondeur, donc fonctionnant en drainage, alors qu'une valeur de r inférieure à 1 indique un profil salin décroissant en profondeur, donc fonctionnant en capillarité).

Le fait que la salure globale semble également corrélée avec la quantité d'eau vient du choix des parcelles uniquement. En effet pour suivre les quantités d'eau apportées à la parcelle de manière précise, il a fallu les choisir alimentées par une même borne, donc alignées d'amont en aval sur une ligne de plus grande pente. C'est l'effet topographie qui joue ici, il s'explique bien par parcelle:

Les variations dans le temps.

- 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.

L'utilisation de l'eau n'est donc pas optimisée pour la production, puisque la parcelle qui utilise le plus d'eau est celle qui produit le moins.

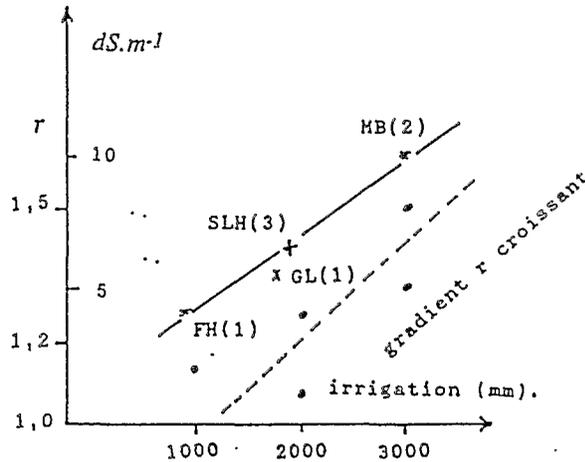


Fig.7.11- Utilisation de l'eau et salure des sols.

- Généralisation des résultats.

Les résultats acquis à la parcelle peuvent être généralisés en ce qui concerne l'allure des profils salins et le niveau de salure globale des sols. Nous utiliserons pour cela l'enquête menée sur 396 parcelles pour faire la carte de la salure globale de l'oasis, chaque parcelle étant répertoriée avec ses cultures, sa salure et sa position topographique. Les résultats sont rassemblés dans la fig.7.12.

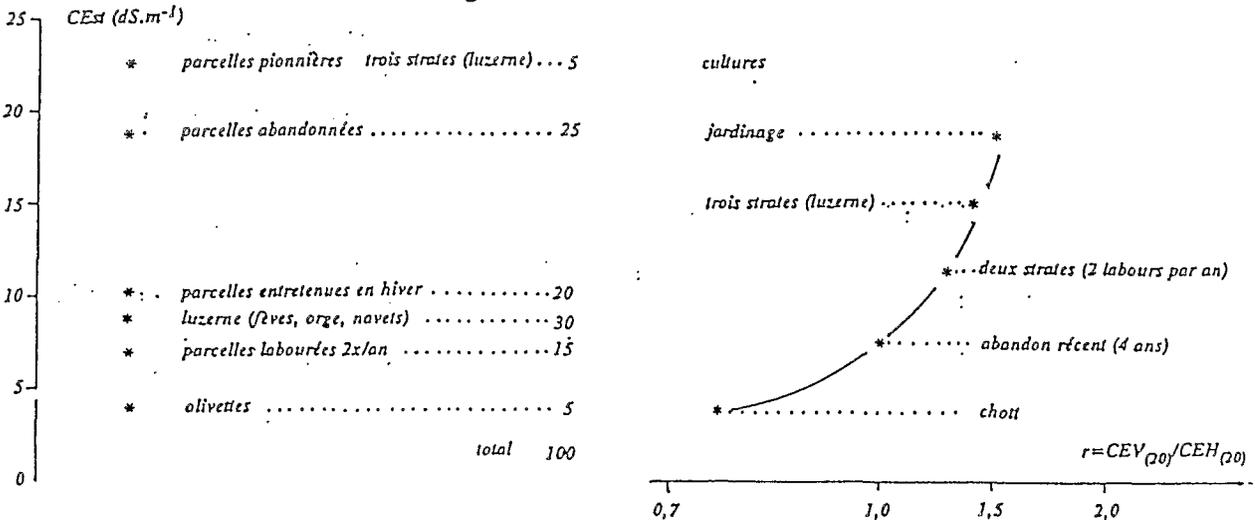


Fig.7.12- Salure et profil salin des parcelles de l'oasis d'El Guettar suivant le degré d'occupation du sol.

7.4- Conclusions partielles.

- à l'intérieur de l'oasis, la nappe phréatique coule depuis le pied du Jebel Orbata vers le chott de manière indépendante. L'irrigation ne l'affecte pas, sauf peut-être au niveau du chott lors de la mise en culture des parcelles pionnières, mais c'est une pratique particulière, limitée dans le temps et dans l'espace.

- 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 détériore 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.

CHAPITRE VIII- LES DYNAMIQUES RAPIDES.

8.1- Les sols cultivés de bordure de chott.

Ce sont des sols à engorgement de profondeur, où l'horizon hydromorphe est décelable entre 49 et 150 cm. Ils sont très salés, de 25 à 40 dSm⁻¹ et très gypseux dès la surface (de 40 à 65% en poids).

Beaucoup de parcelles pionnières s'installent dans la partie sud-ouest car dans cette zone, les agriculteurs peuvent creuser des puits, la nappe étant moins salée que dans la partie centrale (de 5 à 10 dS.m-1). La plupart du temps le maraîchage est la seule culture possible, avec des rendements décevants, mais quelques plantations de jeunes palmiers sont faites si la nappe est située entre 180 et 250 cm de profondeur. Actuellement une trentaine d'hectares est ainsi récupérée sur le chott.

Ces extensions sont risquées car ce sont des zones basses, facilement inondables. les fig 8.1 et 8.2 montrent deux parcelles de bordure sud de l'oasis, à Aïn Tineflou, dans la partie Ouest, dans la partie basse de l'oasis qui sont restées quatre mois sous l'eau. La première, notée AR n'a fait l'objet d'aucune réhabilitation et n'a jamais été cultivée. Douze mois après son exondation, le profil qui était réduit de couleur bleue foncée sur 15 cm, retrouve la couleur rose de gypse légèrement rubéfié d'origine. A part une très mince couche d'algues desséchées en surface et une distribution régulière des sels en profondeur, plus aucune trace de l'inondation ne subsiste dans le profil.

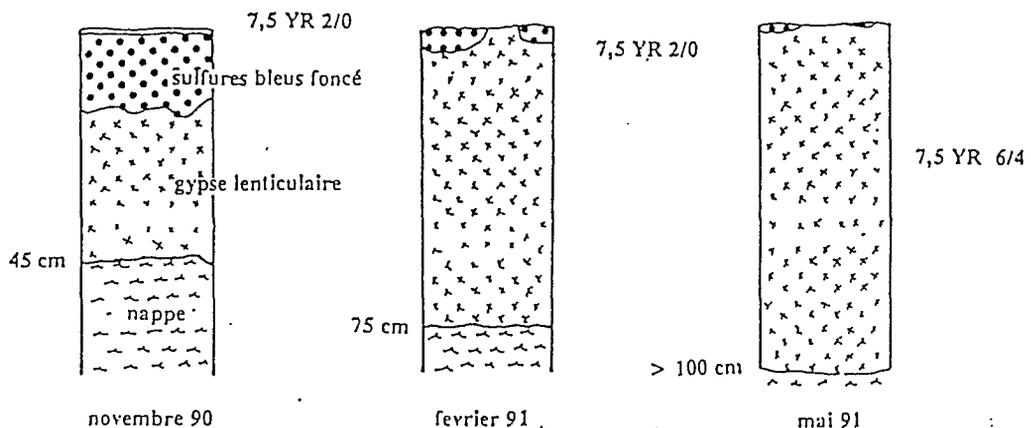


Fig.8.1- Profil de sol de chott, faisant partie d'une parcelle pionnière (AR). Au cours du retrait des eaux du chott, les sulfures formés en quatre mois de submersion, se réoxydent rapidement et le gypse lenticulaire retrouve la couleur rosée que lui donnent les oxydes de fer.

Les variations dans le temps.

La récupération de ces parcelles après inondation et leur mise en culture est faite par les oasisiens de la manière suivante:

le sol est retourné sur trente centimètres à la mes'ha, sorte de grosse binette, en mottes que l'on laisse reposer une quinzaine de jours. On couvre ensuite le sol de fumier que l'on enfouit dans le sol à l'araire tirée par un âne, cette opération brise en même temps les mottes et les réduit.

La parcelle de la fig.8.2 est située dans la même zone basse que les profils précédemment décrits. Elle comporte 10 planches de 50 m² et dix de 180 m² séparées par une séguia en béton. Les parcelles amont (palmiers) sont restées deux mois sous l'eau, les parcelles aval 13 mois. Le propriétaire irrigue à raison de 30 minutes par planche tous les 20 jours quelle que soit la culture.

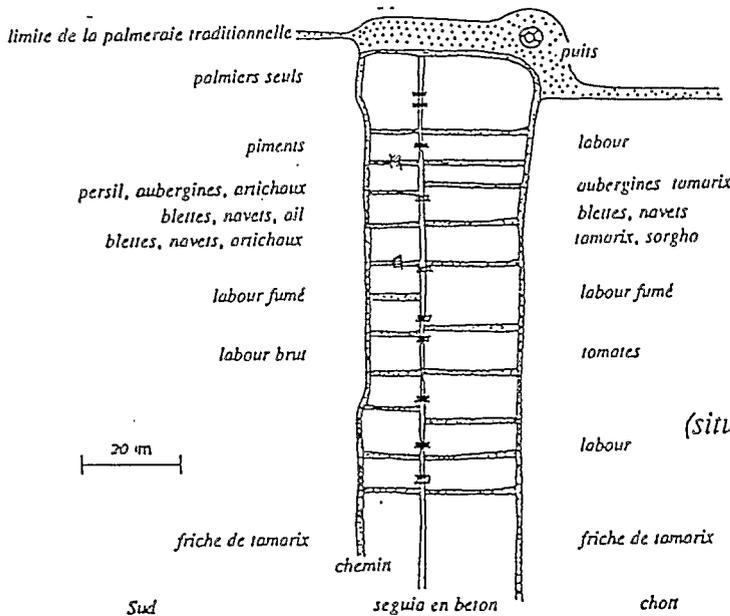


Fig.8.2- Parcelle NT récupérées après inondation du chott.

(situation en Mai 1992)

La salure moyenne du profil (de 0 à 120 cm), qui était de 35 dS.m⁻¹ au moment de la réhabilitation, passe à 12 dS.m⁻¹ après travail du sol, fumure et lessivage avec 1000 mm d'eau, pour diminuer ensuite progressivement de 12 à 6 dS.m⁻¹ après 1 an d'irrigation. On retrouve ici les deux dynamiques caractéristiques, une rapide et une autre beaucoup plus lente.

On notera que les planches situées à l'est de la séguia reçoivent la même quantité d'eau que celles qui leur font vis à vis alors que leur superficie est en moyenne une fois et demi plus grande. Pourtant leur désalinisation se fait un peu mieux. Ceci est dû au fait que plus la parcelle est petite, plus les effets de bordure sont importants et plus la quantité d'eau apportée se répartit sur une petite surface.

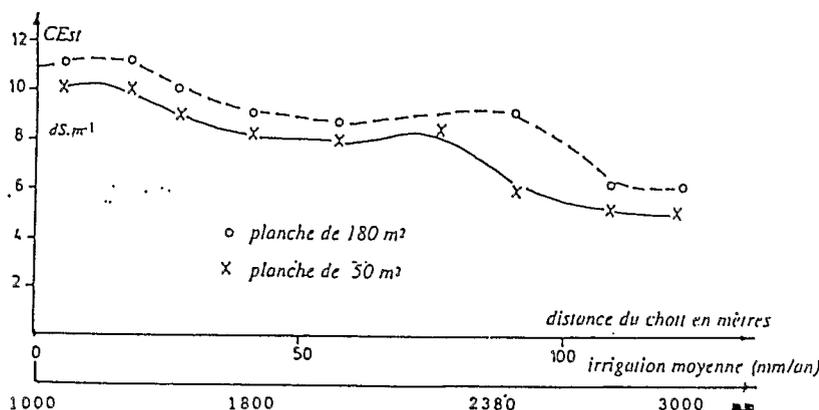


Fig.8.3- Réhabilitation de la parcelle NT.

CHAPITRE IX- CONCLUSIONS GÉNÉRALES

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 ?".

En d'autres termes, 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.

Conclusions.

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.

Conclusions.

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.

Conclusions.

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 sous deux aspects:

- sous 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 reprecipitation au voisinage de la nappe,

- sous 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.

 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABDALLAH A.B., 1990- La phoeniciculture. *In*: "Les systèmes agricoles oasiens", actes du colloque de Tozeur (19-21 nov.), CIHEAM/CEE, Options Méditerranéennes, Montpellier, 338 p.
- ADAMS F., 1971- Ionic concentrations and activities in soil solutions. *Soil Sci., Soc., Amer., Proceedings*, Vol. 35, p: 420-426.
- AKIN G.W, LAGERWERF J.V., 1965- Calcium carbonate in solutions open to the air. 1: The solubility of Calcite in relation to ionic strength. 2: Enhanced solubility of CaCO_3 in the presence of Mg^{++} and SO_4^{--} . *Geoch., Cosm., Acta*, Vol. 29, p: 343-360.
- AMAMI A., 1983- Présentation des résultats obtenus après une année de mesures concernant le microclimat des oasis du Sud-Ouest Tunisien (Kebili). *Ecole Sup., d'Horticulture de Chott Mariam, Sousse*, 83 p.
- ANONYME, non daté- Etat parcellaire de l'Oasis d'El Guettar. Ministère de L'Agriculture, C.R.D.A de Gafsa.
- AUBERT G., 1965- Classification des Sols. Tableau des classes, sous-classes, groupes et sous-groupes de sol utilisés par la section de pédologie de l'ORSTOM p: 269-287.
- BAHRI Akissa, 1982- Utilisation des eaux et des sols salés dans la plaine de Kairouan. Thèse Doct. Ing., INPT, Toulouse 102 p.
- BALDY Ch., 1985- Contribution à l'étude des applications de la bioclimatologie végétale à l'agrométéorologie des zones arides et semi-arides en climats méditerranéen et tropical. Thèse de Doc. ès Sc., Univ., d' Aix-Marseille, 220 p.
- BELLAIR A., 1954- Sur l'origine des dépôts de sulfate de calcium actuels et anciens. *C.R., Acad., Sci., Paris*, tome 239, p: 1059-1061.
- BEN MAZROUK M., 1982- Contribution à l'étude hydrogéologique des régions de Gafsa Sud et d'El Guettar. Thèse de 3ème cycle, Un., Paris-Sud, 2 tomes, 7 cartes.
- BISSON J., 1990- Permanence d'une paysannerie au Sahara algérien: L'exemple des confins du Grand Erg occidental, p:289-301, in: " Les systèmes agricoles oasiens", actes du colloque de Tozeur (19-21 nov.), CIHEAM/CCE, Options Méditerranéennes, Montpellier, 338 p.
- BOCK E., 1961- On the solubility of anhydrous calcium sulfate and of gypsum in concentrated solutions of NaCl at 25°C, 30°C, 40°C, 50°C. *Canadian Journal of Chemistry*, Vol. 39, p: 1746-1751.

Références bibliographiques.

-
- BOHN H.L., BOHN R.K., 1986- Solid activity coefficients of soils components. *Geoderma*, vol.38, p:3-18.
- BOIVIN P., 1984- Etude pédologique de la vallée de Koubalan. Etude de la variabilité spatiale du pH et de la conductivité d'un sol de tanne. Rap., multigr., Centre ORSTM de Dakar, 72p.
- BOIVIN P., 1990- Geostat-PC. Logiciel interactif pour calcul géostatistique. Collection Logosrtom, ORSTOM, Paris, 60 p.
- BOIVIN P., BRUNET D., JOB J.O., 1988- Conductivimétrie électromagnétique et cartographie automatique des sols salés. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, Vol. XXIV, n° 1 p: 39-48.
- BOLT, G.H., PAGE A.L., 1965- Ion exchange equations based on double layer theory *Soil Science*. Vol. 99, p: 357-361.
- BONNEAU X., 1981- Etude expérimentale de la dynamique des sels simples au cours de la pédogénèse: le cas du gypse. Mémoire de DEA, INA Paris Grignon, 49 p.
- BOTTRAUD J.C., BORNAND M., SERVAT E., 1984- Mesures de résistivité appliquées à la cartographie en pédologie. *Science du Sol, Bull.*, de l'A.F.E.S, n°4, p: 279-284.
- BOUCHET R.J., 1963- Evaporation réelle, évaporation potentielle et production agricole. *Annales Agronomiques*, Vol. 14, n°5, p: 743-824.
- BOURRIE G., 1976- Relations entre le pH, l'alcalinité, le pouvoir tampon et les équilibres du CO₂ dans les eaux naturelles. *Sciences du Sol, Bull.*, A.F.E.S, n°3, p: 141-149.
- BOWER C.A., 1959- Cation-exchange equilibria in soils affected by sodium salts. *Soil Science*, Vol. 88, p: 32-35.
- BOYADGIEV T.G., 1985- Soils showing carbonate and/or gypsic accumulation. Definition of soil units. FAO draft paper, 12 p.
- BREWSTER R., 1964- Fabric and mineral analysis of soils. Wiley and Sons ed., 469 p.
- BUREAU P., ROEDERER P., 1969- Contribution à l'étude des sols gypseux du Sud tunisien: croûtes et encroûtements gypseux de la partie sud du Golfe de Gabès, rapport multigr., 40 p.
- BURSAUX, 1910- L'oasis d'El Guettar: ses ressources, sa décadence. Metlaoui, 9 p., 2 fig.
- BURINGH P., 1960- Soil and soil conditions in Iraq. Ministry of Agriculture, 322 p., Bagdad.
- CAMERON D.R., de JONG E, READ D.W.L., OOSTERVELD M., 1981- Mapping salinity using resistivity and electromagnetic techniques. *Can. J. Soil Sci.*, Vol. 61, p: 67-78.

Références bibliographiques.

-
- CAMPBELL R.B., BOWER C.A., RICHARDS L.A., 1949- Change of electrical conductivity with temperature and the relation of osmotic pressure to electrical conductivity and ion concentration for soil extracts. *Soil Sci., Soc., Amer., Proceedings*, Vol. 13, p: 66-69.
- CASTANY G., 1951- Etude géologique de l'Atlas Tunisien Oriental. *Annales des Mines et Géol.*, n°8, Régence de Tunis, Direction des T.P., 632 p.
- CHAMLEY H., 1987- *Sédimentologie*. Dunod ed., Paris, 176 p.
- CHAROY J., TORRENT H., 1990- Origine, gestion de l'eau, évaluation des aquifères dans les oasis, p:221-229, in: " Les systèmes agricoles oasiens", actes du colloque de Tozeur, 19-21 nov., CIHEAM/CCE, Options Méditerranéennes, Montpellier, 338 p.
- CHAUVET W., POUGET M., 1965- Etude pédologique de l'Oasis d'EL Hamma de Gabès. *Direction des Sols*, n° E-383.
- CHEVERRY CL., 1972- Contribution à l'étude pédologique des polders du lac Tchad. Dynamique des sels en milieu aride continental et subaride dans les sédiments argileux et organiques. Thèse doc., Univ. Louis Pasteur, Strasbourg, 275 p.
- CONLEY R.F., BUNDY W.M., 1958- Mechanism of gypsification. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 15, p: 57-72.
- CORWIN D.L., RHOADES J.D., 1981- Determining Soil Electrical Conductivity Using an Inductive Electromagnetic Soil Conductivimeter. *Soil Sci., Soc., Amer., J.*, Vol. 45, n°2, p: 255-260.
- CORWIN D.L., RHOADES J.D., 1984- Measurement of Inverted Profiles Using Electromagnetic Induction. *Soil Sci., Soc., Am., J.*, Vol. 48, p: 288-291.
- COQUE R., 1962- La Tunisie présaharienne, étude géomorphologique. Thèse, Fac. Lettres de Paris, 488 p.
- COQUE R., JAUZEIN A., 1966- Le Quaternaire de Tunisie. *Quaternaria*, Vol. VII, p: 139-154.
- DAMAGNEZ J., RIOU Ch., de VILLELE O., El AMAMI S., 1962- Problèmes d'évaporation potentielle en Tunisie. *Annales de L'INRAT*, Vol. 35, p: 163-183.
- DAVIS E.O., BRYAN H., 1910- The electrical bridge for the determination of soluble salts in soils. U.S. Dept. Agr., Bur. Soils Bul.n° 61, 36 pp.
- DELMAS A.B., GUYOT J., 1985- Approche cinétique de l'organisation d'un matériau argileux calcique en présence de gypse. Colloque, sous commission de micromorphologie des sol, AISS/AFES, 8-12 juillet, Paris.
- DOEGLAS D.J., 1968- Grain-size indices, classification and environnement. *Sedimentology*, Vol. 10, n°2, p: 83-100.
- DELHOMME J.P., 1976- Applications de la théorie des variables généralisées dans les sciences de l'eau. Thèse de Doc., Ing., Université de Paris VI-Ecole des Mines de Paris.

Références bibliographiques.

-
- DEMANGEOT J., 1981- Les milieux naturels désertiques. S.E.D.E.S, ed., Paris, 262 p.
- DOSSO Mireille, 1980- Géochimie des sols salés et des eaux d'irrigation. Aménagement de la Basse Vallée de l'Euphrate en Syrie. Thèse Doc., Ing., Univ., Paul Sabatier, Toulouse, 191 p.
- DROUBI (Al) Abd., 1976- Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermodynamique de Simulation. Application aux sols salés du Tchad. Mém. n°46, Univ., Louis Pasteur, Strasbourg, 177 p.
- DURAND J.H., 1954- Les sols d'Algérie. Pédologie n°2, pub., Serv., Colon., Hydraul., 244 p., Alger.
- DURAND J.H., 1963- Les croûtes calcaires et gypseuses en Algérie: formation et âge. Bull., Soc., Géol., de France, Vol. 7, Tome V, p: 959-968.
- EL AMAMI S., 1968- Interaction climatique de deux milieux écologiques. Cas d'un système oasis-désert. Annales de l'INRAT, Vol. 41, fasc. 6, p:1-14.
- EL AMAMI S., BALDY CH., POUGET M.J., 1967- Rénovation d'une palmeraie littorale ancienne. Etude de sa remise en culture intensive. Annales de l'INRA de Tunisie, Vol. 40, fasc. 8, p: 4-41.
- EL FEKIH M., 1965- Etude pédologique des oasis continentale du Djerid (Sedada, Degache, Tozeur). Direction des Sols pub. n°E-S 289, 138 p., Tunis.
- EL KHATIB N., STOOPS G., 1985- Caractéristiques micromorphologiques de quelques sols d'oasis en Syrie. Colloque de la sous-commission de micromorphologie des sols, AISS/AFES, 8-12 juillet, Paris.
- EL OUMRI M., VIEILLEFON J., 1983- Etude expérimentale de la conductivité électrique globale de sols. Application à l'estimation de leur salinité. Cah. ORSTOM., ser. Pédol., Vol. XX, n°2, p: 91-103.
- ESCADAFAL R., 1989- Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection. Applications: exemple de la région de Tataouine (Tunisie).
- F.A.O., 1965- Projet de Planification Rurale intégrée de la Tunisie Centrale. Climatologie de la Tunisie Centrale, cartes.
- FARHAT H., 1988- Note sur les ressources en eau des régions d'El Guettar et Belkhir. Direction des ressources en eau, Tunis, 28 p.
- FOURNET A, 1958- Etude pédologique de l'Oasis de Gafsa-Lella. Publication ORSTOM/DS n° EP-144, Direction des sols, Tunis.
- FRONTIER S., 1983- Stratégies d'échantillonnage en écologie. Ed., Masson, PUL, Paris, 494 p.
- GADDAS R., KCHOUK F., 1962- Géomorphologie des zones arides et semi-arides. Serv., Spec., d'Etudes Hydr. et Péd., n° ES-44, 20 p, Tunis.

Références bibliographiques.

-
- GARRELS R.M., CHRIST C.L., 1967- Equilibre des minéraux et de leurs solutions aqueuses. Gauthiers-Villars, Paris, 335 p.
- GARRELS R.M., THOMPSON M.E., 1962- A chemical model for sea water at 25°C and one atmosphere total pressure. *American Journal of Science*, Vol. 260, p: 57-66.
- GASCUEL-ODOUX Chantal, 1984- Application de la géostatistique à l'étude de la variabilité spatiale des propriétés du sol. Thèse Doc., Ing., ENSP/Univ. Paris VI, 235 p.
- GRETHER C., BRUTTEL P., 1975- Conductométrie. Metrohm application Bull. n° 102e, 11 p., Herisau.
- GRUET M., 1954- Le gisement moustérien d'El Guettar. *Karthago*, Vol. V, p: 1-79.
- HALITIM A., 1985- Contribution à l'étude des sols des zones arides (Hautes plaines steppiques de l'Algérie). Morphologie, distribution et rôle des sels dans la genèse et le comportement des sols. Thèse Doc., Univ., Rennes, 383 p.
- HARDIE L.A., 1967- The gypsum-anhydrite equilibrium at one atmosphere pressure. *The American Mineralogist*, Vol. 52, p: 71-200.
- HARVIE C.E., WEARE J.H., 1981- The prediction of mineral solubilities in natural waters: the Na-K-Mg-Ca-Cl-SO₄-H₂O system from zero to high concentration at 25°C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 44, p: 981-997.
- HERRERO J., PORTA J., 1985- Sols sur gypse dans le Nord-Est de l'Espagne. Colloque, sous-commission de micromorphologie des sols, AISS/AFES, 8-12 juillet, Paris.
- HOLIDAY V.T., 1985- Evidence micromorphologique d'apport éolien dans les sols de l'holocène récent des hautes plaines du sud du Texas. Colloque, sous-commission de micromorphologie des sols, AISS/AFES, 8-12 juillet, Paris.
- ILRI, 1963- Reclamation of salt affected soils in Iraq. Dielemen ed., Wageningen, Pays Bas, 176 p.
- JACOBSEN TH., 1982- Salinity and irrigation agriculture in antiquity. Diyala Basin Archaeological Projects: Report on essential results, 1957-8. Undena Publications, Malibu, 120 p.
- JAUZEIN A., 1974- Les données sur le système CaSO₄,H₂O et leurs implications géologiques. *Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique*, Vol. XVI, Fasc. 2, p:151-160.
- JOB J.O., 1981- Some Problems in Analysis of Soils of Arid Areas, in: Third Int., Soil Class. Workshop Proceedings, ACSAD pub N° SS/P17/81, p: 219-237.
- JOB J.O., 1983- Analysis of soils: accuracy and precision. Third Int., Training Session on Soil Analysis, ACSAD/ORSTOM n° SS/R48/83.
- JOB J.O., 1985- Conductivimétrie électromagnétique: application à la cartographie des sols salés. 25ème semaine des Sciences de Damas (Syrie).

Références bibliographiques.

-
- JOB J.O., 1985- Conductivimétrie électromagnétique: étalonnage sur les sols salés de la Basse Vallée de L'Euphrate (Syrie). Centre ORSTOM de Montpellier, 9p.
- JOB J.O., COCHONNEAU G., 1985- Bilion: un programme de calcul des bilans ioniques et des ions appariés dans les solutions. Journées informatiques sur l'application de l'informatique à la valorisation des données physico-chimiques. Centre ORSTOM de Bondy, 14 p.
- JOB J.O., LOYER J.Y., AILOUL M., 1987- Utilisation de la conductivimétrie électromagnétique pour la mesure directe de la salinité des sols. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., Vol. XXIII, n°2 p: 123-131.
- JOB J.O., LOYER J.Y., 1988- Variation spatiale de la salure globale de la parcelle n°2049. Projet CEE "Réhabilitation des Marismas du Guadalquivir". Centre ORSTOM de Montpellier, 10 p.
- JOB J.O., MERAI M., 1990- Etude de la salinité des sols de l'oasis d'El Guettar. Pub., ORSTOM/DS, n°ES-248, Direction des Sols, Tunis, 49 p.
- JOB J.O., MOUHEICH T., BANDAR M., FAWAL I., 1984- Chemical analysis of saline soils. Pub n° P25/84, ACSAD, Damascus.
- JOB J.O., TABBAGH A., LOYER J.Y., 1992- Réalisation d'un conductivimètre électromagnétique à faible pénétration. ORSTOM/CNRS, contrat MRT n° 88L0467, 17 p.
- JONC E.(de), BALLANTYNE A.K., CAMERON D.R., READ D.W., 1979- Measurement of Apparent Electrical Conductivity of Soils by an Electromagnetic Probe to Aid Salinity Surveys. Soil Sci., Soc., Am., J., Vol. 43, p: 810-812.
- KIELLAND J., 1937- Individual activity coefficients of ions in aqueous solution. J., Amer., Chem., Soc., Vol. 59, p:1675-1678.
- KOVDA V.A., 1937- Les sols salés et alcalins. Academie des Sciences de L'URSS (en Russe), Vol. 37, n° 3, p: 253-266.
- LASRAM M., 1990- Les systèmes agricoles oasiens dans le sud de la Tunisie, p:21-29, in: " Les systèmes agricoles oasiens", actes du colloque de Tozeur, 19-21 nov., CIHEAM/CCE, Options Méditerranéennes, Montpellier, 338 p.
- Le DAIN (A.Y.), 1977- Origine et fonctionnement d'une tache de salin en Camargue. Utilisation d'une méthode électrique de mesure in situ de la salinité. D.E.A Agronomie option Pédologie, ENSAM/USTL, Montpellier.
- Le HOUEROU H.N., 1990- Définitions et limites bioclimatiques du Sahara. Sécheresse, Vol. 1., n° 4, p: 246-259.
- MARIUS C., 1985- Mangroves du Sénégal et de la Gambie, Ecologie, pédologie, géochimie, mise en valeur et aménagement. Trav. et Doc., ORSTOM, Paris, 355 p.
- MARTINI, 1968- Carte pédologique de l'oasis d'El Guettar. Publication, ORSTOM/DS n° EP-384, Direction des sols, Tunis, 2 p.

Références bibliographiques.

-
- McNEILL J.D., 1980a- Electrical conductivity of soils and rocks, Technical note n° TN-5, Geonics Ltd, Mississauga, Canada.
- McNEILL J.D., 1980b- Electromagnetic conductivity terrain measurement at low induction numbers. Technical note n° TN-6, Geonics Ltd, Mississauga, Canada.
- MOUMI L., FARHAT H., 1990- Simulation de l'exploitation des nappes phréatiques du gouvernorat de Gafsa. Ministère de l'Agriculture, DRE, 12 p., multigr.
- MTIMET A., 1987- Sauvegarde des Oasis du Gouvernorat de Gabès. Etat de la salure des sols et comportement hydrique. Division des Sols n° E-S 241, 57 p., multigr.
- MURRAY R.C., 1964- Origin and diagenesis of gypsum and anhydrite. J., of Sedimentary Petrology, Vol. 34, n°3, p: 512-523.
- NAKAYAMA F.S., 1971- Calcium complexing and the enhanced solubility of gypsum in concentrated salt concentration. Soil Sci., Soc., Amer., Proc., Vol. 35, p: 881-883.
- NOVIKOFF, 1963- Etude pédologique de l'Oasis de Gafsa-Ksar, rive droite. Publication ORSTOM/DS, n° EP-235, Direction des sols, Tunis, 4 p, 2 cartes.
- OSTROFF A.G., 1964- Conversion of gypsum to anhydrite in aqueous salt solutions. Geoch., Cosmochimica Acta, Vol. 28, p: 1363-1372.
- PERRET D., 1982- Calcul d'équilibres géochimiques par minimisation d'énergie libre. Thèse Doc., Ing., ENSAR/Un., Rennes I, 120p.
- PERTHUISOT J.P., 1975- La sebkha El Melah de Zarzis. Genèse et évolution d'un bassin paraliq. Trav. Labo. de Géol., n°9, Ecole Normale Sup., Paris, 251 p.
- PERUSSET M., 1954- Les vents de sable en Tunisie. Doc., Service météorologique de Tunisie, 6 pages.
- PIERRE Catherine, 1986- Les isotopes stables traceurs des conditions de sédimentation et de diagénèse évapotitiques. In: Les séries à évaporites en exploration pétrolière, Tome I: méthodes géologiques, Chap. 6, p: 147-161, Ed., Technip, Paris.
- PLEIJSIER L.K., 1986- Proceedings of an International Workshop on the Laboratory Methods and Data Exchange Programme, ESRIC/DGIS/ORSTOM/SMSS, 25-29 Aug., Wageningen, The Netherlands, 150 p.
- POUGET M., 1969- Contribution à l'étude des croûtes et encroûtements gypseux de nappe dans le Sud Tunisien. Pub. n° E-S 70, 87 p., Ministère de l' Agriculture/ORSTOM, Tunis.
- PREZIOCI P.C., 1954- Le climat de la Tunisie. Service météorologique de Tunis, 26 p.
- RHOADES J.D., CORWIN D.L., 1981.- Determining soil electrical conductivity-depth relations using an inductive electromagnetic soil conductivity meter. Soil Sci., Soc., Am., J., Vol. 45, p: 225-260.
- RHOADES J.D., INGVALSON R.D., 1971.- Determining Salinity in Fields Soils with Soil Resistance Measurements. Soil Sci., Soc., Am., Proc., Vol. 35, p: 54-60.

Références bibliographiques.

-
- RIEU M., CHEVERRY CL., 1976- Mise au point bibliographique sur quelques recherches récentes en matière de sols salés. Cahiers ORSTOM, Sér., Pédo., Vol XIV, n°1, p: 39-61.
- RIOU Ch., 1980- Une formule empirique simple pour estimer l'évapotranspiration potentielle moyenne en Tunisie. Cah., ORSTOM, sér., Hydrologie, Vol. 17, n°2, p: 129-137.
- RIOU Ch., 1990- Bioclimatologie des oasis, p:207-221, in:"Les systèmes agricoles oasiens", actes du colloque de Tozeur, 19-21 nov., CIHEAM/CCE, Montpellier, 338 p.
- ROBINSON (R.A.), STOKES (R.H.), 1959- Electrolyte Solutions, Londres, Butterworths.
- ROBBINS C.W, WAGENET R.J., JURINAK J.J., 1980- A combined salt transport-chemical equilibrium model for calcareous and gypsiferous soils. Soil Science, Vol.44, n°6, p:1191-1194.
- SAFAR T., 1983- Pédologie et géochimie des milieux salés. Contribution à l'étude de la dynamique des sels dans une plaine alluviale irriguée et non drainée. Thèse Doc., Ing., ENSAIA/INP, Nancy, 190 p.
- SASSI B.M.S., 1962- Contribution à l'étude de la Sebka Tegdimane et du Chott El Guettar. Thèse 3ème cy., Univ. de Paris, 117 p.
- SCHWAB D.E., 1983- Some agricultural and meteorological terms in Akkadian. A reconsideration of the basic source material. SUMER, Vol. XXXIX, n° 1-2, p: 146-169.
- SPOSITO G., MATTIGOD S.V., 1977- On the Chemical Foundation of the Sodium Adsorption Ratio. Soil Science Society of America Journal, Vol. 41, p: 323-329.
- STUMM W., MORGAN J., 1981- Aquatic chemistry, J. Wiley & Sons ed., 780 p.
- TABBAGH A., 1974- Définition des caractéristiques d'un appareil électromagnétique classique pour la prospection archéologique. Propezioni Archeologiche, Vol.9, p: 21-23.
- TABBAGH A., 1986- What is the best coil orientation in the Slingram electromagnetic prospection method ? Archaeometry, Vol. 28, n° 2, p: 185-196.
- TANJI K.K., 1969- Solubility of gypsum in aqueous electrolytes as affected by ion association. Envir., Sci., Technology, Vol. 3, n° 7, p: 656-661.
- TARDY Y., GAC J.Y., 1979- Contrôle de la composition chimique des solutions par la précipitation des minéraux dans les sols. Bulletin A.F.E.S., p: 107-123.
- TOUTAIN G., 1976- Le palmier dattier: culture et production. Al Awamia, Rabat n° 25, p: 83-151.
- TOUTAIN G., DOLLE V., FERRY M., 1990- Situation des systèmes oasiens en région chaudes. In: "Les systèmes agricoles oasiens", actes du colloque de Tozeur (19-21 nov.), CIHEAM/CEE, Options Méditerranéennes, Montpellier, 338 p.

-
- TRICHET J., COURTY M.A., 1985- Microstructures des sols de la plaine d'Al-Khanoum (Afghanistan). Conséquences archéologiques. Coll., sous commission de micromorphologie des sol, AISS/AFES, 8-12 juillet, Paris.
- TRICHET J., 1967- Etude du faciès d'une dune gypseuse (Sud d'Oran, Algérie). Bull., Soc., Geol., de France, Vol.7, n°IX, p: 865-875.
- TRUESDELL A.H., JONES B.E., 1974- Wateq: a Computer Program for Calculating Chemical Equilibria of Natural Waters. J., Res., Geol., Survey, Vol. 2, n° 2, p: 233-248.
- USSL, 1954- Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. Agriculture Handbook n° 60, Richards ed., US Dep. of Agriculture, Washington.
- VALLES V, 1985- Etude et modélisation des transferts d'eau et de sels dans un sol argileux. Application au calcul des doses d'irrigation. Thèse n° 15, INP, Toulouse, 145 p.
- VAN BLADEL R., GHEYI H.R., 1980- Thermodynamic Study of Calcium-Sodium and Calcium-Magnesium Exchange in Calcareous Soils. Soil Sci., Soc., Amer., J., Vol. 44, p: 938-942.
- VAN BREMEN N., WIELEMAKER W.G., 1974- Buffer Intensities and Equilibrium pH of Minerals and Soils: the contribution of Minerals and Aqueous Carbonate to pH Buffering. Soil Sci., Soc., Amer., Proc, Vol. 38, p: 55-65.
- VAN WAMBEKE A., 1982- Soil Moisture and Temperature Regimes. Cornell University, and Soil Conservation Service, 180 p.
- VIELLEFON J. 1978- Les sols gypseux en Tunisie. Sols de Tunisie, n°10, p: 38-104.
- VIELLEFON J., 1980- Approche de l'intensité de la dynamique actuelle des accumulations gypseuses dans les sols au moyen du dosage de la teneur en tritium de l'eau de constitution du gypse. Pub., ORSTOM/DS, n° E-S 181, Direction des Sols, 22p.
- VIELLEFON J., ZANTE P., 1981- Etude du régime hydrique et de la salure en périmètre irrigué sur sol gypseux salé. Compte rendu de la campagne de mesures 1979-1980. Pub., ORSTOM/DRES n° E-S 190, Direction des sols, Tunis, 100 p.
- VITTOZ J., 1989- Un problème de développement: le cas des palmeraies dattières. Mém. CIHEAM, 257 p., IAM, Montpellier.
- VOLTZ M., 1986- Variabilité spatiale des propriétés physiques du sol en Milieu alluvial. Thèse Doc., Ing., ENSA, 198 p., Montpellier.
- WILLIAMS B.G., BAKER G.G., 1982- An Electromagnetic Induction technique for Reconnaissance Surveys of Soil Salinity Hazards. Austr., J., Soil Res., n° 20, p: 107-108.



ANNEXES
A.- DESCRIPTION DES PROFILS.

- A.1. - Butte mio-pliocène.
- A.2. - Gypse éolien non cultivé.
- A.3. - Profil AM1 cultivé.
- A.4. - Bordure de chott non cultivé.
- A.5. - Bordure de chott cultivé.
- A.6. - Profil de bordure après inondation.
- A.7. - Profils de sols hydromorphes.
- A.8. - Profils de partie basse.
- A.9. - Profil de chott.
- A.10. - Profil à bon drainage.
- A.11. - Profil à trois strates.
- A.12. - Profil de sol de jardin.

B.- ETALONNAGE DE LA CONDUCTIVITE ELECTROMAGNETIQUE.

- B.1. - Etalonnage sur la parcelle MB.
- B.2. - Etalonnage sur la parcelle GL.
- B.3. - Etalonnage sur les parcelles FH et SLH.
- B.4. - Etalonnage par rapport au gypse.
- B.5. - Etalonnage sur sols très salés.

C.- CARACTERISTIQUES DES PUIITS ET DE LA NAPPE PHREATIQUE.

- C.1. - Caractéristiques et localisation des puits en 1982.
- C.2. - Analyses chimiques en 1978 et 1990 sur les puits.
- C.3. - Situation des puits analysés en 1990.
- C.4. - Analyse des eaux de puits en 1990.
- C.5. - Evolution actuelle dans les puits.
- C.6. - Analyses chimiques de la nappe dans les parcelles témoins.

D.- SIMULATION DE PLUIE.

- D.1. - Salure vraie et salure apparente globale.

E.- MODELISATION DES PROFILS SALINS.**F.- DIAGRAMMES DE RAYONS X ET SPECTRES DE MICRO-SONDE.**

- F.1. - Diagrammes de poudre de rayons X: sols vierges,
- F.2. - " " " " : sols cultivés.
- F.3. - Diagrammes de rayons X sur sols bruts: vierges,
- F.4. - " " " " " : sols d'oasis.

G- CALCUL DES IONS APPARIES.**H- MODELISATION DES PROFILS SALINS.**

*Description des profils***A.1- Butte miopliocène Es Sed.**

Numéro: ES90.
Date: 19/05/90.
Situation: x= 5500 y=500. Butte mio-pliocène Sud-Ouest.
Végétation: néant.

Surface: cailloux(1 à 4 cm), quelques polygones de gypse mal délimités, quelques fragments de cristallisation gypseuse stratifiée, (ancien rivage du chott ?).
 0-0,05 : croûte battante, dure, couleur 10YR 7/4 (à l'état humide).
 0,05-20: horizon déstructuré de précipitation-infiltration.
 20-40: matériau gypseux avec nombreux cristaux en rose des sables de 10 à 150 mm, assez compact, couleur 10 YR 6/6, peu homogène, mobilisation des sels.
 40-120: idem plus compact, sans mobilisation des sels, très hétérogène en structure à cause de la présence de macro-cristaux de gypse en conglomérat.
 120+: argile mio-pliocène marron, 10YR 6/6 très compacte.

Cette argile constitue l'imperméable de la nappe du chott.

A.2.- Gypse éolien non cultivé.

Numéro: AM2.
Date: 20/06/90.
Situation: 100 m au sud de la voie ferrée au niveau de Aïn Meskia, x=1000, y=3700, chez Mr. Ben Ali. Formations éoliennes gypseuses de raccordement entre le chott et le cône de dejection de l'Oued Lortess.
Végétation: *Zygophyllum album* et *Salsola tetragona* clairsemés. Palmiers kenta aux alentours.

Surface: nue.
 0-0,05: pellicule de battance grise.
 0,05-15: 10 YR 7/4, sable gypseux lithé par couches de 2 à 5 mm, nombreuses racines de palmier, cristaux de remobilisation du gypse, d.a=1,29 , CaCO₃ 2%, transition brutale avec:
 15-100: 10 YR 8/3, gypse lenticulaire dépourvu de racines, dur, friable, densité apparente variant en continu de 1,39, à 1,62 vers le bas, CaCO₃ 7%,
 100-130: même encroûtement plus humide. Quelques racines vivantes et fossiles.

Conductivité électrique du matériau saturé d'eau: CEV/CEH= 30/28 mS.m⁻¹

Ca	Mg	K	Na	Cl	SO4	Bi	SAR	pH	CEs	Cat	Gyp	Sat	Ech.
34	9	0,8	2,7	3,2	40	2	1	8,4	3,1	4	33	43	AM2-P248

Tab.A.1- Profil AM2: analyse de l'extrait saturé de l'horizon 1-15 cm.

Description des profils

A.3- Profil AM1 cultivé.

Numéro: AM1
Date: 20/06/90.
Situation: 50 m au sud de AM2.
Végétation: *Salicornia fruticosa*, *Limonium thumetatum*, *Mesembryanthemum sp.*, palmiers dattiers variété Chekent, a été irrigué jusqu'en 1984.

Surface: débris de palmes épars.
 0-25: 10 YR 4/3, fines racines de graminées et halophytes.
 25-100: 10 YR 7/6, gypso-sableux éolien, très nombreuses racines de palmier, pas de structure visible, quelques amas irréguliers de fins cristaux de gypse de remobilisation.
 100-120: sablo-limoneux, frais, peu de racines, quelques taches d'oxydo-réduction.
 120-140: nappe temporaire dans horizon non hydromorphe.

pH 1/2,5	CEs ds/m	CaCO ₃ %	Gypse %	PS %	Ech
8,0	26	12	24	50	0-20
8,0	27	6	32	43	20-100
8,0	20			45	100+

Tab.A.2- Profil AM2: analyses physico-chimiques.

A.4- Bordure de chott non cultivé avant inondation.

Numéro: GUE4
Date: 21/07/89.
Situation: Sqaq El Bel, 100m Sud-Est repère 205.
Végétation: *Artrocnemum glaucum* dense.

Surface: bossellée, cote 220 m, zone inondable.
 0-5: structure de surface poudreuse, cristaux mélangés de gypse, halite et epsomite.
 5-20: limono sableux, structure polyédrique angulaire peu exprimée, nombreuses racines.
 20-40: même horizon en texture et structure, avec quelques amas gypseux roses et blancs.
 40-60: gypse bleu-vert hydromorphe, en biseau, cet horizon ne se retrouve pas partout dans le profil (recouvrement éolien?).
 60-150: limono sableux jaune brun, sans accumulation de gypse.
 150+: accumulation de gypse et début de consolidation.

Transition avec chott: CEV/CEH = 730/730, nappe à 200 cm.

Tab.A.3.- GUE4: composition de l'extrait saturé.

Ca	Mg	K	Na	Cl	SO ₄	HCO ₃	SAR	Mg/Ca	CE	échantillon
37	315	11,5	386	360	300	5	29	8,5	46,0	GUE4 5-20
35	315	8,8	378	360	347	5	29	9,0	39,0	70-150

Description des profils

Tab.A.5- .GUE4: caractéristiques physico-chimiques.

pF		Sat	CEs	pH	CaCO ₃		Gypp	C	N	échantillon	
2,7	4,2	%pd	dS/m	1/2,5	tot	act	% pon	%	%		
24	10	30	134	8,9	16	15	20	0,7		GUE4	
20	10	44	69	8,8	19	10	19	0,5	0,04		0-5
16	8	43	41	8,9	14	12	47		0,01		5-20
16	9	40	41	8,8	9	8	73				20-60
17	8	48	40	8,9	25	12	24				60-70
										70-150	

Hg	Na	Na/Hg	numero
31	7.7	0.24	GUE4 15-30
22	6.5	0.30	30-50

Tab.A.6- Cations échangeables:(méthode Bower Ariana).

Diffraction des rayons X

- sur sol non fractionné:

GUE 4(15-30) : quartz, calcite, gypse moyen, dolomite

GUE 4(30-50) : gypse très important, quartz, calcite, traces de dolomite

-sur la fraction inférieure à 2 μ .

GUE 4(15-30):

Un peu de calcite, petite raie à 2,89 (dolomite) avec traces possibles d'ankérite, illite est toujours présente par un pic large mal cristallisée, probablement interstratifiée traces de gonflement au glycérol, au chauffage traces de pic vers 14, kaolinite.

GUE 4(30-50) :

Calcite importante, Un peu de quartz, raie à 2,89 dolomite avec traces possibles d'ankérite, illite pic large, traces possibles de smectite et d'interstratifié, au chauffage présence d'un pic vers 13,5, kaolinite.

A.5- Profil en bordure de chott cultivé avant inondation.

Numéro: GUE5Date: 21/07/89.Situation: 50 m à l'est de GUE4, chez Mr Lakhdar Gaddous.Végétation: Oliviers jeunes, piments, pommes de terre. Mise en culture depuis quatre ans après surfacage léger.Surface: plane.Salure: CEV/CEH= 120/70.

0-20: anthropique, apport régulier de fumier, structure micro-grenue, limite nette avec:

20-50: structure polyédrique anguleuse, quelques racines, rares amas friables gypse.

50-70: idem plus pseudo-mycellium gypseux.

70-100: horizon sableux avec quelques petites cristallisations de gypse.

Description des profils

pF		Sat	Mge	Nae	Mg/Na (e)		pH	echantillon
2,7	4,2	%	dS/m	1/2,5	tot	act	1/2,5	
22	12	52	17,5	1,4	12,5		8,4	GUES 0-30
22	11	60	15,5	1,7	9,2		8,4	30-50
24	14	63					8,4	50-70
26	16	58					8,4	70-100
21	13	45					8,6	100-150

Tab.A.7- Caractéristiques physico-chimiques des sols de la parcelle située juste à l'ouest de Mr Gley Ahmed.

• GUES	CaCO3	CaCO3	Gypse	C %	N %	Ca	Na	K	Mg	T
0-30	24	11	11	8	0,5	5,3	1,2	1,3	0,3	8
30-50	21	14	18	4	0,5	4,7	1,2	1,7	0,2	8
50-70	32	19	7			6,3	1,1	1,7	0,9	10
0-100	28	16	14			4,3	1,0	1,8	0,3	8
0-150	27	15	9			9,6	1,6	1,6	0,8	14
150+	7		46							

Tab.A.8- Complexe absorbant et mobilité du calcium (gue5 (50-70): argile=23, limons f=45, limons g=20, sables f=9, sables g=1).
Analyse d'extraits de sol:

Ca	Mg	K	Na	Cl	SO4	HCO3	SAR	pH	CE	numero
29	43	6	27	16	75	0,4		7,7	8,3	GUES 15-30 Bondy
29	41	5	35	17	84	1,1		7,9	8,3	50-70

Tab.A.9- Analyse de l'extrait saturé.

Ca	Mg	K	Na	Cl	SO4	HCO3	SAR	pH	CE	numero
32	20	2	25	26	52	6	5	8,5	5,8	GUES (cult) 02
38	19	3,5	23	14	63	5	4		5,7	20-50
41	19	3,9	25	14	64	4	4		5,7	50-70
43	20	5,1	26	20	71	4	5		6,3	70-100
40	19	3,7	30	16	69	5	6		6,3	100-150

Tab.A.10- Analyse de l'extrait saturé (Aout 89).

Ca	Mg	Na	Na/T	st%	Cat-a	Gyp	c%	numero
52	24-11	11	0.5	5.3	0.3	1.2	14	GUES 0-30

Tab.A.11- GUES: horizon anthropique. Cations Echangeables:(méthode Tucker à Bondy)

- Diffractométrie des rayons X sur sol non fractionné.

15-30: calcite importante, quartz, dolomite, un peu de gypse.

30-50: quartz, calcite importante, gypse, dolomite.

- sur fraction inférieure à 0,2 μ .

15-30: calcite assez importante, un peu de quartz, petite raie à 2,89 de dolomite avec traces possibles d'ankérite. Illite représentée par un pic assez large se refermant à 10, mais il reste une trace de pic vers 14 Å. Traces possibles de smectite, kaolinite.

30-50: calcite importante, un peu de quartz, nette raie de dolomite à 2,89 avec ankérite, illite. Pic large probablement interstratifié, traces de smectite et de kaolinite.

Description des profils

A.6- Profils en bordure de nu après inondation.

- Numéro: 190.
Date: 12/11/90.
Situation: chemin de Saq El Bel, bordure de zone pionnière récente (1980-1990), x=4250 y=280. Profil creusé à 50 m au Sud de parcelle de Mr Amor Ben Khalifa, plantée en ail, dans sol vierge.
Végétation: *Tamarix sp.*, *Arthrocnemum glaucum* et *Salsola tetrandra*.
- Surface: nuë.
 1 mm: boursoufflures de sel.
 2 mm: réduction des sulfures sous couches d'algues.
 2-4 mm: sédimentation due aux inondations, petite couche lithée.
 0,4-20: Texture limoneuse sans structure, pseudo-mycelium de sels, nombreuses racines de *Tamarix*, d'halophytes.
 20-30: idem avec accroissement des pseudo-mycelium.
 40-45: passage gypseux.
 45-60: idem moins gypseux plus argileux.
 60-90: gypse très poreux rose pâle.
 90-150: gypse de plus en plus compact, quelques racines.
 150-170: gypse gris, zone de battement de nappe.
 230: nappe (échantillon D116).

Ca	Mg	K	Na	Cl	SO4	HCO3	RS	pH	CE	SAR	Site
27	140	1,6	123	106	170	9	12	7,7	16,3	13,5	D116nap

Tab.A.12- Analyse d'eau de nappe du profil n°190 et répartition du calcium dans le profil 190.

A.7- Profils de sols hydromorphes à Lortess.

- Numéro: TIN
Date: 23/05/90.
Situation: bordure de l'ancien Oued Tineflou, derrière vieux puits n° 70, Mr El Taieff Ahmed.
Végétation: une seule strate de palmiers de 40 ans, irrigués depuis 15 ans avec une culture herbacée épisodique.
Surface: nue.
Salure: CEV/CEH = 205/212.
 0-35 : brun clair, limoneux, frais, structure prismatique subangulaire; horizon anthropique non fonctionnel, passages sableux (eolien?) irréguliers, pas de gypse, limite très nette.
 35-60: un peu plus foncé et verdâtre. Nombreuses racines de palmier, gypse en concrétion en forme de poupées et petites géodes cimentées par du carbonate de calcium. Structure granuleuse, limite très nette.
 60-120: idem avec moins de racines, structure granuleuse incluant de nombreux cristaux de gypse subcentimétriques, traces d'hydromorphie,
 120-180: pseudo-gley,
 180: nappe (éch: TIN1).

Description des profils

prof.	θ60	CEdx	CEst	GYPc	Sat%	PF2,7-PF4,2	pH1/2,5
0-35	19	2,24	10,4	8,5	50	28 15	8,0
35-60	19	1,65	10,1	7	55	34 22	8,0
60-100	20	1,74	13,1	4	58	27 19	8,3
100-120	20	2,40	15,2	2	52	21 12	8,6
120-140	18	1,83	15,5		50	18 10	8,8
140-160	18	1,51	12,9	1	58	21 15	
160-180	16	1,78	12,9	2	55	19 15	
180-190	19	1,80	14,2	2	55	18 11	
num	TIN-photo racines-profil-nappe TIN1						

Tab.A.13- Analyses physico-chimiques sur le profil TIN.

Echantillon	CEV/CEH	PF2.7	4.2	SAT%	CEst	Gyp
TINA inondée 0 j	190/190,	17	11	45	13	11
TINB inondée 60 j	215/270,	13	8	40	13	14
TINC inondée 90 j	250/290	17	10	43	14	14

Tab.A.14- Effet des inondations sur l'horizon anthropique.

A.8.- Profil de partie basse dans l'oasis.

Numero: 2366 du 12/12/89.

Situation: aval gare, taille 220 sur 30 m, inondée six mois.

Salure et végétation: CEV/CEH de 255/287 à 195/155 mS.m⁻¹ suivant culture, nappe à 140 cm,

Diffraction X sur sol non fractionné:

20-40: quartz, gypse important, calcite, dolomite,

40-60: gypse important, quartz, calcite, traces de dolomite.

Diffraction X sur fraction inférieure à 2 μ.

20-40: calcite importante, un peu de quartz, petite raie de dolomite à 2,89, pic dédoublé d'illite et interstratifié entre 9,9 et 10,8 se refermant mieux au chauffage et faisant apparaître un pic entre 13,2 et 14,6 Å. Traces possibles de smectite et de kaolinite.

40-60: calcite importante, un peu de quartz, raie à 2,89 dolomite avec traces possibles d'ankérite. Le pic de l'illite est identique à l'échantillon précédent, kaolinite.

Ca	Mg	K	Na	Mg/Na	pH	CE	Site	méthode
9	9		0,54	16,6			2366 20-40	(1)
9	13		1,19	10,9			40-60	(1)
21	5.5	1.18	1,48	3,7			40-60	(2)

Tab.A.15- Valeurs des cations échangeables par diverses méthodes.

(1): lavage à l'éthanol jusqu'à disparition des chorures dans le filtrat, extraction à ACONH₄ (pH 7,0).(2): premier lavage par une solution d'éthanol à 70%, deuxième lavage par une solution aqueuse à 17% de glycerol, suivi d'une double extraction: d'abord par une solution de choline C₅H₁₄ClNO dans l'éthanol à 70%, puis par NH₄(SO₄)₂ molaire.

Description des profils

Ca	Mg	K	Na	Cl	SO4	bi	CAL	105	Gyp	CE	pF	n°2366
27	5	0,3	3	3	29	3	20	26	46	2,5	21-14	0-20
33	7	0,3	5	5	38	2	17	26	54	3,1	17-14	40
29	12	0,3	8	8	38	3	12	26	78	3,4	20-19	60
27	17	0,6	10	10	44	2	15	26		3,8	22-18	80
30	13	0,4	9	9	39	3	6	26	80	2,7	23-6	100
30	13	0,4	9	9	39	3	4	26	79	2,6	23-9	120
17	165	3,2	126	118	179	14		26		20,8		nappe
30	125	3,2	87	80	148	13		26		16,1		puits

Tab.A.16- Extrait au 1/5ème, nappe et puits voisin.

A.9- Profil de bordure de chott.

Numero: AR1290.Date: 9/12/90Situation: bout de parcelle 701 en bordure du chott, cote 219, topographie plane.Végétation: bord de palmeraie à une strate (Deglet noir).Salure: CEM=307/261 à saturation, profil resté sous l'eau pendant 9 mois. La nappe se trouve à 45 cm. Taches de réduction apparentes sur le profil dès la surface.

Ca	Mg	K	Na	Cl	SO4	bi	St%	Gyp	Ca/Mg	CEst	CEcn	échant.
								35			6.1	AR 0- 1
45	76	3.0	104	132	88	7	45	25	0.59	17,9	3.7	1-10
41	62	3.5	55	73	82	7	45	25	0.66	12,5	3.0	10-20
								44			2.9	30-40
										9.4	-	Nappe

Tab.A.17- Composition de l'extrait saturé du profil AR1290.

A.10- Profil d'oasis traditionnelle à bon drainage.

Numero: ALI57Date: 21/05/90Situation: Aïn El Alem, parcelle n°52 du sous-ensemble, cadastrée n° 2349, propriétaire Ali Jellouli juste à l'est de la parcelle 57,Cultures: trois strates bien entretenues, fèves, piments, tomates, abricotiers et oliviers, palmiers ftimi et kenta, irrigué 2h 30 par mois à 15l/s pour 235 m,Salure: CEM: 240/100, 150/170, 160/130, 100/80, 85/95.

- 0-10: organique anthropique, gris foncé, friable, subangulaire fin, frais, quelques petites concrétions friables de gypse, nombreuses racines fines de mauvaises herbes, transition graduelle et irrégulière,
- 10-30: gris clair, un peu plus structuré, nombreuses racines de palmiers, cristaux friables de gypse,
- 30-100: début d'encroûtement très friable avec beaucoup de limon calcaire, texture irrégulière, racines moins fréquentes vers le bas.

Description des profils

pr	f	θ60	CEdx	CEst	Gypp	Gypc	pF 2,7- 4,2	
0-20	14	1,9	4,5	23	23	31	16	
20-40	14	2,8	5,8	44	45	26	12	
40-60	14	2,63	6,2	67	50	25	8	
60-80	18	2,86	7,8	61	55	26	9	
80-100								
100-120								
moyenne	15	2,55	6,1	49	43	27	11	
CEM				85/95				
num				ALI-57	05-90			

Tab.A.18- Analyses physico-chimiques du profil ALI.

A.11- Profil dans oasis traditionnelle à trois strates.

Numero: 2262.

Date: décembre 1989.

Situation: milieu de l'oasis, dans le sous-ensemble de la gare.

Analyse diffractométrique sur sol non fractionné.

20-40: gypse important, quartz, calcite, dolomite.

40-60: quartz très important, calcite importante, dolomite, gypse.

sur fraction inférieure à 2 μ.

40-60: calcite importante, raie à 2,89 assez importante, dolomite avec traces possibles d'ankérite, un peu de quartz, smectite, pic large d'illite, au chauffage pic à 10 A, traces d'un pic vers 14 A, kaolinite.

Ca	Mg	Na	Cl	SO4	CE	DpF	Calt	Gyps	θ10°	Numero
21	1.7	1,8	22	1,9	6	22	T	23		2262 0-20
25	3,5	1.6	1,8	27	2,1	4	21	3	10	20-40
26	3,9	2.0	1,9	27	2.2	8	21	10	12	40-60
27	7,0	3,3	2,8	32	2.5	7	12	35	12	60-80
26	9,0	5,1	4,8	35	2.6	4	17	19	14	80-100
27	11	5,2	4,9	36	2.9	6	17	17	15	100-120

Tab.A.19- Parcelle 2262: extrait 1/5.

Ca	Mg	Na	Mg/Na	numero
5.3	7.5	0.65	11.5	2262 20-30
5.3	8.0	0.79	10.1	40-60

Tab.A.20- Cations échangeables.

Description des profils.

A.12- Profils de sols de jardin à bon drainage.

Numero: GARE.

Date: 15/12/89.

Situation: petite parcelle cadastrée 1695 en amont de la voie ferrée en dernière position sur le chemin à droite.

Cultures: oliviers, figuiers et jardinage. Quelques plans de palmier de huit ans en début de production, bonne irrigation.

Ca	Mg	Na	Cl	SO4	CE	DpF	Calt	Gyps	105	Numero
14	3,2	1,7	1	17	1,5	16-11	20	t	16	GARLE 0-20
23	2,0	1,5	1	25	1,9	13/10	29	4	12	20-40
28	2,8	1,5	1	28	2,2	13/9	29	10	11	40-60
28	3,2	1,6	1	28	2,2	12/9	19	14	12	60-80
28	4,0	1,7	1,3	29	2,3	11/8	19	12	11	80-100
26	8,0	4,0	3,2	32	2,5	12/9	19	11	12	100-120

Tab.A.21- Parcelle 1695: extraits au cinquième.

Ca	Mg	K	Na	Cl	SO4	HO3	S%	pH*	CEst	Gypc	Echantillon
38	7	0.6	5.8	3.2	40	4	50	8.1	3.5	4	Garell 0-20
32	8	0.6	1.8	1.8	38	4	48	8.1	2.8	7	Garell 20-40
32	11	0.7	3.1	3.6	40	3	43	8.1	3.1	13	Garell 40-60
47	23	1.0	28	32	61	4	43	8.1	7.2	13	Garell 60-80
31	15	0.8	4.8	4.9	44	3	40	8.1	3.4	10	Garell 80-100
46	32	1.3	42	66	48	4	40	8.1	9.0	11	Garell 100120

Tab.A.22- Extrait saturé (pH 1/2,5) et conductivité électrique (dS/m), prélèvement du 3/02/90.

Mg	Na	Na/T	numero
7	0,6	0,08	GARE 0-20
6	0,6	0,09	40-60

Tab.A.23- Cations Echangeables:(méthode Bower Ariana).

Analyse diffractométrique sur sol non fractionné:

20-40: quartz, calcite, dolomite, un peu de gypse.

40-60: quartz, gypse important, calcite, dolomite.

sur fraction argileuse inférieure à 2 µ.

20-40: calcite importante, un peu de quartz, petite raie à 2,89 (dolomite) avec traces d'ankérite. L'illite se manifeste par un pic large, dénotant une argile mal cristallisée avec la présence d'une argile interstratifiée, (au chauffage le pic à 10 Å est plus symétrique, et on note la présence d'un pic vers 13,5 Å). Traces de smectite et de kaolinite,

40-60: calcite importante, un peu de quartz, petite raie à 2,89 (dolomite), traces d'ankérite. L'illite se manifeste également par un pic large, légèrement dédoublé, indiquant la présence d'un minéral interstratifié. Au chauffage le pic à 10 Å est un peu plus étroit avec un pic large entre 10,5 et 14. Traces de smectite, et de kaolinite.

CEM: étalonnage

B.1- Etalonnage sur la parcelle MB.

prof.	ø60	CEcin	ø60	CEcin	ø60	CEcin	ø60	CEcin
0-20	23,1	1,8	13,8	3,4	21,7	6,6	19,2	2,7
20-40	19,8	2,7	15,2	3,3	14,0	3,0	22,0	3,1
40-60	20,6	2,9	16,8	3,1	14,5	3,0	22,3	3,0
60-80	21,4	3,0	20,0	3,2	26,1	3,9	25,5	3,4
90-100	27,4	3,1	25,4	3,2	25,3	3,9	28,7	3,6
100-120	26,4	3,3	22,2	3,1	23,7	3,9	27,9	3,7
CEV/CEH	165 /	115	155 /	115	200 /	235	250 /	170
moy-120	23,2	2,82	19,2	3,20	21,0	4,05	23,2	3,3
nappe	non	-	:	:	:	:	160cm	n°69
parcelle	mbk	centre	mbk	bord	mbk	chemin	mbk	chemi
num:date	G12	- Dec 89	G13	- Dec 89	G14	- Dec 89	G15	- Dec 89

prof.	ø60	CEdix	ø60	ø60	CEcin	ø60	CEcin
0-20	23,8	2,06	11,3	23,2	4,1	20,5	2,5
20-40	22,9	2,80	12,5	16,8	2,9	21,5	2,5
40-60	25,4	2,76	14,4	18,9	3,0	25,1	2,9
60-80.	25,3	2,73	18,5	33,0	2,7	26,3	3,4
80-100	27,7	2,72	21,4	31,0	2,7	22,6	3,4
100-120			21,3	31,0	2,7	24,2	3,0
CEV/CEH	320 /	305	177/135	175 /	120	165 /	110
moy-120	25	2.63	16.5	25,6	3,02	23,3	2,95
date	20/05/90		05/10/90	12/11/90		28/02/91	
num	MBM		S05	MBN90		MB91	

B.2- Etalonnage sur la parcelle GL.

prof.	ø60	CEcin	ø60	CEcin	ø60	CEcin	ø60	CEcin	CEsat
0-20	28	2,90	11,5		21,9	4,6	12,2	2,0	8,5
20-40	26	2,68	21,7		24,7	3,4	20,1	2,8	7,7
40-60	26	3,13	24,3		22,3	3,7	23,2	3,0	6,7
60-80			27,2	7,3	27,6	4,2	23,7	2,9	3,1
80-100	25	3,05	23,7	7,2	27,5	4,6	20,7	3,6	3,1
100-120	26	3,42	19,2	5,9	27,1	4,4	22,6	3,7	8,3
120-140	26	3,20							
140-160	29	3,00			29,8	3,2			
190-200	30	2,90							
CEV/CEH	165 /	150	150 /	350	420 /	300	210 /	160	
moy-120	26,2:	3,0	20,4 :		25,0 :	4,2	21 :	3,0 :	6,2
moy-200	27,3:	3,0	-	-	-	-	-	-	-
nappe	2 m:	E7	-	-	160cm	n°22	-	-	-
parcelle	Gley		Gley	chemin	Gley	segua	centre		
num	GUE2	08/89	G21	12/89	G22	12/89	GLM		05/90

CEM: étalonnage

B.3- Etalonnage sur les parcelles FH et SLH.

prof.	ø60	CEcin	ø60	CEdix	ø60	CEcin	ø60	CEcin
0-20	15	1,1	13	0,5	31	2,3	22	2,1
20-40	14	2,3	18	0,9	28	2,6	16	2,7
40-60	14	2,4	19	1,8	26	2,0	18	2,9
60-80	16	2,5	20	1,9	26	2,4	20	3,1
80-100	21	2,5	23	2,3	23	2,8	23	3,6
100-120	24	2,5	24	2,4	28	3,0	25	3,6
CEV/CEH	78 / 48		170/ 140		174/ 127		141/ 92	
moy-120	17,3	2,2	19,5	1,63	27,5	2,5	20,7	3,0
nappe	E5		140 cm		puits 230			
date	08/89		05/90		10/90		12/11/90	
num	GUE6 nap:E5		SCOR		SCOR		EHN90	

prof.	ø60	CEcin	ø60	CaCO3	ø60
0-20	15	1,1	11,3	23	12
20-40	4	1,25	10,5	21	12
40-60	4	0,72	9,3	40	14
60-80	6	2,39	9,1	30	16
80-100	7	4,05	9,7	35	20
100-120	7	2,46	8,8	13	18
CEV/CEH	38/23		57/38		
moy-120	5	2	9,8	27	15,3
nappe	> 5 m		> 5m		>5m
date			12/11/90		
num	GUE7 08/89		FHN90		FHN91

B.4- Etalonnage par rapport au gypse.

prof.	ø60	CEcn	CEdx	CEst	Gypp	ø60*	CEcn	CEdx	CEst	Gypp
0-20	15	0,78	1,56	3,4	3	15	0,58	0,31	2,9	2
20-40	14	1,96	1,80	4,4	10	15	1,26	1,43	3,7	14
40-60	14	2,08	1,91	5,3	14	19	2,61	2,50	6,2	14
60-80	13	2,20	2,13	5,6	11	11	1,95	1,43	4,5	8
80-100	16	2,26	2,34		14	16	2,34	1,73	5,5	6
100-120	15	2,99	2,43	7,4	15	16	2,30	1,56	6,0	6
moyenne	14,	2,14	14,5	5,2	11	15,3	1,84	1,49	4,8	8
CEM	80/50					110/70				
date	02/90					02/90				
num	MAR1(Lelat)-L463-68					SID1 (Lelat)				

prf	ø60	Gypp	CEdx	CEst	ø60*	Gyp	CEs*	CEcn	ø60*	CEst	pH
0-20	21	43	3,1	7,1	27	13	8,9	3,0	14	3,3	
20-40	16	56	2,6	7,1	23	22	13,3	2,7	15	3,8	
40-60	18	51	3,6	11,6	21	43	14,2	2,9	17	4,5	
60-80	16	80	3,4	11,6	16	51	11,9	3,1	24	6,0	
80-100	19	70	2,5		15	58		3,1	20	3,9	
100-120	20	69	3,4	14,2			4,9	3,7	29	3,9	
moy	19	48	3,1	10,8	20	37		3,1	16	4,2	
CEM	156/93					189/136					76/50
num	M B ALI * MBA91**					ABB91 2st janv91					INC91 janv91

prof.	ø60	CEst	Gypp	Gypp	Sat%	pF 2,7-4,2
0-20	3,5	3,0	5	6	55	28 16
20-40	3,5	3,6	10	9	50	25 13
40-60	7,2	3,0	8	7	45	26 12
60-80	14	3,4	8	19	52	29 17
80-100	24	4,7	31	40	55	31 8
100-120	21	7,0	45	23	55	
moyenne	12,2	4,1	18	17	52	28 13*
CEM	78/52					
num	19 M			05/90		

B.6.3-Paramètre de référence: fortes salures.

CEM: étalonnage

prof.	Ø60	CEcn	CEdx	Cest	Gyp	pH	Ø60*	CEcn	CEst	Gyp
0-20	20	1,91	1,34	3,5	4	8,1	17	1,52	4,7	4
20-40	17	1,91	1,73	2,8	14	8,1	17	2,08	4,1	6
40-60	19	2,34	1,91	3,1	18	8,1	17	2,43	3,3	16
60-80	17	2,60	2,08	7,2	14	8,2	17	2,52	3,8	13
80-100	19	2,26	1,65	3,4	14	8,2	15	2,26	4,5	9
100-120	20	2,78	1,91	9,0	18	8,2	17	1,65	4,9	5
moyenne	18,6	2,03	1,77	4,8	14	8,15	17	2,08	4,2	9
lieu	Au dessus voie ferrée			Chemin Lelat						
prop.				M. Gadmi						
date	02/90			02/90						
CEM	58/45			66/50						
num	GARE 11			GAD1						

prf	Ø60	Gypn	Gypc	Calt	Ø60*	CEdx
0-20	23,4	27	19	19	9	11,6
20-40	24,0	34	28	17	15	5,8
40-60	31,6	13	14	22	16	4,4
60-80	39,0	30	28	20	17	4,4
80-100	35,3	51		12	20	4,3
100-120			49	12	21	4,5
moyenne	30,7	31	28	17	16,3	5,8
lieu	Ch.n8- près du chott			Sqaq El Bel		
prop.	Sbida			Sans		
date	11/90			23/08/89		
CEM	281/248 nappe à 80 cm			510/420		
num	ASN7			GUE3		

prof.	Ø60	CEcn	CEdx	Cest	Gyps	pH	Ø60*	CEcn	CEdx	CEst	Gyp	pH
0-20	25	1,48	1,56	3,0	13	8,2	33	1,78	1,4	3,6	6	8,2
20-40	25	1,82	1,80	3,5	19	8,1	29	1,69	1,4	3,8	7	8,2
40-60	27	2,04	1,91	3,8	19	8,1	31	1,61	2,3	7,4	52	8,3
60-80	27	2,20	2,10	4,4	21	8,1	44	4,43	3,2	20,0	43	8,4
80-100	27	2,26		6,5	21	8,2	36	3,47	2,9	18,0	32	8,3
100-120	35	2,99		10,8	59	8,3						
moyenne	27,6	2,14		5,3	25		34,2	2,6	2,2	10,5	28	8,3
CEM	170/105			217/195 nappe Fev n°5								
num	02/90	(par. n°1) 2262A		02/90 2239A (par.n°8)								

B.5- Etalonnage sur sols très salés.

prof.	Ø60	Gyps	CEcn	CEst	Ø60*	GYPp	CEs*	CEcn	Ø60	CEst	CEcn
0-20	14,2	5	3,49		29,1				19,5	60	9,7
20-40	8,6	3	2,42	12,0	24,9	11			18,8	32	4,9
40-60	21,6	7	3,04	13,9	18,0	57			19,4	37	6,1
60-80	25,4	10	3,58	12,9	29,6	25	25	4,61	20,7	28	5,3
80-100	26,4	25	3,49	11,1	31,2	45	20	0,69	19,8	19	3,2
100-120	22,3	3	3,13	7,9		61	17	0,16	14,9		
moyenne	19,7	9	3,2	11,6	26,6	40			18,9	29	4,8
CEM	205/185		100m est S1		377/352		100m ssoET1		345/445 S1-ET1		
num	ET190		29/11/90		ET290		29/11/90		ET390 29/11/90*		

* Gypse 6% tout le long du profil.

prof.	Ø60	Gyps	CEcn	CEst	Ø60	GYPp	CEs	CEcn	Ø60	GYPp	CEcn	
0-20	20,9	-	5,4		18,5	10	14,3	7,69	26,2	12	3,51	
20-40	22,0	8	5,0	17,6	17,9	6	12,5	3,76	23,9	10	3,97	
40-60	20,7	12	4,1		22,6	14	11,6	3,44	29,0	14	4,11	
60-80	21,0	8	4,0	18,5	24,7	11	25,0	4,48	29,5	15	4,80	
80-100	20,5	46	3,8	16,6	24,0		7,9	2,82	33,0	15	4,30	
100-120	30,8	49	3,8		25,0	13	7,6	2,68	37,5	16	3,97	
moyenne	23	25	4,3	17,6	22,1	11	13,5	4,14	30,0	12	4,11	
CEM	339 /304 Sud Est de MBM			270/230 Abd B. Ali								
num	ET490 29/11/90			ET590 29/11/90								
				306/260								
				ET690								

*irrigué le 19/10/90. * Bechir Ben Belgacem Bel Haj.

prof.	Ø60	GYPc	CEcn	Ø60*	CEst	Ø60*	Gyp
0-20	28,7	16	2,86	29,4	26,8	28,2	
20-40	19,1	11	2,95	32,1	17,8	31,8	
40-60	36,0	26	3,78	31,2	19,7	31,6	
60-80	28,5	11	4,24	19,3	17,0	28,6	
80-100	32,2	17	4,24	27,3		31,3	36
100-120	24,7	42	3,78	43,4	21,5	38,5	40
moyenne	28,2		3,12	30,5		31,6	
CEM	412/426		458/452		830/450 Sud		
num	ET790 19/11/90		ET890		ET990 G4-89		

C- CARACTERISTIQUES DES PUIITS ET DE LA NAPPE PHREATIQUE.

C.1.- Caractéristiques et localisation (Ben Marzouk 1982).

num	nom du propriétaire	x	y	cote	prof
157	M. SAAD	-2250	4100	241.01	8.80
158	TOUMI B A	-900	3150		
160	TAIEB B.AMOR B.TAHAR & Fr	400	3700		15.5°
163	GHOUIL B SALAH	550	3500		
182	SBOUI B LITEIM	800	4100	233.26	9.25
164	ABD B SALAH (Lortess)	1000	3700	250.40	3.2°
185	PUBLIC	1400	3900		
167	MESSAOUD & Fils MAB	1500	3700	229.75	4.15
169	HAJ BRAHIM EL AMMAMI n°1	1700	3000		
172	A B SLIMANE	2200	3200	228.24	
173	SALAH B A B OUNIS	3250	3250		
175	TAHAR B A B TAHAR	3400	3100		
178	YOUSSEF B MABROUK	3700	3250		
190	M TAHAR B HAJ	4100	3150		
198	TAIEB BOUCHOUCHA	4700	2800		
200	ABD B A	1451	5300	227.36	5.20
201	CHEIKH CHAABANE	5500	3000		

C.2.- Analyses chimiques en 1978 et 1990 sur les puits.

Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	Σca	Σan	CE	Ann	Num
33.0	29.8	49.0	5.5	48.0		3.30	117	116	8		157
23.8	24.8	17.0	0.4	46.5	16.0	2.75	66	65	5.00		158
19.6	29.0	15.0	0.5	45.0	16.0	2.40	64	63	5.00	1978	160
26.6	19.0	23.1	1.4	13.3	48.0	9.90	70	72	6.4	1990	
22.6	31.6	35.0	0.7	64.5	23.0	2.05	89	89	7.04		163
16.8	23.2	9.7	0.4	36.5	14.0	2.70	50	53	4.07	1978	182
18.0	18.0	13.9	0.3	14.5	30.0	7.00	50	50	4.10	1990	
24.8	30.4	20.5	0.7	57.0	20.0	2.65	76	80	5.85	1978	164
24.1	39.0	27.8	0.4	32.0	53.0	7.00	91	93	6.20	1990	
20.8	21.6	13.7	0.7	43.5	12.0	2.80	56	58	4.55	1978	185
22.0	50.0	72.5	--	120	41.0	5.40	160	166	11.63		167
24.4	46.0	45.0	2.8	40.	29.0	9.00	118	124		1978	169
23.7	75.0	116	5.1	117	97	7.00	220	221	32.0	1990	?
21.6	25.6	30.0	0.8	59.	19.0	4.20	77	83	6.11		172
24.8	40.8	32.5	1.8	61.	30.5	2.95	99	99	7.67		173
15.2	19.6	20.0	0.6	37.5	19.0	3.60	55	59	4.55		175
10.4	16.0	12.0	0.5	24.5	13.0	2.95	38	40	3.47		178
23.6	54.8	47.5	3.0	90.0	43.0	3.65	128	137	9.95		190
23.2	45.6	45.0	1.0	70.0	47.0	2.95	115	120	9.29		198
25.2	51.2	52.5	2.0	66.0	67.0	3.65	131	137	10.70		200
20.4	32.0	35.0	1.0	50.0	36.0	3.05	88	89	7.19		201
13	14	15.4	0.3	8.6	27.6	7.0	43	43		1978	PP2
12.3	13.0	14.7	0.3	16.1	17.6	7.0	40	41		1990	

C.3- Situation des puits analysés en 1990.

num	nom du propriétaire	Xm	Ym	cote	prof
1-CHT0291	M SADOK B MANSOUR (P)	3550	3550	229.00	chott
2-D73	S. LARBI HAMDA sud (P)	4250	3250	225.20	1.60
3-D93	Parcelle 23 SE gare (P)	3700	2800	229.70	1.60
4-ME1-ME1	(Ps)	-2200	5300	250.00	15.20
5-PI1-D17	ALI B NACEUR (Ps)	-2100	4400	231.00	9.00
6-PI11-D9	MAHM. B SAL. B YAH. (Ps)	-1600	4700	250.00	6.70
7-D15	(Ps)	100	4700	250.00	11.60
8-PI2-D24	MAHM. B SAL. B YAH (Ps)	-1800	4200	255.00	9.90
9-PI3-D42	ABDESSALEM MAIOUF (P)	-2600	4000	230.00	5.10
10-PI4-D12	(P)	-2700	4300	230.00	4.50
11-PT0-D23	HER OUL. BOUCHOUCHA (P)	2700	3200	220.33	
12-PT1	(P)	2800	3150	220.30	1.10
13-PT2	MAHM. B BELG B MAB. (P)	2800	3400	222.33	2.25
14-PT3	(P)	2950	4000	232.00	21.00
15-PT4	SALAH B. YOUNES (P)	2800	3800	227.00	7.00
16-R2-D48	(Ps)	5750	3350	237.61	11.00
17-R3-D47A	ROMDANE (Ps)	5700	3300	236.15	25.00
18-R5-D20	KHAL. B ABD MAZOUZ (Ps)	5700	3200	234.54	
19-R6-D30	(P)	5400	3000	231.81	6.00
20-R7-D70	(P)	5000	2250	229.50	8.20
21-T1-D26	Al. B CHAF. B HAJ MEK. (P)	1550	3900	228.72	10.25
22-T2-D113	SAHBI TAHAR (Ps)	1750	4250	236.00	21.00
23-T3-D58	SGHIR DHOUIOU (P)	1750	3800	223.31	2.70
24-T4-D34	ABDALLAH B REZGUI (P)	1550	3700	221.00	1.90
25-T5-D44	OULED BRAHIM (P)	1250	3730	222.67	2.10
26-T8-D25	HER HAJ AMAMI TLILI (P)	500	3730	225.00	
27-U1-D95	YOUNES B RZALA (P)	4400	2500	224.60	6.00
28-U2-D36	CHEIKH CHAABANE (Ps)	4400	2650	227.80	6.00
29-U3-D11	BRAHIM REZGUI (P)	4800	2500	228.50	6.80
30-U4-D38	(P)	4500	1800	220.00	4.50
31-U5-D13	BELGACEM MOUSSA (P)	4600	1900	220.00	5.50
32-U6-D40	EL ARBI AMOR (Ps)	4700	1800	221.00	7.20
33-U7-D76	HASSEN ALAYA (P)	4600	1700	220.50	5.00
34-U8-D119	(Pa)	4400	1900	220.00	1.50
35-U9-D87	ABDALLAH MAZOUZI (Pa)	4000	3000	222.40	1.80
36-U10-D92	M MORRI (Serv) (Ps)	4100	3200	223.00	2.20
37-U11-D14	HEDI B MEKKI (P)	3900	3550	226.11	6.00
38-W1-D92	HMAIMA RABECH (P)	3250	3300	226.70	7.50
39-W2-D103	(CHOTT POLLUE)	3250	3200	221.50	
40-W3-D45	ALI GATTOUS (P)	2900	3350	222.70	2.50
41-W4-D127	CH. AOUITA GATTOUS (P)	3100	3250	221.50	1.80
42-W6-D19	M B MANSOUR (P)	3350	3100	221.32	1.80
43-W7-D14	M B ALI B SOUSSI: (P)	3400	2800	220.61	P2
44-W8-D115	(GYPSE 3 m) (P)	3900	3300	222.91	5.20
45-W9-D104	(MECANO) (P)	3250	3700	227.20	18.00
46-Y1-D96	SALAH DHOUIOU (AGR) (P)	1700	3600	223.56	3.30
47-Y2-Y2	AM. B HAMD DHOUIOU (P)	1800	3500	221.38	
48-Z3-D37	(P)	4200	3250	225.29	
49-Z4-2366	Puits 107 (Gare) (P)	3850	3100	221.75	2.20
50-Z2-D102	Nord Oued El Abiad (P)	-2400	5000	240.00	22.00
51-P300	Bir Tlili (mioplio.) (P)				2.75
52-P97	M. B. MANSOUR KACHMI ()				10.25
53-P102	BELG. B. ALI MOUAMER (P)				
54-P177	ABACHA GATTOUS (P)				15.00
55-U12D108	M. SAD. B. MANSOUR (P)	3550	3550	220.00	
56-SLH	SAAD LARBI HAMDA Ouest	4200	3100	225.20	

C.4- Analyse des puits en 1990.

N°	Ca	Mg	K	Na	ECA	ANI	Cl	SO4	HCO3	Ce
1	23.0	75.0	0.94	75.0	174	174	72.0	94.0	8.0	14.80
2	24.0	180.	1.86	139	345	339	160	170.0	9.0	20.10
3	14.0	170.	1.02	93.0	278	285	120	148.0	17.0	16.10
4	25.0	27.0	0.47	14.3	67	68	22.0	41.0	5.0	4.80
5	20.5	21.0	0.18	12.8	54	54	13.5	35.5	5.0	4.20
6	30.0	36.0	0.33	32.0	98	97	40.0	53.5	4.0	7.90
7	22.4	21.0	0.20	19.2	63	64	17.7	41.1	5.0	4.70
8	19.0	21.0	0.16	15.0	55	54	13.0	36.0	5.0	4.20
9	24.0	42.0	0.24	71.0	137	135	66.0	61.0	8.0	10.30
10	22.0	41.0	0.24	71.0	134	137	60.0	69.0	8.0	10.30
16	35.2	27.0	0.81	36.1	99	101	49.0	44.0	8.0	8.40
17	21.1	6.0	0.85	12.8	41	41	10.9	26.6	4.0	3.80
18	12.5	15.0	0.26	13.5	41	41	14.4	22.1	5.0	3.50
19	23.0	100.	3.25	126	252	254	6.0	144	104.	19.2
20	27.8	80.0	1.19	83.0	192	192	108.	74.0	10.0	15.20
21	34.0	37.0	0.90	35.0	107	109	59.0	45.0	5.0	8.40
22	11.5	13.0	0.43	8.6	34	34	9.8	20.1	4.0	2.80
23	26.5	165.	0.43	93.2	285	284	147	124	14.0	16.10
24	25.0	9	0.72	85.0	201	200	72.0	118	10.0	15.60
25	28.2	200.	1.74	111.	341	338	177	143	18.0	19.20
26	23.5	75.0	2.64	63.0	164	163	49.0	107	7.0	12.10
27	28.0	66.0	0.61	52.0	146	145	73.0	66.0	6.0	10.50
36	18.7	31.0	0.35	26.2	76	78	32.2	40.0	6.0	5.90
37	23.5	120.	3.80	121.	268	273	95.0	164	14.0	2.50
28	23.0	80.0	0.69	74.0	178	182	80.0	94.0	8.0	13.00
29	26.3	33.0	0.45	33.5	93	95	29.3	61.0	5.0	6.60
30	22.8	52.0	0.83	55.5	131	132	44.5	80.0	8.0	8.90
31	22.5	39.0	0.58	33.0	95	96	36.0	55.0	5.0	7.20
32	20.8	66.0	0.73	55.5	143	147	54.5	85.0	7.0	9.20
33	32.0	58.0	0.84	65.5	156	154	73.0	74.0	7.0	11.20
34	23.0	80.0	1.38	131.	235	240	144	85.0	11.0	19.70
35	23.3	125	1.51	97.5	247	249	117	115.	17.0	15.60
36	18.7	31	0.35	26.2	76	78	32.2	40.0	6.0	5.90
37	23.5	120	3.80	121	268	273	95.0	164.	14.0	2.50
38	24.5	56.0	0.57	30.2	111	114	49.0	59.0	6.0	7.30
39	46.0	22.	0.76	76.0	145	147	66.0	77.0	4.0	11.60
40	19.0	44.	0.41	38.0	101	105	40.0	59.0	6.0	7.50
41	16.3	31.	0.30	24.0	72	73	26.5	41.0	6.0	5.50
42	24.0	185	0.94	137.	347	341	160	159.0	22.0	
43	30.0	33.0	1.99	3.2	68	96	140	50.0	6.0	7.30
44	30.0	39.0	1.06	39.0	109	111	49.0	57.0	5.0	8.40
45	23.5	28.0	0.35	18.5	70	70	16.1	47.0	7.0	6.10
46	25.7	115.	0.58	70.5	212	212	80.5	119.0	13.0	12.10
47	23.6	56.0	0.60	38.4	119	119	49.0	62.6	7.0	7.90
48	23.0	200.	4.90	167.	395	377	160	215	1.6	
48	31.0	90.0	1.65	104.	226	231	105	118	8.0	
50	20.0	64.0	0.71	52.0	137	139	49.0	82.0	8.0	8.90
51	30.0	31	0.53	53.1	115	115	60.0	48.5	6.0	10.00
52	14.6	10.0	0.34	254	279	281	264	10.2	7.0	27.10
53	20.2	72.0	0.83	70.5	163	163	60.0	88.0	15.0	13.90
54	7.7	10.0	0.19	6.2	24.	25	4.8	13.3	7.0	2.40
55	23.0	75.0	0.94	75.0			72.0	93.9	8.0	14.80
57	23.8	150.	1.75	131.	306	308	144.	148	16.0	18.30

Puits et nappe phréatique

C.5- Evolution actuelle dans les puits.

n°	Ca	Mg	K	Na	Cl	SO ₄	bi	pH	CE		numero
Evolution chimique d'un puit de l'oasis au cours de l'année											
	46	160	2.6	134	144	164	23	7.1	19.0	pts	Hamda 08-89
	29	160	2.7	154	144	188	11	7.4	17.9		02-90
	31	150	2.4	139	144	153	18	7.4	19.0		HM 05-90
	31	145	2.7	134	106	194	18	7.2	18.9	npe	10-10-90
	26	60	1.0	44	40	71	9	7.5	9.7	P1	2087 11-89
	30	125	3.8	87	80	148	13	7.8	16.1	P2	11-89
	25	120	2.0	83	72	143	14	7.6	15.6	P3 *	11-89
	17	110	1.8	79	80	107	12	7.6	15.3	P107	11-89
	30	150	1.8	101	105	164	16	6.9	14.3	P107	02-90
Transec au niveau du chemin n°4 (Fig.) 11-01-91											
14	15	16	0.7	12	11	28	5	7.6	3.8	D7	PT3 21 mètres
15	31	60	0.5	44	29	100	6	7.1	9.2	D16	PT4 7
13	34	68	0.8	51	49	89	12	7.2	10.5	D8	PT2 2.25
12	24	27	0.5	35	36	44	7	7.2	7.8	D46	PT1 1.10
11	28	110	1.6	116	95	150	10	7.7	18.0	D23	PT0 0.70
Puits prélevés en 1991											
	30	31	0.5	53	60	48	6	7.9	10.0	P300	02-91
	26	27	0.2	26	22	52	6	7.5	6.1	P201	" "
	10	14	0.3	12	10	23	5	7.5	3.3	P196	" "
	15	10	0.3	254	264	10	7	7.4	27.1	P97	" "
	12	13	-	-	16	18	7	7.9	3.9	P185	-1 " "
	20	72	0.8	70	60	88	15	7.8	13.9	P102	" "
	30	125	3.2	87	80	148	13		16.1	pts	2366 12-02-90
	211	54	1.1	41	40	64	10	7.1	8.3		face MB 08/89
	17	9	0.3	5	8	20	4	7.5	2.5	P52	Ch. O. Lortès
	23	100	1.2	60	44	129	11	7.7	11.3	P6a	
	21	20	0.2	17	21	32	6	7.9	4.0	P192	
	15	26	0.4	27	32	32	7	7.7	4.8	P7a	Nechiou 25 m

Tab.C.5- Concentrations (mg/l) et Conductivité électrique (mS/cm)

C.6- Analyse chimique de la nappe dans les parcelles témoins.

N°	Ca	Mg	K	Na	Cl	SO ₄	HCO ₃	pH	Ce
Nappe de Mr. GLEY AHMED									
GLEY	21	60	4.2	106	70	137	8.0		14.8
12-89	33	95	4.9	378	151	100	10.0	7.5	20.8
08-89	39	120	5.8	123	144	128	16	7.2	16.1
Nappe de Mr. MABROUK X=4100 Y=3000/223.07/ 1.80m									
MAB1 (D63)	25	205	2.8	190	217	188	0.2		20.6
6/06/89	31	200	3.8	171	160	221	20	7.3	26.9
E7 6/08/89	39	120	5.8	123	144	128	16	7.2	16.1
Nappe de la parcelle 2366									
2366-91	25	360	3.7	223	265	327	30		32.2
6/12/89	17	165	3.2	126	118	179	14	8.0	20.8
Nappe de parcelles diverses									
D116-P190	27	140	1.6	123	106	170	9	7.7	16.3
TIN1 -05-90	36	145	0.7	106	144	124	17	7.1	17.5
2243 02-90 (7)	27	150	2.7	123	130	160	10	7.3	15.2
N. TALEB* NO1-NO	38	29	0.7	70	60	75	4.0		11.2

Tab.C.6- Analyses chimiques de quelques nappes en 1990
* x=1700 y=3400 cote:220,41

D.1- Salure vraie et salure apparente globale.

prof.	e60	Gp	CEci	e60	Gp	CEci	CEdx	CEcn	θ	Gp	CEcn	
0-20	14,8	5	5,91	19,4	6	2,4	18,8	9,97	17,5	9	9,2	
20-40	13,9	3	5,08	18,5	4	2,0	17,1	6,10	16,9	3	8,2	
40-60	15,1	5	5,03	24,0	6	2,2	17,9	4,06	15,9	5	6,9	
60-80	18,0	10	5,54	19,1	7	1,9	14,2	3,32	19,4	14	6,5	
80-100	24,1	13	5,63	22,2	17	2,3	23,5	3,64	22,0	20	6,27	
100-120	26,0	12	5,17	23,4	27	2,7	15,5	4,80	23,3	27	-	
moyenne	18,6	8	5,4	20,6			17,8	5,30	19,2		7,04	
CEM	335/342			119/93			301/374			415/415		
num	RGET1			RGET2			RGET3			RGET4		

prof.	e60	Gp	CEci	e60	Gp	CEci	CEdx	Gp	CEcn	θ	Gp	CEcn
0-20	20,6	6	8,5	27,0	3	2,08	18,5	7	8,77	23,7	28	
20-40	13,2	5	5,45	21,2	3	2,21	13,2	2	3,14	21,0	5	9,69
40-60	13,3	7	4,20	20,8	7	2,45	16,9	70	3,14	21,4	13	8,30
60-80	16,1	7	4,25	15,5	3	7,38	16,1	6	3,05			27
80-100	22,9	11	4,30	16,9	2	6,92	12,4	2	2,35	23,8	10	7,69
100-120	-	-	-	25,0	14	-	28,2	17	4,52	24,2	6	6,44
moyenne	17,2		5,3	20,3		4,21	17,5		4,16	22,8		
CEM	340/454			125/107			372/487			463/540		
num	SGET1 29no90			SGET2			SGET3			SGET4		

prf	θ	Gp	CEc	CEs	θ	Gp	CEc	CEs	θ	Gp	CEc	CEs	θ	Gp	CEc	CEs
20	16	40	7,3	40	18	7	2,5	7,9	16	8	40	20	8	8,1	45	
40		36	6,7	36	21	8	2,6	7,8	15	5	36	19	4	8,5	48	
60	14	33	6,3	33	20	5	2,6	8,8	20	4	2	23	21	5	8,2	46
80	12	28	5,5	28	17	4	2,5	7,9	20	7	3	18	31	16	9,0	51
100	24	18	4,1	18	19	1	2,3	7,0	20				20	13	7,8	43
120	25	13	3,2	13	20	8	2,2	6,0	-	10	18		22	18	6,9	37
moy	18	41														
CEM	302/322				108/79				327/416				460/470			
num	S1B90		10dec90		S2B90		S3B90		S4B90		S5B90		S6B90			

E.1- Modelisation des profils salins.

En pratique, en prenant des sols ayant un profil hydrique compris entre 18 et 22% (pondéral) entre 0 et 200 cm, et en mesurant le rapport $r = CEV(20)/CEH(20)$, on remarque que la relation (15) page 44 surestime le rapport $CEst_{(60-120)}/Cest_{(0-60)}$.

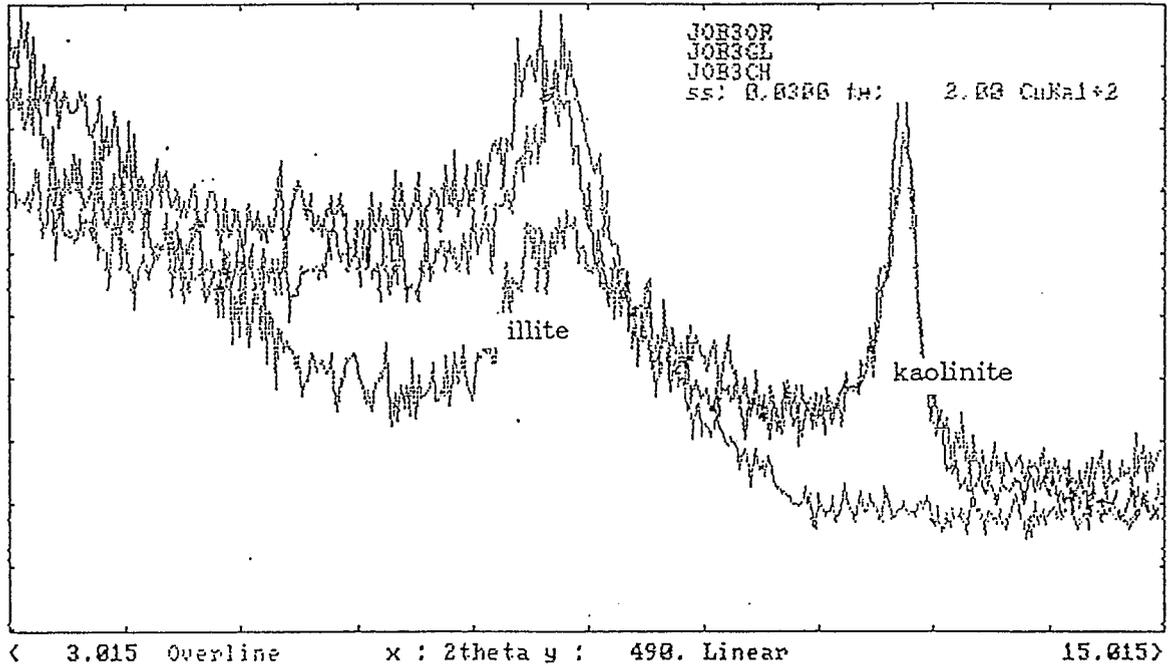
Autrement dit, le gradient de salure avec la profondeur est moins important en pratique que la mesure de r ne le prévoit. Pour des valeurs de r comprises entre 0,8 et 1,5 on trouve sur cinq profils:

$$CEst_{(60-120)}/Cest_{(0-60)} = 0,67 CEV(20)/CEH(20) + 0,2 \quad r=0,990$$

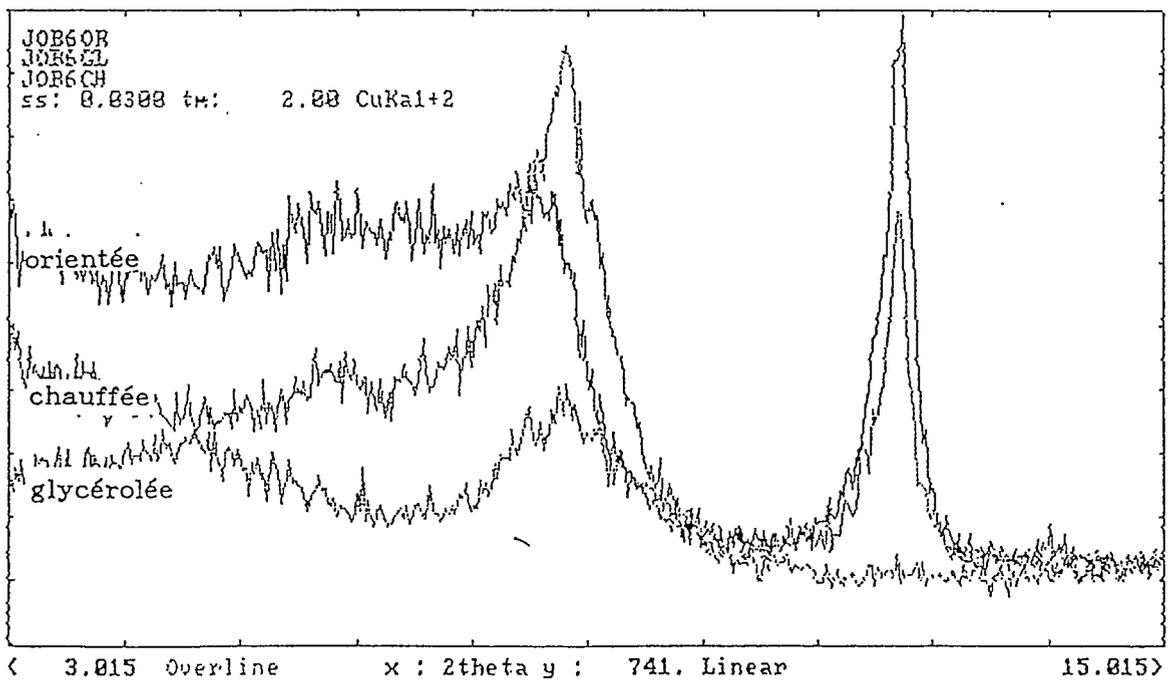
Cette relation n'est valable que parce que l'humidité est constante le long du profil.

Nous faisons actuellement des recherches pour modéliser l'allure du profil quelle que soit l'humidité des horizons 0-60 et 60-120 cm, en particulier dans le cas, fréquent en milieu aride, où $\theta_{(60-120)} > \theta_{(0-60)}$.

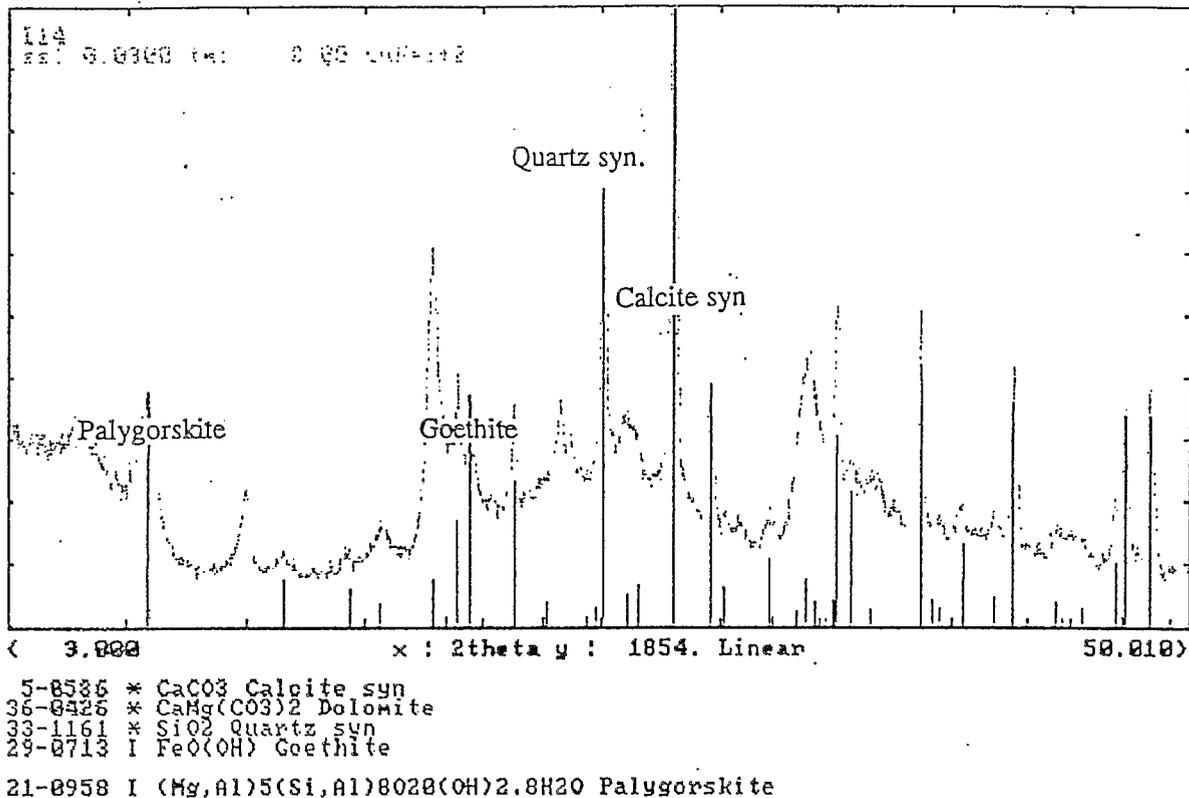
F.1- Diagramme de rayons X de sol de chott vierge.



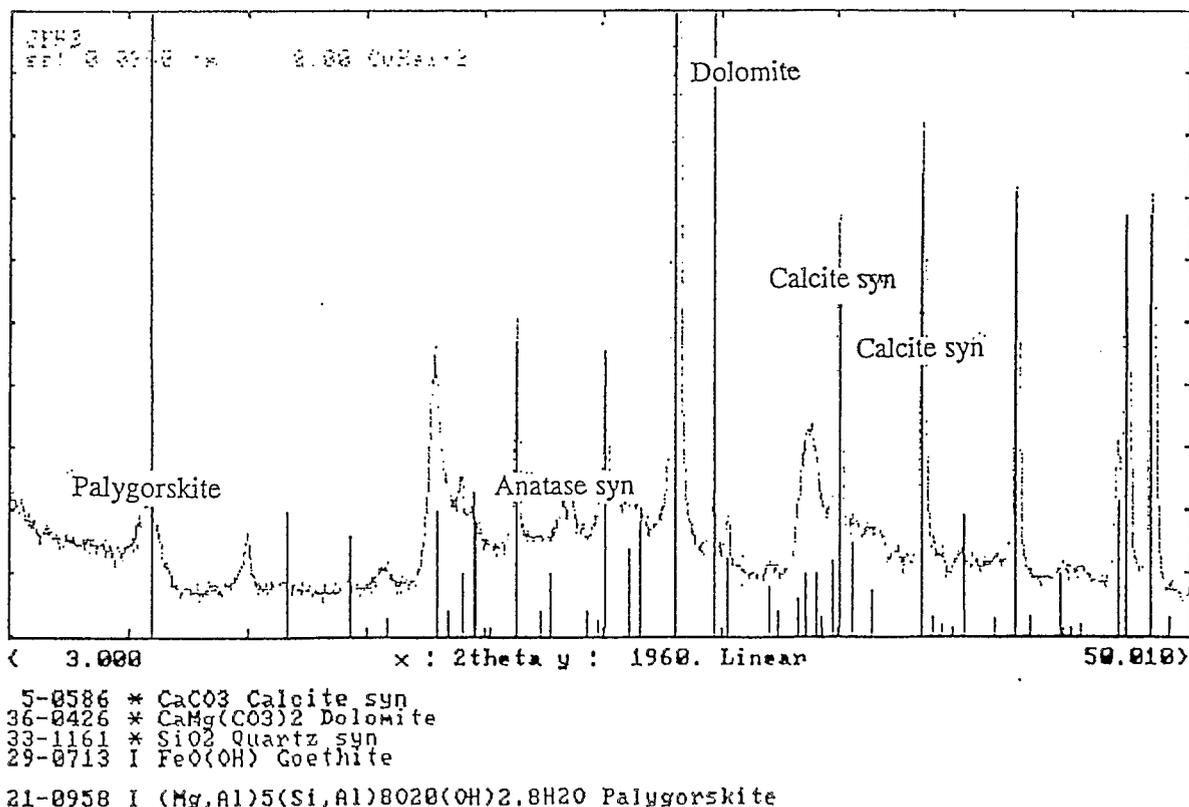
F.2- Diagramme de rayons X de sol de chott cultivé.



F.3- Diagramme de rayons X de sol d'oasis.



F.4- Diagramme de rayons X de sol d'amont d'oasis.



G.1- Calcul des activités.

Le Programme Bilion (écrit en Pascal pour PC), permet, entre autres, de calculer les activités de ions appariés d'une solution par la procédure suivante:

G.1.1- Les constantes de dissociation utilisées sont celles du Tableau G.1:

Paire	référence	k	Paire	référence	k
CaSO ₄ [°]	(1)	4,90.10 ⁻²	MgSO ₄ [°]	(2)	5,9 .10 ⁻³
CaHCO ₃ ⁺	(2)	5,50.10 ⁻²	MgHCO ₃ ⁺	(2)	6,9 .10 ⁻²
CaCO ₃ [°]	(3)	1,13.10 ⁻⁸	MgCO ₃ [°]	(2)	4,0 .10 ⁻⁴
NaCO ₃ ⁻	(2)	5,35.10 ⁻²	NaSO ₄ ⁻	(2)	2,4 .10 ⁻¹
NaHCO ₃ [°]	(2)	1,78	KSO ₄ ⁻	(2)	1,1 .10 ⁻¹

Tab.G.1- Constantes de dissociation des principaux ions appariés en solution.

- (1) Bell et George, 1953 *in* Tanji (1969),
- (2) Adams, 1971
- (3) Suarez, 1977 *in* Robbins et Wagenet (1980),

G.1.2- Calcul des activités.

Le calcul des activités est d'abord fait avec la formule de Debye-Hückel si la conductivité électrique est inférieure à 2 dS.m⁻¹ ou celle de Davies pour les conductivités supérieures, avec les notations suivantes:

- [Ion(0)] = concentration analytique Ion en mmol.l⁻¹.
 [Ion(n)] = concentration de l'espèce Ion calculée après n itérations.
 {Ion} = activité de l'ion Ca
 Z_i = valence de l'ion i.
 I = force ionique de la solution en mmol.l⁻¹
 f_i = coefficient d'activité de l'ion i en solution.
 b = 0,329 (Robinson et Stokes, 1959).
 a = 1,5115 à 25°C coefficient de Debye-Hückel.
 a_i = rayon ionique de l'ion i (d'après Kielland, 1937).

On calcule la force ionique: $I(0) = 0.5 * \sum Z_i^2 \cdot C_i(0)$

puis $\log f_i = -aZ^2\sqrt{I}/(1+ba_i\sqrt{I})$ quand $E_c < 2 \text{ dSm}^{-1}$

et $\log f_i = -aZ^2\sqrt{I}/(1+\sqrt{I}) - 0,3*I$ quand $E_c > 2 \text{ dSm}^{-1}$ (Davies, *in* Stumm et Morgan, 1981, p:135)

Le calcul des activités de chaque ion est alors possible:

$$\{Ca(1)\} = f_{ca} * [Ca(0)], \quad \{Mg(1)\} = f_{mg} * [Mg(0)], \quad \text{etc,}$$

Puis on calcule une première fois la concentration de chacun des ions appariés:

$$CaSO_4(1)^\circ = 0,204 * \{CA(1)\} * \{SO_4(1)\} \quad CaHCO_3^- = 0,0182 * \{CA(1)\} * \{SO_4(1)\}$$

On procède de la même manière pour les autres ions.

On en déduit la concentration des ions libres::

$$[\text{Ca}(1)] = [\text{Ca}(0)] - \text{CaSO}_4(1) - \text{CaHCO}_3^+(1) - \text{CaCO}_3^\circ(1)$$

On dispose alors d'une composition ionique de la solution corrigée une première fois des ions appariés. On recommence le processus en recalculant la nouvelle force ionique, en incluant tous les ions chargés, y compris les paires d'ions. Les itérations se poursuivent jusqu'à ce que:

$$(I_{(n)} - I_{(n-1)}) / I_{(n)} < 10^{-3}$$

A chaque étape du calcul, les conditions d'électroneutralité de la solution sont vérifiées et les concentrations recalculées en conséquence.

Ainsi les concentrations des ions appariés, le degré de saturation de la solution par rapport aux sels susceptibles de précipiter peuvent être calculés pour chaque point de la nappe pour lequel on dispose d'analyse.

Le programme que nous avons mis au point recalcule la conductivité des solutions à partir des ions libres en solution. En effet la mesure de la conductivité électrique est une des rares mesures fiables que l'on peut obtenir directement sur le terrain. Un usage constant en est fait à tous les niveaux de notre étude. Cependant il est connu qu'aux fortes conductivités (Grether et Bruttel 1975) une polarisation des électrodes se produit, la conductivité mesurée est alors sous-estimée. Nous avons donc fait la correction (JOB, 1985) basés sur le principe suivant:

A température et pression constantes, si $l_{i,0}$ est la conductivité équivalente limite (à dilution infinie) de l'ion i et si $l_{i,c}$ est la conductivité équivalente du même ion à la concentration c , on a (Job 1985):

$$CE_{\max} = \sum l_{i,0} \quad \text{et} \quad CE_{\min} = \sum l_{i,c}$$

La conductivité vraie de la solution est située entre ces deux valeurs.

les résultats sont présentés de la manière suivante:

- sur la première ligne les concentrations initiales,
- sur la deuxième les concentrations en ions libres,
- sur la troisième la composition en sels simples qui une fois dissous donnerait l'eau donnée. Ce dernier calcul est fait à partir des solubilités des différentes sels, indépendamment du calcul des activités (Adams, 1971),
- sur la quatrième et cinquième ligne, les activités des ions en solution, puis les concentrations en me.l^{-1} des ions appariés,
- puis dans l'encart du bas la conductivité expérimentale encadrée par les conductivités théoriques maximum et minimum. Un calcul présente aussi les conductivités calculées par la méthode des polynômes de Mc Neal et *al.*, 1970), mais ce calcul n'offre pas d'intérêt dans le cas présent.

Activités des ions appariés.

Echantillon N° 1	Force ionique : $I[n-1] = 0.656$ $I[n] = 0.662$								
Conc.init (me/l)	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	CO3	pH
	20.4	102	475	10	554	58	2.4	0.5	7.0
Ions libres	18.9	95.5	467	9.9	550	29	1.8	0.32	
Activités	1.5	7.4	348	7.4	409	2.5	0.25	0.02	
Paires (me/l)	NaSO4	MgSO4	CaSO4	NaHCO3	Na2CO3	KSO4	CaCO3		
	10.1	3.2	0.75	0.50	0.15	0.13	0.06		

Tab.G.2- Programme Bilion: présentation des résultats.
Exemple de l'eau de mer.

LEXIQUE

Chott:- Dépression où s'accumulent et s'évaporent les eaux de ruissellement en région aride. Les chotts sont habituellement très salés. Leur taille varie de quelques km² à 4500 km² pour le Chott El Jerid en Tunisie. Les chotts sont souvent alimentés également en eau douce (source, rivière pérenne..).

Foggara:- Galerie souterraine destinée à capter les eaux d'inferoflux des piemonts et les conduire à un exutoire pour l'irrigation, les bains etc...Les foggaras sont très nombreuses au Proche-Orient et à moindre titre en Afrique du Nord. Certaines, d'origine romaine, sont encore fonctionnelles.

Hermaïon:- Petit tas de pierres taillées en sphéroïdes de caractère religieux semble-il. Celui d'El Guettar est le plus ancien connu (40000 BP à peu près).

Jebel:- Montagne ou massif montagneux d'une certaine importance.

Jessours:- (litt: "les ponts"). Mur de pierre formant barrage en travers d'une pente ou d'un talweg. Ils sont destinés à accumuler les sols à leur amont et à empêcher leur entraînement par érosion hydrique. Ils comportent tous un pertuis d'écoulement dans leur partie centrale.

Levallois:- Technique de taille des silex qui suppose un facettage du nucléus préalablement à l'enlèvement des éclats. Les éclats et pointes Levallois ont ainsi une section pyramidale caractéristique.

Mesh'a:- Sorte de binette à manche court servant à retourner la terre.

Moquette:- Couche superficielle des sols fonctionnant en capillarité. La précipitation des cristaux de sels en surface des sols détruit la structure des argiles et produit un tapis caractéristique.

Mousterien:- Ensemble culturel du paléolithique moyen caractérisé par une industrie de taille de pointes de silex de formes et techniques très variées..

Nebka:- Petit amoncellement de hauteur décimétrique de sable ou de gypse éolien autour d'une touffe de végétation. Ce sont des formes géomorphologiques caractéristiques des bords de chott et de sebkha.

Sebkha:- Appellation réservée aux petites dépressions salées situées en aval des versants irrigués. Contrairement aux chotts, il n'y a pas d'alimentation interne en eau de source.

Terch:- Nom donné aux encroûtements gypseux de nappe dans le Sud tunisien.

Voile:- Fine couche de matériau éolien récemment déposé à la surface d'un sol.

Zokkar:- Pied mâle du palmier servant à la production de pollen utilisé pour la fécondation manuelle des inflorescences portées par les pieds femelles (voir dessin sur page de garde) qui a lieu entre mars et avril.

TABLE DES FIGURES

Page:	légende:
8	Fig.2.1- Situation d'El Guettar par rapport aux oasis Nord africains.
	Fig.2.2- El Guettar et les oasis du Sud tunisien.
9	Fig.2.3- L'oasis et le chott d' El Guettar au pied du Jebel Orbata (Landsat 2, du 29 mars 79)
	Fig.2.4- El Guettar: le chott inondé (image SPOT)
11	Fig.2.5- Pluviométrie moyenne annuelle des dix dernières années à Gafsa (mm).
12	Fig.2.6- Régime des vents actuels dans la région de Gafsa (FAO, 1965).
13	Fig.2.7- Insolation en moyenne annuelle et mensuelle moyenne (période: 1979-1989).
14	Fig.2.8- Ksar Ghilane: comparaison de deux paramètres dans l'oasis et hors oasis (Baldy, 1985).
16	Fig.2.9- ETP(Penman) journalières à Gafsa et Tozeur (100 km au sud-ouest de Gafsa).
17	Fig.2.10- a) Les contraintes géotechniques en Tunisie.b) Le système de failles et les oasis de la région de Gafsa.
	Fig.2.11- Failles au pied des Jebel Orbata et Chartat.
18	Fig.2.12- Position de l'oasis d'El Guettar par rapport aux formations géologiques.
	Fig.2.13- Géologie du bassin versant d'El Guettar.
19	Fig.2.14- Endoreisme du chott.
20	Fig.2.15- Le bassin versant d'El Guettar.
22	Fig.2.16- Coupe Est-Ouest de la bordure aval.
26	Fig.3.1- Système racinaire et nature du sol.
28	Fig.3.2- Calendrier cultural simplifié pour les principales cultures dans l'oasis d'El Guettar.
29	Fig.3.3- Le système des foggaras.
30	Fig.3.4- Morphologie des parcelles et topographie.
33	Fig.3.5- Localisation des parcelles enquêtées.
	Fig.3.6- Salure moyenne par strate pour un nombre n de parcelles.
	Fig.3.7- Utilisation des eaux dans 64 parcelles.
35	Fig.3.8a- L'oasis d'El Guettar en 1910.
	Fig.3.8b- L'oasis d'El Guettar en 1965.
	Fig.3.8c- L'oasis d'El Guettar en 1988.

Page:	légende:
40	Fig.4.1- Appareillage de mesure de CEM.
41	Fig.4.2- Principe de la mesure.
43	Fig.4.3- Graphe des équations (7) et (8).
	Fig.4.4- Graphe des équations (9) et (10).
47	Fig.4.5- Pratique des mesures sur le terrain.
49	Fig.4.6- Erreur d'estimation (résidus) dans le calcul de CEst à partir de CEcn (en dS.m ⁻¹).
50	Fig.4.7- Plan d'échantillonnage des sols et des puits.
51	Fig.4.8- Convergence des estimations du nombre d'arbres.
54	Fig.5.1- Coupe verticale schématique d'un profil de sol d'apport au niveau de la fouille du gisement moustériens.
55	Fig.5.2- Teneurs en gypse, carbonate de calcium, carbone organique et silice des sols de pente.
56	Fig.5.3- Distribution des sels à la surface du chott.
57	Fig.5.4- Diagrammes de diffraction X d'un sel prélevé en surface d'une parcelle de chott le 19 Nov.1991.
58	Fig.5.5- Surface du chott après une pluie de 10 mm. Tri des lentilles de gypse.
	Fig.5.6- Tri du gypse lenticulaire par les pluies. Schéma de la répartition verticale du gypse et du CaCO ₃ .
59	Fig.5.7- Evolution du profil de sol type de bordure dede chott de l'été à l'hiver.
60	Fig.5.8 Etats de surface testés par simulation de pluie.(salures du premier cm au 19 Nov.1990).
61	Fig.5.9- Concentration des ions appariés dans l'eau d'inondation du chott au cours de l'évaporation de Février 90 à Août 1991.
64	Fig.5.10- Situation topographique des profils analysés.
66	Fig.5.11- Distributions des particules de l'horizon gypseux de référence, comparées à des sables et gypses dunaires bien identifiés.
67	Fig.5.11a- Cristaux lenticulaires de l'horizon gypseux. Photographie MEB sur échantillon brut.
68	Fig.5.12- Composition isotopiques des eaux de forages et des fractions gypseuses des sols.
69	Fig.5.12a- Evolution des teneurs en ³⁴ S du sulfate océanique au cours du temps (in Pierre, 1986).
70	Fig.5.13- Diagrammes de rayons x: 1- éch.SLH: sol brut de l'horizon gypseux, 60-95 cm, culture sur trois strates.
72	Fig.5.14- Distribution des conductivités électriques de la nappe phréatique (dS.m-1).
	Fig.5.15a)- Distribution du rapport Ca/Mg en profondeur.
	Fig.15b)- Répartition des salures en profondeur.
73	Fig.15c)- rapports Ca/Mg dans la nappe phréatique.
75	Fig.5.16- Activités de Ca ⁺⁺ , Mg ⁺⁺ , SO ₄ ⁻⁻ dans la nappe en fonction de la force ionique et état du calcium en solution.
76	Fig.5.17- Concentrations des principaux ions appariés en fonction de la concentration de la nappe.
78	Fig.5.18- Répartition des sols dans le paysage.
79	Fig.5.19- Toposéquences Nord-Sud.

Page:	légende:
81	Fig.6.1- Caractéristiques physiques de l'horizon gypseux.
82	Fig.6.2- Composition des argiles de cimentation des particules de gypse.
83	Fig.6.3- Granulométries des horizons anthropisées comparées à celles de horizons sous-jacents.
84	Fig.6.4.- Exemple d'étagement des cultures dans l'oasis: parcelle cultivée sur trois strates
	Fig.6.5- Parcelle cultivée sur trois strates: profil pédologique type et profil salin caractéristique.
85	Fig.6.6- Description du profil de sol type et profil salin caractéristique des parcelles cultivées sur deux strates en bas d'oasis.
	Fig.6.7- Profil salin caractéristique des parcelles cultivées sur une seule strate.
86	Fig.6.8- Aménagement des parcelles pionnières.
	Fig.6.9- Profils salins caractéristiques des parcelles pionnières gagnées sur le chott.
87	Fig.6.10- Représentation schématique de la salure moyenne dans un espace à trois dimensions.
89	Fig.6.11- Analyse de variance de CEst sur les facteurs topographiques et sur les niveaux d'occupation du sol par les cultures.
90	Fig.6.12- Répartition de la salure dans tout l'oasis.
	Fig.6.13- Carte topographique de l'oasis.
91	Fig.6.14- Carte de répartition de la salure pour chaque occupation du sol.
	Fig.6.15- Variogrammes calculés dans la direction nord-sud pour les variables salure globale de 0 à 120 cm (Ces en dS.m^{-1}) et $r = \text{CEV}(20)/\text{CEH}(20)$.
92	Fig.6.16- Variogrammes directionnels de la salure globale.
96	Fig.7.1- Fluctuation de la nappe au cours de l'année 1879-1980 (d'après Ben Marzouk, 1982).
97	Fig.7.2- Localisation des points de mesure de variation de la qualité des eaux.
98	Fig.7.3- Variation des conductivités électriques de la nappe phréatique dans le temps.
	Fig.7.4- Variations du rapport Ca/Mg entre 1978 et 1991.
	Fig.7.5- Variations des concentrations en chlore entre 1978 et 1991.
	Fig.7.6- Variations des concentrations en sulfate entre 1978 et 1991.
99	Fig.7.7- Evolution de la salure globale apparente et du profil salin de la parcelle SLH.
101	Fig.7.8- Evolution de la salure et des profils salins de la parcelle MB.
102	Fig.7.9- Evolution de la salure et des profils salins de la parcelle GL
103	Fig.7.10- Evolution de la salure de la parcelle FH.
104	Fig.7.11- Utilisation de l'eau et salure des sols.
	Fig.7.12- Salure et profil salin des parcelles de l'oasis d'El Guettar.
107	Fig.8.1- Profil Ahmed Rezgui (AR), au cours du retrait des eaux du chott après l'inondation de février 1990.
108	Fig.8.2- Parcelle NT récupérées après inondation du chott.
	Fig.8.3- Réhabilitation de la parcelle NT.

LISTE DES EQUATIONS

page:	équation:	(n°)
p:10	$ETP = a_1(e_1 - e_2)^{k_1} + a_2 R^{k_2}$	(1)
p:14	$V_z = V_h \cdot e^{[s(z/h-1)]}$	(2)
p:41	$(H_s/H_p)_v = 2(9 - [9 + 9ys + 4(ys)^2 + (ys)^3]e^{-ys}) / (ys)^2$	(3)
	$(H_s/H_p)_h = 2[1 - 3(ys)^{-2} + [3 + 3ys + (ys)^2][e^{-ys} \cdot (ys)^{-2}]$	(4)
p:42	$\delta = (1/\pi f \mu_0 \sigma)^{1/2} = (2i)^{1/2}/y$	(5)
	$\sigma a = 4(H_s/H_p)^{-1} / 2\pi f \mu_0 s^2$	(6)
	$\Phi_{v(z)} = 4z / (4z^2 + 1)^{3/2}$	(7)
	$\Phi_{h(z)} = 2 - 4z / (4z^2 + 1)^{1/2}$	(8)
	$\int \Phi_{v(z)} dz = -1 / (4z^2 + 1)^{1/2} = R_h(z)$	(9)
	$\int \Phi_{h(z)} dz = 2z - (4z^2 + 1)^{1/2} = R_h(z)$	(10)
p:44	$CEV_t = I_2 \cdot S_1 + I_4 \cdot S_2$	(11)
	$CEH_t = I_1 \cdot S_1 + I_3 \cdot S_2$	(12)
	$I_1 = \int_0^{0,5} 4z \cdot dz / (4z^2 + 1)^{3/2}$	(13)
	$I_2 = \int_0^{0,5} (2 - 4z) dz / (4z^2 + 1)^{1/2}$	(14)

Equations.

$$S_2/S_1 = (r_1 - 0,5)/(1,2 - 0,7r_1) \quad (15)$$

p:45

$$\sigma_x/\sigma_1 = (\pi_0)_n \quad (16)$$

$$\sigma_x/\sigma_1 = 2\pi_0/(3 - \pi_0) \quad (17)$$

$$\sigma_x/\sigma_1 = f^2 \quad (18)$$

$$(\sigma_x - \sigma_s)/\sigma_1 = \theta(a\theta + b) \quad (19)$$

$$CEH(\theta p) = 70,3 * CEcn + 4,6 * \theta p - 136 \quad (20)$$

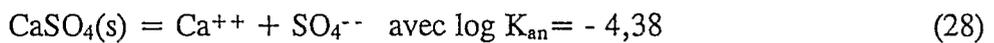
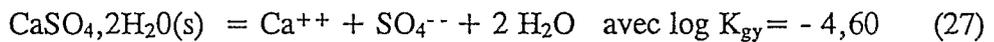
$$CEst = 0,094 * CEH(20) - 4,68 \quad (24)$$

p:65

$$2 - \phi = d \quad (25)$$

p:66

$$\delta = [(R_e/R_r) - 1] \cdot 10^3 \quad (26)$$



p:74

$$\log \{Ca^{++}\} + \log \{SO_4^{--}\} = -4,60 \quad (29)$$

p:75

$$U_i = U_i^\circ + RT \ln g_i \cdot X_i \quad (30)$$

$$PI = \{Ca\} * \{SO_4\} = g_i \cdot X_i \cdot K_{gy} \quad (31)$$

ISBN : 2-7099-1148-5
Éditions de l'ORSTOM
72, route d'Aulnay
93143 BONDY Cedex