

**MINISTERE DE L'AGRICULTURE
DIRECTION DES SOLS
Rue Hedi Karray
2049- Ariana**

**ORSTOM
Mission en Tunisie
BP 434
1004- El Menzah I**

CONVENTION DIRECTION DES SOLS/ORSTOM

**SUIVI DE LA SALURE DES PERIMETRES IRRIGUES DE TUNISIE
PAR CONDUCTIVIMETRIE ELECTROMAGNETIQUE**

(1989-1993)

RAPPORT FINAL

édité par: Mohamed Hachicha et Jean-Olivier Job

Tunis, le 19 Avril 1994



SUIVI DE LA SALURE DES PERIMETRES IRRIGUES DE TUNISIE

PAR CONDUCTIVIMETRIE ELECTROMAGNETIQUE

(1989-1993)

RAPPORT FINAL

Ont participé à ce programme:

Mrs les chefs d'Arrondissement des Sols des CRDA suivants:

- Ben Hassine Habib (Mahdia, puis Sfax),
- Ben Salem H. (OMVVM Tunis, puis CRDA de Zaghuan, puis CRDA de Bizerte),
- Bransia Mansour (Jendouba),
- Grira Mohamed (Kebili),
- Hammami Abdelkader (Nabeul),
- Maalej Fouad (Sfax puis Mahdia),
- Mohdi Mohamed (Kairouan),
- Merai Mohamed (Gafsa),
- Zantour Mohamed (Bizerte, puis Nabeul).

Mrs:

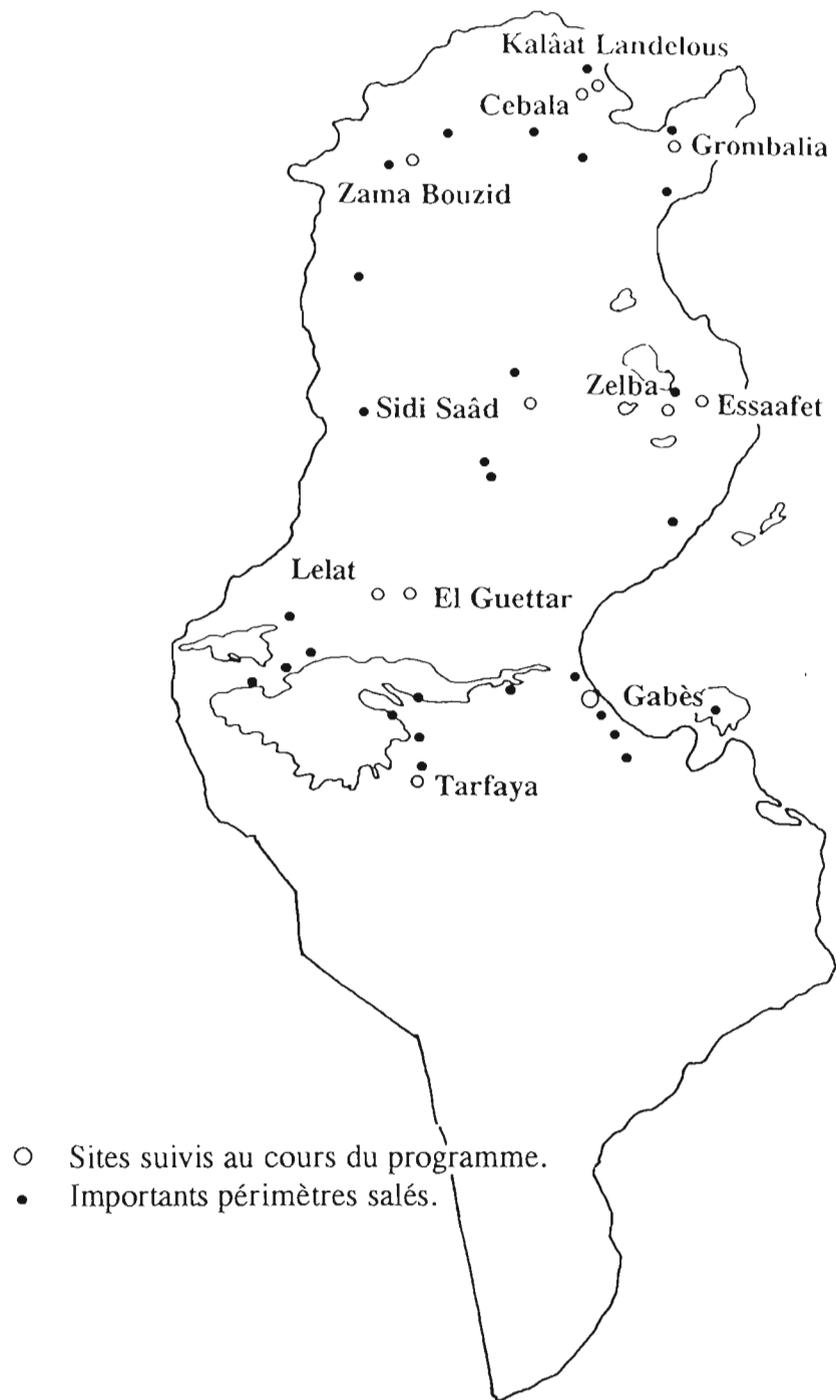
- Ben Smaïl A., Arrondissement des Sols de Zaghuan,
- Gharsallah N., Arrondissement des Sols de Mahdia,
- Hachemi, A., CRDA de Mahdia,
- Hajej S., chef du laboratoire des Sols, CRDA de Kairouan,
- Mahdaouani S., Arrondissement des Sols de Kairouan,
- Marrakchi A., Arrondissement des Ressources en Eau de Mahdia,
- Melki M., responsable du projet de rénovation des oasis de Gafsa, OMVG,
- Naceur H., vulgarisateur à El Guettar,
- Rézig M., arrondissement des Sols de Nabeul,
- Soussi Abdelhamid, Direction des Sols de Tunis,
- Trabelsi Abdelkader, Direction des Sols de Tunis,
- Zidi Chafiq, ingénieur de la Direction des Sols de Tunis.

Et, par leur intervention ponctuelle précieuse, Mrs:

- Boivin P., chercheur Orstom (centre de Dakar),
- Cheverry Cl., professeur à l'INRA, Rennes,
- Ennabli N., professeur à L'INAT, Tunis,
- Loyer J.Y., chercheur Orstom, mission Orstom au Mexique,
- Mhiri A., professeur à l'INAT (Tunis).
- Pedro Georges, Président de la Commission Scientifique Hydrologie-Pédologie de l'Orstom,
- Servat Emmanuel, Professeur à l'INRA, Montpellier,

Ainsi que Mrs Ahmed Souissi et Amor Mtimet, Directeurs des Sols pendant cette période, Mr. Salah Khalafallah Sous-Directeur et Mr. Bernard Dalmayrac, Représentant de l'Orstom en Tunisie, qui ont assuré la gestion financière et administrative de ce projet.

Que tous trouvent ici nos remerciements chaleureux.



Carte de situation des principaux périmètres irrigués faisant partie du programme de suivi de la salure (échelle: 1cm=55 km).

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE I- DEROULEMENT DU PROGRAMME. page: 4

- 1.1- Objet du programme.
- 1.2- Partenariat.
- 1.3- Méthode de travail.
- 1.4- Déroulement du programme.

CHAPITRE II- ETAT DE LA SALURE DES PERIMETRES IRRIGUES EN 1989. page: 8

- 2.1- Introduction.
- 2.2- Périmètres salés de la Haute et Moyenne Vallée de la Mejerda.
- 2.3- Périmètres salés dans la Basse Vallée de la Mejerda.
- 2.4- Périmètres de Zaghouan et de la presqu'île du Cap Bon.
- 2.5- Périmètres salés de la zone de montagnes à Siliana, Le Kef et Kasserine.
- 2.6- Périmètres salés de la zone côtière: Sousse, Monastir, Mahdia et Sfax.
- 2.7- Périmètres salés du Kairouanais et de la plaine de Sidi Bouzid.
- 2.8- Périmètres salés du sud tunisien: zone des oasis.
- 2.9- Bibliographie sur les périmètres irrigués salés.
- 2.10- Zonation géochimique dans le paysage.
- 2.11- Répartition géomorphologique.

CHAPITRE III- ETUDE DES SOLS SALES PAR CONDUCTIVIMETRIE ELECTROMAGNETIQUE. page: 26

- 3.1- Introduction.
- 3.2- Salure et conductivité électrique des sols.
- 3.3- théorie de la CEM.
- 3.4- Utilisation pratique de la CEM.
- 3.5- Estimation des profils salins.
- 3.6- Résultats d'étalonnage sur les sols de Tunisie.
- 3.7- Relation entre les conductivités des extraits.
- 3.8- Effet de la teneur en eau des sols pour l'étalonnage.
- 3.9- Conclusion.

CHAPITRE IV- DISTRIBUTION SPATIALE DE LA SALURE DANS LES SITES REPRESENTATIFS. **page: 39**

- 4.1- Introduction.
- 4.2- Distribution des sels dans le paysage à Sidi Saâd.
- 4.3- Distribution des sels à El Guettar (Gafsa).
- 4.4- Distribution des sels dans l'oasis de Tarfaya.
- 4.5- Conclusions.

CHAPITRE V- PREVISION DE LA PRECIPITATION DES SELS PAR CAPILLARITE. **page: 46**

- 5.1- Introduction.
- 5.2- Calcul des ions appariés.
- 5.3- Calcul des conductivités des solutions.

CHAPITRE VI - EVOLUTION DE LA SALURE DANS LE TEMPS. **page: 53**

- 6.1- Introduction.
- 6.2- Parcelles d'essai.
- 6.3- Résultats à la parcelle.
- 6.5- Optimisation des paramètres de CEM des sols.
- 6.6- Conclusions.

CHAPITRE VII- CONCLUSIONS. **page: 64**

- 7.1- Résultats.
- 7.2- Perspectives.

CHAPITRE VIII- PUBLICATIONS ET RAPPORTS DU PROGRAMME SOLS SALES EN TUNISIE (1989-1994). **page: 68**

- 8.1- Rapports et publications du programme.

CHAPITRE IX- BIBLIOGRAPHIE SUR LES SOLS SALES EN TUNISIE (1941-1993). **page: 71**

- 9.1- Introduction.
- 9.2- Bibliographie sur les sols salés en Tunisie.

LISTE DES FIGURES.

- Fig.2.1- Zonation géochimique des sols salés en Tunisie.
 Fig.2.2- Situation géomorphologique de sols salés dans la Haute Vallée de la Mejerda.
 Fig.3.1- Extraction successive des sels d'un sol gypseux par l'extrait à saturation (El Guettar).
 Fig.3.2- Profils salins d'une planche cultivée en luzerne sous palmier.
 Fig.3.3- Variation de la salure sur une parcelle irriguée à la planche.
 Fig.3.4- Principe de la conductivité électromagnétique dans les sols.
 Fig.3.5- Contribution au champ secondaire d'une épaisseur élémentaire de sol.
 Fig.3.6- Principe de l'étalonnage sur le terrain des mesures CEV et CEH.
 Fig.3.7- Erreur d'estimation sur $CE_{sat(0-120)}$ pour $\theta_p = 20 \pm 5\%$ suivant la salure du sol.
 Fig.4.1- Environnement géologique du périmètre de Sidi-Saad.
 Fig.4.2- Distribution des sels à Sidi-Saad (Juin 1989).
 Fig.4.3- Détail de la salure de la parcelle n°112NO en juin 1988 (projection préliminaire).
 Fig.4.4- Distribution spatiale de la salure de sols de l'oasis d'El Guettar.
 Fig.4.5- Dynamique générale des sels dans la Nefzaoua (1/250 000 ème).
 Fig.4.6- Répartition spatiale de la salure des sols dans l'oasis de Tarfaya (Nefzaoua).
 Fig.5.1- El Guettar: concentrations des ions appariés dans la nappe phréatique.
 Fig.5.2. Tarfaya: concentrations des ions appariés dans la nappe phréatique.
 Fig.5.2- Diagramme de rayons-x de sels de surface.
 Fig.5.3- Enrichissement de la solution du sol en ions sulfate et sodium par capillarité.
 Fig.6.1- Répartition de la salure dans deux parcelles de périmètres de la Vallée de la Mejerda.
 Fig.6.2- Variation de la salure du sol, et variogrammes normés correspondants.
 Fig.6.3- Variabilité typique de la salure des sols d'une parcelle d'oasis.
 Fig.6.4- Evolution de la salure dans les oasis de Lela, Gafsa Sud-Ouest et El Guettar.
 Fig.6.5- Carte des salures du sol sur 120 cm à Cebala Ben Ammar.
 Fig.6.6- Lessivage de sels d'une parcelle de sols limoneux initialement très salés à El Guettar.
 Fig.6.7- Redistribution de l'eau dans un profil de sol stratifié gypseux d'El Guettar.

LISTE DES TABLEAUX.

- Tab.2.1- Solubilité des principaux sels que l'on rencontre dans les sols salés de Tunisie.
 Tab.3.1- Conductivité équivalente limite ($S.cm^2.e^{-1}$ à $25^\circ C$) des principaux ions du sol.
 Tab.3.2- Correspondance entre concentration des solutions du sol et conductivité électrique.
 Tab.3.3- Etalonnage de la valeur $CEH(\theta)$ par rapport à la salure intégrée du sol.
 Tab.3.4- Contribution en % d'une épaisseur de sol à la lecture de CEM.
 Tab.3.5- Valeur des coefficients a et b dans la relation: $CE_{sat} = a CE_{cin} + b$
 Tab.3.6- Valeur des coefficients a et b dans la relation: $CE_{sat} = a CE_{dix} + b$
 Tab.3.7- Valeur du coefficient a de la relation $CEH(\theta_2) = CEH(\theta_1) + a(\theta_2 - \theta_1)$
 Tab.5.1- Constantes de dissociation des principaux ions appariés en solution.
 Tab.5.2- Qualité des eaux de forages des oasis de Tarfaya et El Guettar (en me^{-1}).
 Tab.5.3- Coefficients a et b de l'équation $CE_{nap} = a CE_{sat} + b$ en fonction de la profondeur.
 Tab.5.4- Conductivités équivalentes de quelques sels suivants la concentration.
 Tab.6.1- Caractéristiques des parcelles dont la salure est suivi à Zama Bouzid.
 Tab.6.2- Caractéristique des parcelles suivies à Cebala Ben Ammar.
 Tab.6.2- Caractéristique des parcelles des périmètres de Zaafrana et d'Henchir El Oussif.
 Tab.6.3- Caractéristique de la parcelle de Èssaafet (région de Mahdia).
 Tab.6.4- Caractéristiques des parcelles suivies dans le petit périmètre de Zelba.
 Tab.6.5- Caractéristiques des parcelles emboîtées de l'oasis de Lelat.
 Tab.6.6- Caractéristiques des parcelles dont la salure est suivie à El Guettar.
 Tab.6.7- Caractéristiques des parcelles suivies à Grombalia.
 Tab.6.8- Parcelles de Sidi Saâd.
 Tab.6.9- Oasis de Gafsa Sud-Ouest: parcelles OTD (Office des Terres Domaniales).
 Tab.6.10- Effet de l'humidité du sol sur les valeurs CEV et CEH.

CHAPITRE I

DEROULEMENT DU PROGRAMME

1.1- Objet du programme.

Ce programme a été monté à l'initiative de la Direction des Sols du Ministère de l'Agriculture et de l'ORSTOM pour diagnostiquer l'évolution de la salure des sols irrigués à moyen terme, à toutes les échelles intéressant l'agriculteur et les responsables régionaux de l'agriculture, sur ses sites représentatifs de l'ensemble de la Tunisie.

Il s'agit d'une approche spatiale des mesures de salure. D'où le recours à la méthode de mesure par conductivimétrie électromagnétique, dite CEM, au traitement géostatistique des données, à l'estimation de la variation dans le temps et au traitement de variables dynamiques (le profil salin des 120 premiers cm du sol). Cette approche permet en même temps:

- de délimiter avec précision dans l'espace les sols les plus menacés par la salure afin d'optimiser les investissements consentis pour l'irrigation des terres,
- d'évaluer l'évolution de la qualité des sols irrigués à l'eau salée.

Cette méthodologie fait appel à des concepts nouveaux, à de nombreuses mesures de terrain, à un traitement mathématique spécifique qui a fait l'objet d'un transfert de technologie approfondi dans une première partie de notre programme. Cette première partie a été réalisée dans ses objectifs initiaux dès la fin de l'année 1992, une vingtaine d'ingénieurs et autant de techniciens du Ministère ayant été formés à cette méthode. Il a paru néanmoins opportun de lancer un certain nombre d'opérations de recherche au cours de cette phase.

1.2- Partenariat.

Partenariat en Tunisie:

Les partenaires principaux ont été l'Orstom et la Direction des Sols du Ministère de l'Agriculture et les CRDA de Gafsa, Ariana, Jendouba, Kairouan et Kebili. Tous les autres gouvernorats ont été impliqués plus ou moins à un moment ou à un autre.

Des actions parallèles d'encadrement d'étudiant du laboratoire des Sols de l'INAT, (responsable Mr. A. Mhiri), ont été conduites.

Partenariat français:

- l'INRA/ENSA de Montpellier (Mr. Cl. Remy),
- l'INRA/ENSA de Rennes (Mr. Cl. Cheverry).

1.3- Méthode de travail.

La première étape a consisté à établir un état des lieux de la salure des sols irrigués en Tunisie. Cela a été fait avec l'aide des pédologues de chaque région (Commissariat Régional au Développement Agricole, ou CRDA) par des tournées de terrain et l'interprétation des nombreuses études pédologiques faites sur ce sujet.

Nous avons ensuite sélectionné dans chaque zone climatique un périmètre représentatif d'un système de culture et d'un comportement du sol vis à vis du drainage propre à la région considérée. Le responsable de l'arrondissement des sols a été ensuite chargé de suivre la salure de ce périmètre témoin deux à trois fois par an, pendant trois ans.

A l'intérieur de chaque périmètre, il choisit plusieurs unités suivant la gestion de l'eau. Dans chacune de ces unités, il sélectionne une ou plusieurs parcelles sur lesquelles est fait un suivi de la salure globale pendant trois ans.

Ces données ont été soumises à l'analyse spatiale et temporelle, à Tunis, dans un premier temps, puis dans chaque gouvernorat au fur et à mesure que l'équipement informatique est disponible et que les cadres régionaux sont formés.

Des recommandations sur la gestion de l'eau dans chaque périmètre ont été faites.

1.4-Déroulement du programme.

1988- Juin: phase préparatoire; premier séminaire sur le suivi de la salure par CEM à Sidi-Thabet; méthodologie CEM et situation des sols salés dans les périmètres irrigués.
Octobre: premières mesures et essais de terrain sur le périmètre irrigué de Sidi Saâd (Kairouanais, 1000 ha),

1989- Avril-Mai-Juin: reconnaissance des périmètres et sélection des périmètres sensibles dans tous les gouvernorats de Tunisie, premières cartes de salure des sols.
28-29 Juin et 5-6 Juillet: ateliers de formation sur la théorie et la pratique des mesures de CEM, sur la cartographie automatique et le traitement informatique des données.
Septembre: démarrage des mesures de CEM dans 11 périmètres (Zama, Souk-Es Sebt, Utique, Cebala, Grombalia, Zelba, Essaafet, Sidi Saâd, Lelat, Gafsa Sud-Ouest, El Guettar).
Novembre: table ronde sur les premiers résultats obtenus.

1990- Juin: deuxième atelier sur les mesures de CEM appliquées au suivi de la salure dans les périmètres irrigués. Formation de nouveaux participants sur le site de Megez el Bab, de Bir M'Cherga près de Zaghouan.

1991- Seuls sont gardés les périmètres de Zama-Bou Zid, Mahdia, Lelat, El Guettar, Cebala, Une dizaine de missions de soutien ont été faites dans ces sites. Deux opérations de recherche sont lancées sur:
- les mécanismes de dégradation physiques des sols lourds (Mejerda),
- les processus de salinisation des sols légers du Sud (El Guettar).

1992- Le suivi des périmètres irrigués est progressivement confié aux responsables régionaux.

Deux périmètres irrigués font l'objet d'études plus approfondies:

Kalaât Landalous (Basse Vallée de la Mejerda): prévision des risques de salure des sols lourds, recherche finalisée par deux mémoires de troisième cycle de l'INAT (Mrs Bach-Hamba et Bouksila, encadrés par M. Hachicha, A., Mhiri et J.O. Job).

El Guettar (oasis de la région de Gafsa): sur la géochimie des sols salés et la gestion de l'eau, travail présenté en septembre 92 dans une thèse de doctorat à l'Université de Montpellier II (J.O. Job).

1993- Les Chefs d'arrondissements des sols des CRDA disposent de la formation théorique et pratique suffisante pour poursuivre à leur propre rythme les mesures sur les périmètres choisis. Les sites d'El Guettar, Lelat, Zelba et Zama-Bouزيد font l'objet d'analyses plus spécifiques sur les thèmes suivants:

- Gestion de l'eau à la parcelle à El Guettar; (Job J.O., Merai M.),
- Transferts d'échelle et répartition spatiales des sels à Jendouba et à Lela (Bransia M., Hachicha M., Merai M., Job J.O.),
- Evolution de la salure à Cebala (Hachicha M., Trabelsi A., Soussi A.).

1.5-Conclusions.

Réalisations:

Deux soucis majeurs nous ont guidé tout au long de ce programme:

- orienter les études sur les thèmes prioritaires pour le développement de l'agriculture irriguée de la Tunisie,

- former les ingénieurs et techniciens aux méthodes de recherche modernes dans le domaine de la mesure, de la stratégie d'échantillonnage. Dans cette optique, un programme de formation parallèle en trois étapes à été mis au point:

1- initiation à la méthodologie de mesure de la salure des sols par conductivimétrie électromagnétique (CEM),

2- utilisation du traitement statistique des données numériques et stratégies d'échantillonnage,

3- utilisation de la géostatistique élémentaire pour la mise en évidence des tendances spatiales, et tracé automatique des cartes.

Résultats:

- pour le développement agricole: des recommandations sur la gestion des eaux et des sols (drainage, quantité d'eau, etc..),

- pour la méthodologie: une généralisation de la méthode CEM sur des sols à texture et porosité différentes, susceptible d'être appliquée dans d'autres pays arides.

- pour la recherche: une approche géochimique générale sur l'ensemble de la Tunisie, qui permet de comprendre l'effet de l'irrigation sur la circulation des sels dans le paysage, dans les zones arides.

Prolongements:

Dès le début de 1992, les études réalisées à El Guettar, ont montré que même dans les zones endoréiques, une bonne gestion de l'eau à la parcelle permettait de cultiver des sols très salés, par le contrôle des sels à l'intérieur du profil. Ce contrôle ne peut se faire que si les apports en eau et les techniques d'amendement organique des sols peuvent être quantifiés tout au long de l'année. C'est pour cela que l'on a poursuivi les études sur sites privilégiés: El Guettar (Gouvernorat de Gafsa) et l'oasis de Tarfaya (Gouvernorat de Kebili).

Fin 1993, un séminaire est organisé par la Direction des Sols, l'Orstom et la collaboration scientifique de la Direction Générale des Ressources en Eau, ainsi que celle du Génie Rural, avec la participation du CRDA de Tozeur, et de l'ACSAD. On y propose une étude pluridisciplinaire associant hydrogéologues, pédologues, géochimistes et agronomes qui seule permettrait d'aboutir à un bilan hydrique et salin des systèmes de cultures irrigués et de conduire ainsi à des mesures d'économie d'eau compatibles avec des rendements acceptables.

Tous les participants sont d'accord pour dire que ce programme d'envergure nationale ne pourrait être envisagé qu'avec la participation de chercheurs confirmés du CRGR, de l'INRAT, de l'INAT et des autres Instituts tunisiens concernés qui focaliseraient leurs efforts sur un, ou au maximum deux sites représentatifs.

**PERIMETRE IRRIGUE DE KALAAT LANDELOUS
(BASSE VALLEE DE LA MEJERDA)**



Photo.1- Mesure de la conductivité électrique de l'eau du drain principal.



Photo.2- Mesure du débit de drainage secondaire au moulinet.



Photo.3- Etalonnage du moulinet par rapport au seuil jaugeur.



Photo.4- Station de refoulement de l'eau drainée vers la mer.

CHAPITRE II

ETAT DE LA SALURE DES PERIMETRES IRRIGUES DE TUNISIE EN 1989.

2.1- Introduction.

Plusieurs tournées de terrain faites avec les responsables des arrondissements des Sols de chaque région ont été nécessaires pour dresser un bilan de la situation des périmètres irrigués salés en Tunisie. Ces visites ont été faites périmètre par périmètre, avec prélèvements d'échantillons de sols, d'eaux d'irrigation et de drainage, dans le souci de réactualiser les données pédologiques, souvent anciennes, quelques fois inexistantes.

Les résultats succincts de ces tournées sont présentés dans ce chapitre du Nord au Sud du pays. Ils ont été inclus dans ce rapport car ils donnent une idée de l'ampleur des phénomènes de salure sur l'ensemble du pays. Pour chaque région, renvoi est fait aux références bibliographiques qui renferment les données pédologiques de base pour les périmètres étudiés depuis 1950 (page 71 et suivantes).

Une synthèse de la situation géochimique des périmètres en Tunisie est donnée en conclusion de ce chapitre.

2.2- Périmètres salés de la Haute et Moyenne Vallée de la Mejerda:

Situation générale:

Les terres irriguées couvrent 23500 ha, réparties en grands périmètres de création récente dans la haute vallée de Mejerda et 18 000 ha répartis à Béja (moyenne vallée de la Mejerda). La gestion est moderne et fait appel à des moyens puissants.

Les sols sont peu évolués d'apport alluvial à caractère vertique de texture argileuse à argilo-limoneuse, quelquefois alcalins. L'eau d'irrigation provient des barrages de Bou Heurthma (0,6 g/l, pour une capacité totale de 117.10^6 m³), Nebeur (3 g/l), de quelques lacs collinaires et de sondages. L'aspersion est pratiquée à partir de rampes motorisées, la submersion subsiste. L'eau, généralement suffisante en quantité, est de qualité variable, entre 0,6 et 4g/l. A Béjà, l'eau d'irrigation provient directement de la Mejerda.

Les parcelles sont grandes, entre 3 et 5 ha. Elles sont cultivées en betteraves, céréales, fourrages, maraîchage et un peu d'arboriculture et de tabac. La production est moyenne à bonne. Les aménagements hydrauliques consistent en un réseau d'irrigation enterré avec une vanne par parcelle de 5 ha et un réseau de drainage, à ciel ouvert à Zama-Bouزيد et par drains enterrés à Souk Sebt. Les contraintes à la production sont d'abord la mauvaise perméabilité des sols, ensuite la remontée de la nappe. Les rampes d'aspersion autotractées sont de plus en plus utilisées.

Périmètres à risques:

Toutes les zones basses à drainage déficient sont plus ou moins atteintes. Les périmètres dans lesquels la situation est préoccupante sont essentiellement:

- Souk Es Sebt: 5300 ha ont été mis en eau en 1986 entre les oueds Mellègue et Tessa. L'irrigation se fait à partir du barrage de Bou Heurtma.
- Bir Lakhdar: les 2700 ha de sols argileux, situés à l'Est de l'oued Tessa, sont irrigués par de grandes rampes de 160 m d'envergure (Zama-Bou Zid). Le drainage n'est pas suffisant.
- Mejez El Bab: ce périmètre de 6000 ha, mis en eau en 1985, est irrigué par aspersion et submersion. Les sols, peu évolués d'apport fluvial, sont hydromorphes en profondeur. L'irrigation se fait à la demande, sans tour d'eau. La salinisation des sols est causée par la remontée de la nappe qui ne possède pas d'exutoire. Les doses d'irrigation atteignent 7 000 à 9 000 m³/ha/an. Elles apportent 10 à 14 tonnes de sels/ha avec une eau de 1,5 g/l, pour un besoin estimé à 5500 m³/ha pour une culture de tomates, très pratiquée dans la région.

2.3- Périmètres salés dans la Basse Vallée de la Mejerda et la région de Bizerte:

Situation générale:

On peut répartir les périmètres irrigués en plusieurs sous-régions:

- dans le gouvernorat de Bizerte: la plaine de Sejnane, la plaine de Mateur, la plaine côtière de Ras Jebel et la rive gauche de la Mejerda. On compte à peu près 10 000 ha irrigués dont 4200 affectés par les sels, répartis sur une dizaine de périmètres.

- dans le gouvernorat de l'Ariana, la superficie irriguée est de 26 300 ha, répartis en 17 périmètres.

Les sols sont en majorité peu évolués d'apport alluvial à caractère vertique, ou calcimagnésiques, quelquefois bruns calciques sur les pentes. Leur texture est le plus souvent argileuse à argilo-limoneuse et par endroit sableuse (anciens bourrelets de berges). L'eau d'irrigation provient des barrages de Joumine (130.10^6 m³ de capacité totale) et Ghezala (12.10^6 m³), de quelques lacs collinaires et de puits de surface pour les environs de Bizerte. Elle est distribuée à la parcelle par aspersion et submersion. Sa charge en sels varie entre 0,6 et 4 g/l. Pour la région de l'Ariana, l'eau d'irrigation vient soit du Barrage d'El Aroussa sur la Mejerda soit du site de traitement des eaux usées de Choutrana (pour Cebala seulement). La quantité d'eau mise à disposition de l'agriculteur est généralement suffisante, sa charge varie entre 2 et 4 g/l. L'aspersion et la submersion sont pratiquées à concurrence égale sur des cultures industrielles.

Le parcellaire est moyennement divisé sur les pentes, constitué de grandes parcelles dans les plaines. Les cultures sont: maraîchages, fourrages, céréales et arboriculture. L'aménagement hydraulique est important: réseau d'irrigation en béton enterré, réseau d'assainissement et de drainage par fossés à ciel ouvert dans certains périmètres. Quinze mille hectares sont aménagés à Mateur.

Les contraintes à la production sont la mauvaise perméabilité des sols, la remontée de la nappe et le mauvais drainage qui causent des salures élevées par endroit. L'eau n'est pas toujours disponible en quantité suffisante, la technicité des irrigants est quelquefois insuffisante.

Périmètres à risques:

- Ras El Jebel, Aousja: c'est une petite agriculture autour de lacs collinaires dans une zone de grès, de sables et d'argiles géologiques imbriqués.
- El Alia: de petites exploitations individuelles surexploitent la nappe. On prévoit pour y remédier de mélanger les eaux de la Mejerda avec celles des lacs collinaires, à l'aide d'écluse au niveau de Kalâat Landelous.
- Utique Nouvelle: périmètre remis en état par drainage ouvert et redistribution des eaux après stockage sur la colline.
- El Habibia (1900 ha): c'est la zone la plus basse de la région, composée de sols lourds mal drainés. Elle est alimentée par le barrage d'El Aroussia dont les eaux titrent 1,6 g/l; .
- Mornaguia: il y a alcalisation et salinisation dans certaines parcelles, par suite d'un drainage naturel déficient.
- Cebala Ben Ammar: c'est un périmètre de 3000 ha irrigués aux eaux usées épurées (3,5 g/l) de la station de Choutrana mis en culture fourragères, coton et maïs. Le drainage est déficient au milieu du périmètre.
- M'Barka: périmètre à mauvais drainage.
- Kalâat Landelous: 2800 ha sont assainis par des drains enterrés et des collecteurs à ciel ouvert. Les eaux de drainage sont pompées et rejetées à la mer.
- Henchir Tobias: le périmètre est assaini mais il s'y produit quand même une salinisation secondaire par la nappe et l'eau d'irrigation.
- Sidi Thabet, Cherfech, Lezdine: dans ces périmètres également, la situation du drainage est critique.

2.4- Périmètres de Zaghouan et de la presqu'île du Cap Bon.

Situation générale:

A Zaghouan les périmètres sont de grande taille. Seulement cinq périmètres, de superficie variant entre 300 et 1400 ha, se partagent 4260 ha de terres irriguées. L'eau d'irrigation est pompée directement à partir du barrage de Bir Mchergua (53.10^6m^3 de capacité totale) sur l'oued Méliane, avec complétement par puits et forages. L'eau du barrage contient entre 2 et 3 g/l de résidu sec, celle des forages entre 0,5 et 1,5 g/l. Submersion et aspersion sont pratiquées.

Dans le Cap Bon, il y a peu de grands périmètres irrigués, mais une agriculture traditionnelle irriguée très développée. Pour l'alimentation du Cap Bon, l'eau, de bonne qualité, est amenée par le canal Mejerda-Cap Bon, dit Canal du Nord. Les puits de surface surexploitent la nappe, induisant une salinisation croissante dans le temps.

La taille des parcelles est très variable, les propriétés variant de 1 à 20 ha. Les cultures sont surtout le maraîchage, puis l'arboriculture et les cultures fourragères. La production est bonne à moyenne.

Les contraintes à la production sont d'abord la mauvaise perméabilité des sols, l'insuffisance de l'eau, et aussi la surexploitation de la nappe. Il n'y a pas de réseau d'irrigation, et les techniques d'irrigation sont inadaptées.

Périmètres sensibles:

- Bir M'Cherga: sur 5000 ha irrigables 500 ha sont actuellement irrigués et cultivés en coton et maraîchage divers. Une partie du périmètre est affectée par les sels.
- Sminja: dans ce périmètre, la salure initiale du sol est élevée.
- Haouaria, Grombalia (2000 ha): dans ces périmètres, l'irrigation se fait par aspersion à partir du canal des eaux du Nord contenant 1 g/l en hiver, mais jusqu'à 3 g/l en été. C'est une zone basse, mal drainée, constitués de sols à texture fine, assez salés.

2.5- Périmètres salés de la zone de montagnes à Siliana, Le Kef et Kasserine.

Situation générale:

Dans cette région les sols sont assez diversifiés. On trouve toujours des sols peu évolués d'apport alluvial de texture fine dans les fonds de vallée, mais les sols de pente sont calcimagnésimorphes, isohumiques ou fersialitiques, à texture plus équilibrée, avec une dynamique du gypse qui commence à apparaître.

A Siliana, la superficie des terres irrigués atteint 6244 ha, répartie en 8 périmètres d'aménagement récent, dont six ont moins de 300 ha. L'eau d'irrigation provient du barrage de Siliana (70.10^6m^3 de capacité) pour les deux grands périmètres et de sondages pour le reste. Sa qualité est bonne, de résidu sec inférieur à 1 g/l, sauf à Rouhia où elle se situe entre 1,5 et 3 g/l. Les cultures sont: le maraîchage, les cultures fourragères et l'arboriculture. Les contraintes à la production sont essentiellement une salure élevée à Rouhia.

Au Kef, on dénombre 19 petits périmètres, de superficie comprise entre 25 et 190 ha, couvrant au total 1200 ha. L'eau d'irrigation est de bonne qualité, inférieure à 1,8 g/l sauf à Sra Ouertane (3,5 g/l), mais insuffisante en quantité. Les parcelles sont petites, irriguées par aspersion et cultivées en arboriculture et betterave à partir de conduites enterrés sous pression. Les contraintes à la production sont la mauvaise perméabilité des sols dans certains périmètres, la salure élevée dans les périmètres à texture fine, la nappe superficielle par endroit.

Dans l'arrondissement de Kasserine, il y a 13 000 ha de terres irriguées, répartis en petits périmètres de création récente. Les sols sont calcimagnésiques et isohumiques. L'eau d'irrigation provient de sondages, puits et barrages, de résidu sec le plus souvent inférieur à 1 g/l sauf à Sbeitla. Elle est appliquée sur la culture par submersion et aspersion. Les cultures sont dominées par l'arboriculture (pommiers) sur les sols des terrasses d'oueds, dans les grands périmètres, maraîchage et cultures fouragères dans les périmètres de taille inférieure à 100 ha.

L'irrigation est conduite par aspersion et goutte à goutte à partir d'une distribution par canaux à ciel ouvert. Le réseau de drainage comporte des fossés et collecteurs. Les contraintes à la production sont par endroits, le mauvais drainage, sur les sols limoneux fins en particulier.

Périmètres à risques:

- Sers (40 ha) où se pratique la petite irrigation privée sur des sols salés avec une eau de bonne qualité.
- Felta (60 ha) constitué de sols limoneux sur affleurements de diapirs gypseux du trias. L'eau provient d'un forage débitant 25 l/s.
- Sidi Ahmed Salah (200 ha), en amont du barrage sur le Méllègue, alimenté par un forage de 100 m de profondeur produisant une eau à 1 g/l. On y cultive le sorgho et la luzerne, irrigués par aspersion. Les sols ne sont pas salés, mais il y a un risque d'alcalinisation.
- El Hachm (120 ha), Ain Hdia (50 ha), Foussana (240 ha), Oued ed Derb (4100 ha).

2.6- Périmètres salés du Sahel côtier: Sousse, Monastir, Mahdia et Sfax:

Situation générale:

Deux mille hectares de terres sont irriguées dans le gouvernorat de Sousse, 1700 ha, soit 11 périmètres dans celui de Monastir et 1000 ha pour 18 périmètres à Mahdia.

Les sols sont peu évolués d'apport en bordure d'oueds, isohumiques ou bruns calcaires dans la zone steppique. L'irrigation traditionnelle à Sousse et Monastir à partir des puits a été complétée depuis 1970 par les eaux du barrage de Nebhana, ayant une charge en sels de 1 à 1,8 g/l, par des sondages profonds (entre 1,5 et 3,8 g/l) et par des eaux usées. La submersion est largement pratiquée. A Mahdia, l'eau d'irrigation provient de forages dans les nappes profondes: nappe de Zerameddine-Beni Hassen de 200 à 350 m, nappe de Souassi, la nappe de Sfax de 250 à 400 m. Leur qualité est moyenne à médiocre (4 g/l). La submersion est le mode privilégié de distribution. Le goutte à goutte est pratiqué dans les serres récentes.

Les parcelles sont petites (quelques ares): maraîchage, serriculture, arboriculture et fourrages sont omniprésents. La petite hydraulique domine (conduites en amiante-ciment, puits aménagés).

Les contraintes à la production sont essentiellement: l'urbanisme envahissant, le manque d'eau et la qualité médiocre des eaux des puits, sur la côte, la salinité élevée dans les périmètres à texture fine, les doses et fréquences insuffisantes. Dans tous les périmètres cités ci-après, la salure de l'eau d'irrigation diminue fortement les rendements.

Dans la région de Sfax, douze périmètres se partagent 5700 ha de terres irriguées. Les sols sont calcimagnésiques sur croûte ou encroûtement. leur texture est moyenne à grossière. L'eau d'irrigation provient de 4 forages et de plus de 5500 puits, et d'eaux usées retraitées (4 g/l). Leur qualité est médiocre de 2 à 5 g/l. La distribution par submersion est généralisée.

Les parcelles sont petites au voisinage de Sfax, (quelques ares), l'aménagement hydraulique est limité à l'équipement des puits. Les sols sont cultivés en maraîchage, oliviers et petit fourrage domestique. Les contraintes à la production sont la baisse de fertilité par salure des sols et utilisation d'eau salée, la surexploitation de la nappe, l'envahissement de l'urbanisme.

Périmètres à risques:

Zone côtière Nord:

- Sidi Bou Ali (950 ha): les sols bruns légers sont irrigués au goutte à goutte. La forte évaporation provoque une salure superficielle et des baisses de rendements.
- Chott Meriem, Hergla (750 ha): des problèmes de sels se posent dans la zone I (240 ha) sur les sols à texture moyenne.
- Akouda (180 ha): ce périmètre, consacré aux serres et au maraîchage, est irrigué à partir de l'eau du Nebhana complétée par une centaine de puits; sur 180 ha irrigués, 65 sont affectés par les sels.
- Sidi Bakay: les anciens périmètres de Sayah I et II ont été restructurés en 1969 et alimentés par forage de 160 m débitant 20 l/s et titrant 4,3 g/l. Le nouveau périmètre est divisé en petites exploitations de 3 ha, le tour d'eau est de 15 à 20 jours. Les sols de bas de pente à caractère verticale sont cultivés en coton.
- Agrocombinat d'Enfida: six sondages profonds permettant d'irriguer 600 ha de fourrages et 22 ha de serres ont remplacé tous les puits de surface abandonnés à cause de leur salinité.
- Sidi N'Sir: l'irrigation se fait par eau à 2 g/l sur des sols battants et salés.
- Zelba I: les sols à texture limoneuse ou limono-argileuse ont une salure élevée. L'eau d'irrigation (forage), est chargée en sels, (4,5 g/l) et peu abondante.
- Chiba, Henchir Ben Kamla (Hiboun): maraîchage en serre sur sols légers à partir du forage de Chiba III (2,9 g/l). Les eaux sont de faciès chloruré sodique et sulfaté magnésien.
- Hebira Sghira: réhabilitation d'une zone basse par forage à 3 g/l dans la nappe de Souassi (400 m) qui doit remplacer les puits actuels creusés dans la nappe phréatique entre 2,50 m et 4,50 m. les sols sont légers sauf en bordure de la Sebkh Cherita.
- Essaafet (oued Chiba): on y pratique des cultures intercalaires sous oliviers, sur 20 hectares, irriguées par un forage profond (5,1 g/l); extension actuelle à 80 ha. Dans parties basses existe un horizon B tirsifié, à drainage inexistant.

Environs de Sfax:

- Hazeg: petite agriculture extensive sur des sols légers de bordure de mer. La nappe est surexploitée et il y a intrusion d'eau de mer.
- Sidi Abid: de petites propriétés se partagent un sol léger sur limons à nodules. Les eaux de puits titrent de 1 à 3 g/l. Ce périmètre en déclin est menacé par l'urbanisation.
- Hajeb (domaine Châal): 270 ha de sols sur croûte ou encroûtement calcaire sont irrigués, par les eaux usées de la ville de Sfax, pour la culture de l'olivier et de la luzerne.
- Chaffar: 350 ha sont irrigués par des eaux de puits peu salées, environ 1 g/l.
- Nakta (domaine Châal): sols limoneux, peu drainants, suivis jadis par le CRUESI. L'eau est à 4 g/l, on y cultive du fourrage. Il faut surveiller le drainage, car il y a des taches de salinisation par endroits.

2.7-Périmètres salés du Kairouanais et de la plaine de Sidi Bou Zid.

Situation générale:

Le climat de cette région est essentiellement aride à nuance continentale, avec un déficit hydrique supérieur à 1000 mm par an. c'est une région de grands bassins versants, du Zeroud, du Mergue Ellil, du Nebhana, du Fekka.

Dans le Kairouanais, avec les grands barrages récemment réalisés, Sidi Saâd sur le Zeroud (capacité: 209 10⁶ m³), El Haouareb sur le Mer Guellil (37.10⁶ m³), Nebhana (66 10⁶ m³), la région est complètement endoréique. La vocation pastorale fait place à un développement intensif de l'agriculture irriguée. Les sols sont en majorité des limons à nodules dans les parties moyennes du paysage et des limons fins mal drainant dans les parties basses. Il y a 42000 ha irrigués. Les bords immédiats des grandes sebkhas sont cultivés. C'est une région de grand développement (Sidi Saâd, 2000 ha). Les eaux sont de qualité variable suivant les saisons entre 2,5 et 4,5 g/l.

Dans la plaine de Sidi Bou Zid, il y a 15 périmètres pour 12000 ha dont 2225 ha de périmètres publics irrigués. Les sols sont peu évolués d'apport alluvial à texture équilibrée à grossière, la salure faible en général, sauf en bordure de zone basse. L'eau d'irrigation provient de puits (débits de 15 à 80 l/s, résidu sec de 0,5 à 3,4 g/l), de sondages et de l'épandage des crues de l'Oued Fekka. La submersion est la règle générale. Les aménagements hydrauliques sont nombreux et divers: conduites d'irrigation, séguias et canaux à ciel ouvert, ouvrage de dérivation. Les parcelles sont petites, et vouées au maraîchage, la culture de l'olivier et des céréales. Les contraintes à la production, sont: l'absentéisme, la déficience du réseau d'irrigation défectueux et la surexploitation de la nappe.

Périmètres à risque:

- El Oussif (60 ha): situé sur la première terrasse du Mergue Ellil, il est irrigué depuis 1975 à partir d'un forage à 200 m de profondeur de 2,1 dSm⁻¹. Les sols sont argileux vertiques à drainage difficile, la salinisation est importante.
- Sidi Ali Ben Salem II (120 h): on y pratique l'arboriculture sur sols limono-argileux à salure élevée.
- Sebkha El Kelbia: on a pratiqué des plantations d'*Acacia cyanophylla* sur les alluvions salées de bas fonds inondables.
- Zaâfrana III (120 ha): mis en eau en 1969 sur des sols à drainage défectueux à encroûtement gypseux.

- Sidi Saâd (2000 ha): l'alimentation se fait depuis 1987, à partir du barrage par distribution souterraine avec une borne par parcelle de 12 ha. Les sols peu évolués d'apport ou des sols isohumiques, de texture sableuse. Les parties basses, en bordure de la Garaet Bhira sont très salées.
- Oum El Adam: petit périmètre alimenté par un forage profond à 3,6 g/l. Les sols sont de texture moyenne à légère, de salinité moyenne. On y pratique la culture de l'olivier et le maraîchage.
- Zaafria, Sediouiya: alimenté par épandage à partir de l'oued Fekka et puits de surface. La salure est importante dans les zones les plus basses.

2.8-Périmètres salés du sud tunisien: les oasis.

Cette zone se caractérise par un climat aride devenant saharien au sud et tempéré par l'influence de la mer dans la région de Gabès. Les sols sont gypseux, de texture limoneuse à limono-sableuse, le plus souvent d'origine éolienne. La quasi totalité des périmètres irrigués sont des oasis. La plupart sont très anciennes et les parcelles sont très petites (1 à 2 ares, en moyenne). Quelques oasis industrielles couvrent de grandes superficies. Dans tous les cas, la contrainte majeure est la salure de la nappe qui est proche de la surface dans les parties basses de chaque périmètre. L'alimentation en eau se fait à partir de forages artésiens qui puisent dans le Continental Intercalaire et le Complexe Terminal. Ce sont souvent des eaux chaudes, bicarbonatées ferriques et sulfatées calciques, de 2,5 à 3 g/l de résidu sec. L'eau des forages est gérée par des AIC (Association d'Interêt Collectif). Les bordures de toutes les oasis font l'objet d'extensions. L'agriculture d'oasis étant très ancienne, chaque région a gardé ses particularités. Nous passerons donc en revue chaque région séparément.

Situation générale à Gafsa.

A l'exception de quelques pistachiers cultivés en sec, toute les cultures sont irriguées à partir de 19 forages artésiens. Il y a 4288 ha de terres irriguées pour 19 périmètres, dont 3000 sont des oasis très anciennes. Les oasis sont toutes situées en bas de piemont, sur des sols peu évolués d'apport colluvial ou alluvial qui deviennent de plus en plus gypseux vers les parties basses. Tous sont limoneux et très perméables, contenant 10 à 40% de gypse et 20% de carbonate de calcium. Le gypse, d'origine éolienne, ne forme pas d'encroûtement (terch).

L'eau d'irrigation provient de puits artésiens. Elle est distribuée dans des seguias en béton et étendue par planches. Elle est de bonne qualité (résidu sec entre 1 et 4,6 g/l), mais très insuffisante en quantité.

Le tour d'eau peut atteindre trois semaines. Les aménagements hydrauliques sont très complets du forage à la parcelle, mais il n'y a pas de réseau de drainage.

Le parcellaire traditionnel est extrêmement morcelé (taille moyenne des parcelles 1500 m²). La première strate est celle des palmiers, la deuxième celle de l'arboriculture, oliviers, abricotiers, pistachiers, grenadiers et figuiers, la troisième celle du maraîchage et du fourrage.

Les contraintes à la production: la salinité élevée dans certains endroits, l'absentéisme, le morcellement des terres, l'insuffisance de l'eau.

Périmètres à risque à Gafsa:

- Oasis de Lella (700 ha): elle est irriguée à partir d'un seuil sur l'oued Mellah qui fournit une eau de salinité comprise entre 2 et 4 dS/m. Quelques puits artésiens sont en voie d'épuisement. Six forages profonds sont en percement pour les remplacer.
- Oasis d'El Ksar: elle est tellement urbanisée, qu'on ne peut parler que de jardins citadins.
- Oasis d'El Guettar: cette oasis traditionnelle de 500 ha est alimentée à partir de deux forages de 120 l/s de débit. Les sols sont des gypses éoliens fixés au pied de colluvions calcaires. Le parcellaire est très morcelé, l'eau est tout juste suffisante pour assurer l'irrigation de 60% des parcelles de l'oasis traditionnelle. Les palmiers des variétés Aaligue, Kenta, Quabrichou) sont progressivement remplacés par des Deglet Nour de meilleur rapport. La salure des sols en bordure de chott dépasse 30 dS/m, mais les pratiques traditionnelles permettent le dessalement et la mise en culture des premiers cm de sol, donc la réussite de petits potagers.

Situation générale à Tozeur:

Dans ce gouvernorat, les oasis traditionnelles cohabitent avec des oasis récemment développées de manière industrielle: 7600 ha sont cultivés en palmiers, répartis en 46 oasis et 260 ha d'extensions illicites en bordure du Chott. Le réseau d'irrigation a été réhabilité. Le réseau de drainage est occasionnellement entretenu.

Les contraintes à la production sont surtout la salinité élevée dans certains endroits, les extensions illicites, le morcellement des parcelles, le mauvais entretien des drains par endroits, les dose et fréquence insuffisantes, l'hydromorphie des sols et l'endoréisme des eaux.

Périmètres à risque à Tozeur:

- Oasis de Tozeur (840 ha): l'eau est partagée entre les agriculteurs selon la subdivision connue sous le nom de Ibn Chabbat. Le tour d'eau est de dix à trente jours. La conductivité électrique de l'eau d'irrigation est de 3,2 dS.m⁻¹.
- Oasis d'Hezoua I: l'oasis, de création récente, utilise l'eau de la nappe du complexe terminal qui a un résidu sec de de 2,9 g/l. L'eau des drains est pompée à l'extérieur de l'oasis. La conductivité électrique de l'eau de drainage est d'environ 7,5 dS.m⁻¹.
- Oasis de Nefta: les sources traditionnelles sont remplacées par des forages. les conductivités électriques des eaux d'irrigation et de drainage sont respectivement de 4 et 10,6 dS.m⁻¹.
- Oasis de Mrah Lahouar (Draa Sud): CE de l'eau d'irrigation d'environ 3,8 mS/cm; CE de l'eau de drainage d'environ 8 dS.m⁻¹.

Situation générale à Kebili:

L'irrigation permet de développer les oasis et les cultures en serre, sans contrainte liée à l'urbanisme. Il existe autour de Kebili, 75 oasis de tailles diverses qui couvrent 7.000 ha, sans compter les 2.000 ha de Regim Matoug. Les sols sont souvent salés au départ. Les cultures sont installées à proximité des forages artésiens en position trop basse pour permettre un bon drainage. A Regim Matoug on utilise des eaux de 2,7 g/l sur des cuvettes de déflation éolienne qui ne drainent pas.

Les cultures sont installées à proximité des forages artésiens en position trop basse pour permettre un bon drainage. Tous les périmètres sont sensibles à la salinisation. Il y a des excédents d'eau en hiver qui transitent directement dans les circuits de drainage et s'accumulent dans des lacs de bas-fonds avant de se saler et de s'évaporer. L'eau est ainsi définitivement contaminée par les sels.

Périmètres à risques à Kebili:

- Régim Matoug (200 ha): on y utilise des eaux de 2,7 g/l sur des cuvettes de déflation éolienne qui ne drainent pas.
- Smida (65 ha): ce périmètre a été installé sur du sable gypseux consolidé en surface. la nappe est à environ 150 cm. Il est alimenté par un forage artésien de 60 l/s. Une étude de réutilisation des eaux de drainage y a été menée.
- Atillet (243 ha): cette oasis est alimentée par trois forages et drainée par trois drains espacés de 200 m. Les sols sont pourtant hydromorphes et les rendements en dattes sont faibles.
- Tarfaya (200 ha): la nappe s'y trouve souvent à moins de 1 mètre. La salure des sols est élevée. les drains ne sont pas entretenus et le tour d'eau n'est pas optimisé.
- Guettaya (180 ha): les eaux de drainage sont pompées vers le Chott et s'y concentrent en sels.
- Tombar: la nappe est à 60 cm. Il y a un drainage vers l'extérieur de l'oasis. L'eau des drains a une conductivité électrique d'environ 5,1 dS/m.
- Jemna : irrigation à l'eau chaude (59°C) par forage profond. Des cultures sous serres sont pratiquées sur des sols sableux. Il existe un bon réseau de drainage, mais l'excès d'eau le dégrade rapidement.

Situation générale à Gabès:

Les oasis de Gabès ne produisent pas de dattes exportables. Les cultures de première et deuxième strates y revêtent donc une plus grande importance qu'ailleurs. 8000 ha sont irrigués dont 5700 ha d'oasis. A peu près 80 % de ces surfaces sont affectées par les sels. Les encroûtements de nappe sont fréquents. Un programme de réhabilitation des périmètres les plus touchés par la salinisation est en cours. Les oasis fonctionnaient jusqu'en 1972 sur des puits artésiens maintenant taris.

De nouveaux forages sont créés (Plan Directeur des Eaux du Sud, Kebili, Tozeur, Gabès). Ils puisent soit dans la nappe de la Jeffara (Gabès), dont la salinité augmente de 2 à 7 g/l du NO au SE, soit dans la nappe du continental intercalaire (Chott El Fejjaj), profonde, (800-900 m), chaude, peu salée (2 à 3 g/l) mais bicarbonatée ferrique et sulfatée calcique, soit dans le Complexe Terminal (Tozeur). On distinguera: les Oasis de Gabès-Nord à nappe proche et encroûtement gypseux de nappe (ex: Oasis de l'Oued Mellah), les Oasis de Gabès-Sud à nappe profonde (ex: Kettana), les Oasis de l'intérieur du gouvernorat (ex: El Hamma).

L'occupation des sols des oasis maritimes est à trois étages: dattiers, arboriculture, maraichage. Cette dernière spéculation consomme beaucoup d'eau et provoque des remontées de nappe.

Périmètres à risque à Gabès:

- Oasis de Chinchou (1200 ha): des eaux géothermiques de conductivité égale à 4 dSm⁻¹ sont utilisées depuis 1973. Les sols sont des alluvions limono-sableuses à sablo-limoneuses et des colluvions gypseuses. Les cultures sont les palmiers, la luzerne et quelques céréales.
- Oasis de Oudrief: elle est irriguée par des eaux d'environ 4,4 dSm⁻¹. La salinité est moyenne dans cette oasis.
- Oasis d'El Mathouia: la conductivité électrique de l'eau d'irrigation mesurée est de 4,8 dSm⁻¹ au niveau du drain principal. L'oasis souffre d'abord de l'abandon, car la salinisation n'apparaît pas très grave, mais l'eau de drainage à 5,4 dSm⁻¹ est encore de qualité acceptable pour l'irrigation.
- Oasis d'El Aouinet: elle est située en bordure de mer sur des sols gypseux (30 à 40%) à texture fine. La nappe est à 1 m. Elle est abandonnée depuis plus de 14 ans à cause de la salinité excessive des sols. Seuls les palmiers subsistent aux salures actuelles comprises entre 25 et 50 dSm⁻¹.
- Oasis d'El Hamma: elle est alimentée par des sources chaudes de 4,5 dSm⁻¹. Le drainage est gêné par un encroûtement gypseux de nappe. Les cultures sous palmiers sont grenadiers, hénéné et fourrages; les parcelles abandonnées sont envahies par *Halocnemum strobilaceum*, *Artrocnemum glaucum* et *Limonium thumetamum*.
- Oasis de Gabès-Ouest: la nappe est proche de la surface et il s'y forme souvent un encroûtement. L'urbanisation menace, beaucoup de parcelles sont abandonnées et recolonisées par la végétation naturelle propres aux terrains salés: *Zygophyllum album*, *Aeluropus littoralis*.
- Oued Gabès: limons mio-pliocènes gypseux à roses des sables: *Lycium arabicum* (gypsophile), *Rantherium suaveolens* (psammophile), *Astragalus armatus* (psa), *Ligeum spartum* (psa, gyp), *Ononix natrix* (gyp). Le drainage est déficient sur toute l'oasis, qui est envahie par l'urbanisation et la pollution industrielle en bordure de mer.
- Oasis de Gabès-Sud: la nappe est généralement profonde, l'eau est peu abondante. La salure ne se manifeste que par des remontées capillaires localisées.
- Oasis de Zerkine: les sols sont moyennement salés. La nappe est omniprésente à partir de 1,5 m. La salinité de l'eau d'irrigation est d'environ 3,3 dSm⁻¹.

Situation générale à Medenine et Tataouine:

A Medenine, on compte 1050 ha irrigués, avec des eaux de la nappe profonde de la Jaffara titrant 3 à 5 g/l. 150 ha sont irrigués à partir des eaux de nappes phréatiques. Les agriculteurs des régions de Zarzis et Djerba utilisent une multitude de puits dont certains ont une salinité atteignant 6 g/l. Beaucoup de sols salés sont progressivement abandonnés. Deux périmètres sont en création: Féjij (3,8 g/l) et Chambania (6 g/l).

A Tataouine, quatre périmètres principaux se partagent les 1000 ha irrigués à côté de nombreuses petites exploitations extensives. Les sols sont gypseux, peu évolués d'apport alluvial à texture légère, perméables à très perméables. L'eau d'irrigation provient de forage et de puits. sa qualité est variable, de 1,5 à 3.1 g/l, elle est distribuée par conduites enterrées en PVC et répandue à la planche ou à la raie sur les parcelles. Les cultures sont très diverses: maraîchage, fourrages, primeurs, arboriculture. La production est moyenne à faible. Les contraintes à la production sont essentiellement l'insuffisance de l'eau, la forte perméabilité des sols, l'évaporation intense et l'ensablement.

Périmètres à risque à Medenine et Tataouine:

- Oasis de Hmadi (Zarzis): l'oasis est irriguée avec une eau titrant 5 g/l. Les sols sont drainants, mais seulement 50 ha sur les 150 que compte l'oasis ne sont pas envahis par l'urbanisation sauvage.
- Oasis de Souihel: l'oasis est envahie par l'urbanisation et les projets touristiques.
- Oasis d'Ajim: oasis située en bordure sud de l'Ile de Jerba, totalement abandonnée. L'eau est très salée: 7,6 dSm⁻¹.
- Tadina (60 ha) et Tamasint (38 ha): ces deux oasis ont été créées récemment autour de forages profonds dans la Jaffara, mais la qualité des eaux d'irrigation est médiocre, environ 5 g/l.
- Sebket Oum Zessar: formation salée dans un environnement gypso-salin à *Erodium Glaucophyllum*.

2.9- Bibliographie sur les périmètres irrigués salés.

Pour plus de précision sur les caractéristiques pédologiques des périmètres mentionnés ci-dessus, on se reportera aux références suivantes (page 68):

- pour la région de Zaghuan, références n°148, 254, 406,
- pour la zone côtière de Sousse à Sfax compris, références n°10,12,32, 54, 56, 64, 152, 180, 186, 232, 266, 284, 300, 310, 370, 354,418.
- pour toute la vallée de la Mejerda, références n° 58, 62, 94, 98, 100, 102, 122, 124, 154, 176, 194, 228, 230, 270, 302, 304, 314, 316, 320, 336, 338, 340, 372, 394, 396, 408, 440, 442, 444, 514, 530, 546, 556, 570, 588.
- pour les oasis de la région de Gafsa, références n°312, 364, 366, 368, 416.
- pour les oasis de Gabès et Zarzis, références n°: 70, 216, 248, 252, 268, 324, 426, 446, 448, 450, 452, 454, 456, 506, 540.

2.10- Zonation géochimique dans le paysage.

Les sols salés de Tunisie, du Nord au Sud contiennent tous du chlorure de sodium. Mais on trouve aussi des composés beaucoup moins solubles comme le carbonate de calcium et le gypse, ou beaucoup plus solubles comme la bloedite ou la thénardite. Tous ces composés sont des sels, au sens géochimique du terme, des métaux alcalins majeurs du sol, calcium, magnésium, sodium, et potassium. Ce sont des chlorures, sulfates ou carbonates, simples ou composés. Ils se différencient par leur solubilité (tab.2.1). Dans une région climatique homogène et pour un même régime hydrique des sols, plus un sel est soluble, plus facilement et rapidement il sera lessivé hors du profil et hors du bassin versant qui lui a donné naissance.

Mineral	Formule	LogK298,15	
Anhydrite	CaSO ₄	-4,70	(*6)
Arcanite	K ₂ SO ₄	-1,84	(**)
Astrakanite:	MgSO ₄ ,Na ₂ SO ₄ ,6H ₂ O		(1)
Bassanite	CaSO ₄ ,0,5H ₂ O	0	
Bischofite	MgCl ₂ ,6H ₂ O	+4,45	(*5)
Bloedite	MgSO ₄ ,Na ₂ SO ₄ ,4H ₂ O	-2,38	(16)
Calcite	CaCO ₃	-8,37	(*6)
Carnalite:	MgCl ₂ ,KCl,6H ₂ O	+4,10	(*16) (1)
Chloromagnesite	MgCl ₂	+22,08	(*4)
Chlorocalcite	KCaCl ₃	+9,70	(*12)
Dolomite	CaMg(CO ₃) ₂	-17,02	
Epsomite	MgSO ₄ ,7H ₂ O	-2,0	(16)(1)
Gypse	CaSO ₄ ,2H ₂ O	-4,85	(*6)
Halite	NaCl	+1,58	(*6) (1)
Hydrophilite	CaCl ₂	+11,49	(*4)
Hexahydrate	MgSO ₄ ,6H ₂ O	1,85	(**) (1)
Kaïnite	MgSO ₄ ,KCl,3H ₂ O		(1)
Kieserite	MgSO ₄ ,H ₂ O		(1)
Magnesite	MgCO ₃	-8,04	(*6)
Mirabilite	Na ₂ SO ₄ ,10H ₂ O	-1,52	(*10) (1)
Picromerite	MgK ₂ (SO ₄) ₂ ,6H ₂ O	+4,42	(*16)
Polyhalite	CaMgK(SO ₄) ₄ ,2H ₂ O		
Schoenite	MgSO ₄ ,K ₂ SO ₄ ,6H ₂ O	(1)	
Sylvite	KCl	+0,89	(**) (1)
Syngenite	K ₂ SO ₄ .CaSO ₄ H ₂ O		
Thénardite	Na ₂ SO ₄	-0,86	(*10)(1)
Vantoffite	MgSO ₄ .3 Na ₂ SO ₄		

(*6) valeur donnée par l'auteur 6, dans Droubi.

(**) valeur donnée par plusieurs auteurs, dans Droubi

(1) Gueddari, 1980. (4)- Robie et Walbraum (1968)

(5)- Wagman et al. (1968) (6)- Helgeson (1969).

(10)- Berner (1971). 12)- Naumov et al (1971).

(16)- Wood (1972).

Tab.2.1- Solubilité des principaux sels que l'on rencontre dans les sols salés de Tunisie.

Dans notre inventaire des périmètres irrigués salés de Tunisie, on peut distinguer grosso modo trois zones géochimiques: les sols alcalins et salés au Nord d'une ligne Mides-Nabeul, et les sols simplement salés au sud qui se subdivisent dans le paysage en deux zones suivant que le gypse y subit une migration actuelle sous irrigation ou non (Fig.2.1).

DYNAMIQUE DES SELS SOLUBLES

DYNAMIQUE DES SELS PEU SOLUBLES

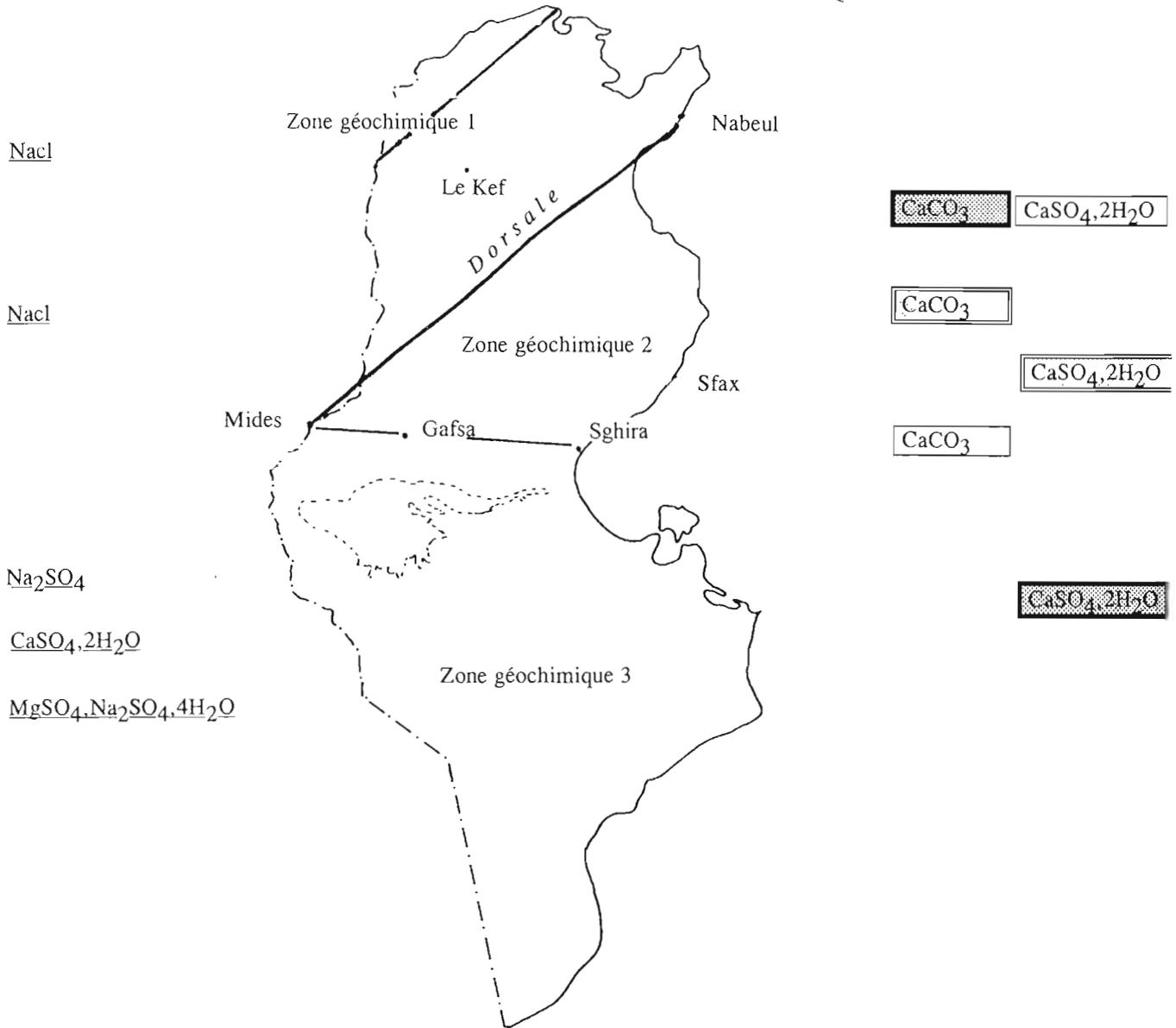


Fig.2.1- Zonation géochimique des sols salés en Tunisie.

LEGENDE

- $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
- $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
- $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
- $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

DYNAMIQUE DES SELS

- précipité en surface,
- diffus dans le profil,
- individualisé (concrétions/nodules),
- immobilisé (croûtes/encroûtements),

- dans la zone (1), au Nord d'une ligne Jendouba-Bizerte, on ne trouve que des sols peu salés. Au Sud jusqu'à la Dorsale, les sols calcimorphes à lessivage partiel de NaCl et dynamique lente du calcaire dans le profil dominant. Les carbonates précipitent en croûtes et encroûtements. La présence de carbonates libres, élève le pH de certains sols peu salés qui deviennent alcalins. La texture des sols est généralement fine, les pluies hivernales favorisent le lessivage des sels.
- dans la zone (2), au Sud de la Dorsale et au Nord de la chaîne des Jebel Ben Younès et Orbata, (grossièrement la ligne Mides-Sghira), apparaît la précipitation de gypse. Le calcaire migre dans le profil sous forme de nodules. Les sols limoneux dominant induisant des remontées capillaires plus importantes que dans le Nord. De grands bassins versants se terminent en sebkha (Sebkha Kelbia, Sebkha Sidi El Hani, Sebkha Cherrifa, entre autres). Les sols salés y sont souvent hydromorphes au centre et alcalisés sur les bordures.
- enfin dans la zone (3), au Sud du Jebel Orbata apparaissent en surface des sels très solubles, sulfates de magnésium et de sodium, les encroûtements gypseux se généralisent, les roses des sables se forment au contact des zones d'accumulation des eaux. Les carbonates ne forment plus ni croûtes ni nodules. Ils migrent lentement dans le profil contrairement aux sels de sodium et magnésium dont la circulation dans le paysage est très rapide. La salinité globale des sols se maintient à un niveau élevé toute l'année.

Du Nord au Sud, la part des sulfates dans la composition anionique et celle du magnésium dans la composition cationique des nappes et des solutions du sol augmentent régulièrement. A la zonation géochimique se surimpose une différenciation des sols salés suivant leur position géomorphologique dans le paysage.

2.11- La répartition géomorphologique.

Dans chaque grande région géochimique, chaque portion de paysage comprend une partie haute, une partie intermédiaire où se produit l'infiltration et le ruissellement, et une partie basse où s'accumulent les transports solides fins et où s'évaporent les sels. On y trouve la séquence de sols suivants, de haut en bas des versants:

- les sols peu évolués d'apport colluvial à texture grossière constituant l'infero-flux,
- les sols salins non hydromorphes: l'apport colluvial (bas de pente) ou alluvial (terrasses) contient du sel qui migre en profondeur en hiver et remonte en surface en été.
- les sols salins hydromorphes: ce sont les sols de bas-fonds, présents dans tous les petits bassins versant endoréiques des zones (2) et (3) lorsque la nappe phréatique est à moins de deux mètres de profondeur. Selon la position de la nappe dans le profil, on distingue:
 - les sols dont la nappe varie saisonnièrement: des efflorescences peuvent apparaître mais sans former de croûte ou encroûtement salin en surface en été. En hiver, les sels entraînés vers la nappe sont dilués. C'est le cas des sols salins du Nord. L'hydromorphie se concrétise par un pseudo-gley ou un gley de profondeur.
 - les sols dont la nappe est constamment près de la surface: l'hydromorphie se traduit par un gley pouvant comporter des taches d'oxydation surmontant un horizon noir à sulfures. L'accumulation de sels en surface forme une croûte saline blanche.

Cette séquence de sols présente des variantes suivant la zone géochimique concernée, (fig.2.2 à 2.4).

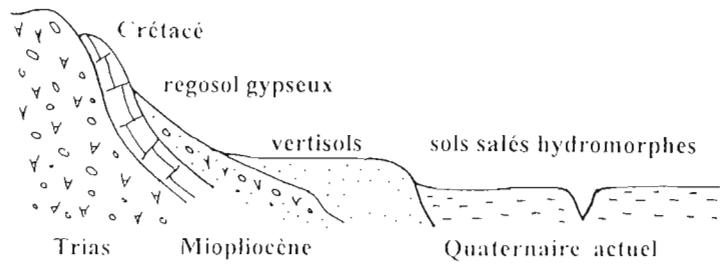


Fig.2.2- Situation géomorphologique de sols salés dans la Haute Vallée de la Mejerda: exemple de Zama-Bouزيد (le passage entre les vertisols et les sols hydromorphes est progressif).

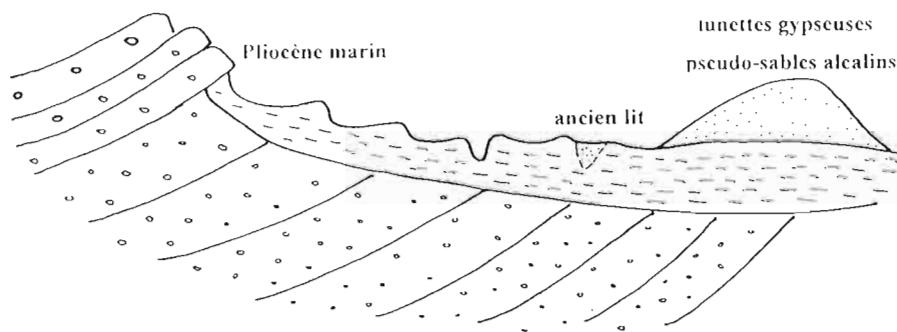


Fig.2.3- Situation géomorphologique en amont du périmètre de Kalaât El Andalou (niveau de Garaet El Mabtoub), dans la Basse Vallée de la Mejerda. Exemple de sols salés sur matériaux allochtones.

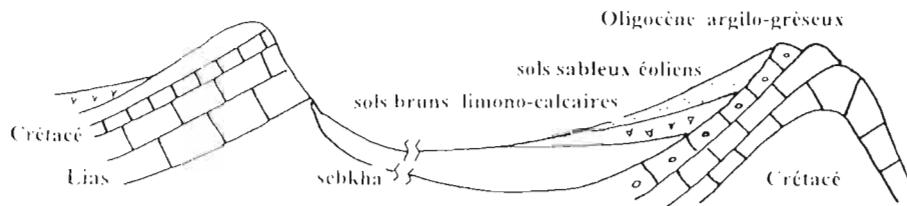


Fig.2.4- Situation géomorphologique de sols salés du périmètre de Sidi-Saâd dans le Kairouanais.

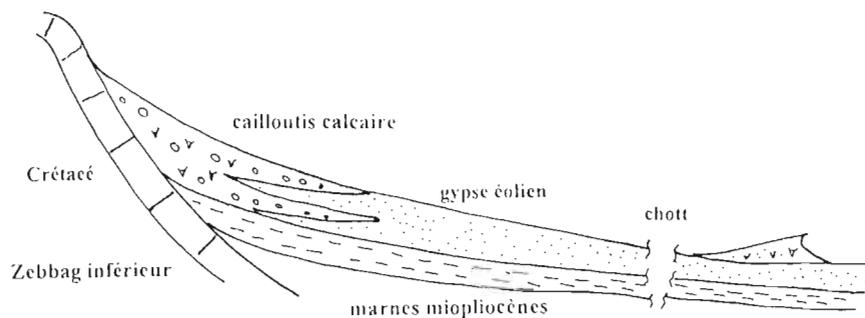


Fig.2.5- Situation géomorphologique de sols salés dans le Sud (El Guettar).

2.13- Conclusion.

Nous avons tiré de cet inventaire des périmètres irrigués salés de Tunisie deux types de conclusions:

A l'intention des aménageurs:

L'agriculture irriguée est particulièrement coûteuse et délicate sur la plan pratique à mettre en oeuvre. En règle générale, dans les périmètres expertisés, l'intensification reste trop faible en regard des investissements importants que suppose l'agriculture irriguée et l'aménagement hydraulique du paysage. Les efforts doivent porter dans l'ordre sur les points suivants:

- l'optimisation de la gestion de l'eau à la parcelle (partout),
- l'amélioration du drainage qui reste insuffisant dans le Nord, et quelquefois surabondant dans le Sud (Nefzaoua),
- l'adéquation des superficies irriguées par rapport aux quantités d'eau disponibles et par rapport aux rendements escomptés: les parcelles sont souvent trop grandes dans les Périmètres Publics, et presque toujours trop petites dans les périmètres privés.

Dans certains périmètres, la salure affecte initialement les sols. Le drainage des périmètres et l'entretien du réseau doivent être améliorés dans la majorité des périmètres aménagés dans des plaines endoréique (Nefzaoua) ou à faible pente (Vallée de la Mejerda: Mornaguia, Cebalat...). Les solutions techniques existent, comme le nivellement des terres et la maîtrise des irrigations, la rotation des cultures, la conservation de la fertilité des sols, etc.. L'accroissement des productions jusqu'à présent s'explique plus par l'augmentation des superficies que par une augmentation de la productivité.

Les aménagements doivent en particulier être adaptés aux conditions hydro-pédologiques des régions quitte à définir des secteurs à ne pas aménager au sein d'un même périmètre. Dans les créations récentes, on a tenu compte de la variabilité spatiale des paramètres pédologiques pour le drainage des terres. Des drains enterrés sont posés dans les secteurs à drainage externe très réduit (Kalaât Landelous, Souk Sebt). Ces pratiques doivent être généralisées.

Dans certains périmètres, les spéculations pratiquées ne conviennent pas aux vocations des terres. On assiste par exemple à l'expansion de l'arboriculture dans les sols à nappe superficielle bien que les études pédologiques initiales l'aient déconseillé.

Ces contraintes sont diversement ressenties suivant le savoir-faire de l'agriculteur. Dans les régions où l'irrigation est une pratique ancienne (Oasis et plaines côtières), l'agriculteur use de son expérience pour mieux valoriser l'eau et le sol. Dans les périmètres nouveaux (Vallée de la Mejerda et Kairouanais), une période de rodage de l'agriculteur au mode d'irrigation et aux spéculations retenues est nécessaire. L'agriculteur n'adhère pas à la reconversion décidée pour lui par les techniciens. Plusieurs mesures d'encouragement sont quelques fois nécessaires, de même un travail de vulgarisation et de sensibilisation est attendu.

Nous avons participé à l'encadrement sur ce sujet deux étudiants de l'INAT (Mmrs Bach-Hamba et Bouksila) en 1991 et 1992 sur le périmètre irrigué de Kalâat Landelous, Basse Vallée de la Mejerda), pour leur mémoire de cycle de spécialisation (3ème cycle INAT, professeur: Mr Ali Mhiri).

A l'attention des chercheurs:

Il y a très clairement trois niveaux de manifestation de la salure dans le paysage tunisien:

Le niveau le plus perceptible est celui de l'agriculteur propriétaire. C'est un problème qui se pose sur de toutes petites surfaces, dans un laps de temps court, une ou deux années après la mise en culture. C'est un problème de gestion à la parcelle. Les propriétés hydrodynamiques des sols sont suffisamment bien connues à ce niveau, l'évolution de la salure des sols dans le temps et sa distribution à l'intérieur du profil également. Les recherches à mener concernent les besoins en eau des cultures et leur résistance à la salure en fonction de la qualité des sols et des pratiques culturales (fumures, lessivages partiels).

Le deuxième niveau est celui des périmètres irrigués gérés par les sociétés de mise en valeur. A peu d'exceptions près, tous ont au moins un secteur dont les sols se salent. Ce n'est pas toujours la partie la plus aval, quelquefois le nivellement de départ est en cause. La salure provient d'une mauvaise gestion de l'eau. Le problème peut être étudié à moyen terme (deux à trois ans). De simples bilans hydriques doivent permettre de situer le niveau des économies d'eau à faire. Dans ce cas, les recherches à mener sont celles de la distribution des sels dans l'espace.

Le troisième est celui des régions qui constituent des ensembles hydro-pédologiques cohérents: la Vallée de la Mejerda, la Nefzaoua, les steppes du Centre. L'eau utilisée en amont, se retrouve dans le paysage aval. Les périmètres irrigués n'ont pas un fonctionnement hydrique indépendant. Chacun contribue à la salinisation des sols et des eaux de l'ensemble du bassin versant. Les recherches à mener sont celles de l'évolution des paysages à long terme, sur les quantités de sels qui migrent et se fixent dans les parties basses. Il s'agit de recherches à caractère novateur, rarement entreprises sur des régions entières.

Faut-il un programme national ou des programmes régionaux?

Compte tenu de la diversité de chaque région, il y a deux conditions à réunir:

- d'abord, les informations concernant la gestion des ressources en eaux et en sols doivent être répertoriées dans une banque de données qui serait constamment alimentée et réactualisée. Le volet gestion de l'eau est celui qui manque le plus en Tunisie, les données pédologiques quant à elles sont suffisantes.
- ces recherches ne peuvent être menées que par un groupe constitué ad hoc. En effet il existe dans les structures du Ministère de l'Agriculture des instituts de recherche ou des directions techniques vouées aux ressources en eau (DGRE), à leur mobilisation et aménagement (GR, EGTH), à leur distribution (CRGR), à l'étude des sols (DS), à celle de leur conservation (DS et CES), à la protection de l'environnement (ANPE), à la mise en valeur au niveau régional (CRDA). L'intervention des ingénieurs et chercheurs se situe donc à tous les niveaux, mais en fin de compte c'est l'agriculteur qui détient les clés de l'utilisation de l'eau. A ce niveau l'on sait si peu de choses sur l'utilisation de l'eau (besoin en eau des cultures dans des régions qui ont pourtant des climat bien différents) que les gaspillages éventuels ne sont ni quantifiés ni sanctionnés. On se reportera aux recommandations du Séminaire Direction des Sols/Orstom, "Gestion des eaux et des sols dans les oasis" des 8-9 décembre 1993 à Tozeur.

CHAPITRE III

ETUDE DES SOLS SALES PAR CONDUCTIVIMETRIE ELECTROMAGNETIQUE

3.1- Introduction.

L'évaluation de la salure des sols n'est pas sans poser quelques problèmes. Elle se mesure habituellement par la conductivité électrique de l'extrait aqueux d'un échantillon de sol saturé d'eau. Cette mesure est faite en laboratoire, elle est très précise, mais longue à mettre en oeuvre. Elle a de plus l'inconvénient de ne représenter qu'un faible volume de sol, de l'ordre du dm^3 . Or les recherches actuelles sur la géochimie des systèmes agraires affectés par les sels ont mis en lumière la grande variabilité spatio-temporelle de la distribution des sels dans les sols. Dans les périmètres irrigués de Tunisie, cette variabilité est maximum dans le premier mètre du sol, siège des flux hydriques les plus importants.

Pour améliorer les rendements des cultures irriguées, il faut lessiver les sels hors du volume racinaire avec la quantité minimum d'eau. Cela suppose que l'on puisse mesurer la salure du sol intégrée sur le premier mètre du sol à peu près, avec une maille serrée et un pas de temps court. Pour ne pas perturber le fonctionnement du sol lors de ces mesures, il faut opérer sans prélever d'échantillon. Des essais menés dans les années quatre vingt ont montré l'intérêt des mesures de salinité globale (El Oumri et Vieillefon, 1983). La conductivimétrie électromagnétique (CEM) est une manière d'apprécier non seulement la salure globale des 200 premiers cm de sol, avec l'appareillage que nous utilisons, mais aussi de déterminer l'allure du profil salin en chaque point de mesure (Job et al., 1987). Cette méthode a donc été choisie pour sa souplesse et sa rapidité pour suivre la salure des périmètres irrigués en Tunisie.

Dans ce chapitre, nous allons rappeler les fondements et la manière d'utiliser cette méthode qui a été très utilisée au cours de notre programme de suivi de la salure.

3.2- Salure et conductivité électrique des sols.

- Conductivité d'un échantillon de sol:

Les sols salés naturels des régions arides contiennent surtout des composés du calcium, du sodium ou du magnésium. Ce sont principalement des chlorures, sulfates et carbonates, plus rarement des nitrates. En présence d'eau, ces ions se déplacent soit dans l'eau qui remplit les pores, soit à la surface des grains. Le meilleur modèle de calcul de la conductivité σ d'un volume de sol (Rhoades et al., 1976), consiste à supposer que les conductivités interstitielles σ_e et surfaciques σ_s , s'ajoutent, comme pour des conducteurs en parallèle. On écrit alors:

$$\sigma = \sigma_e (nS)^m + \sigma_s \quad (1)$$

Formule dans laquelle on reconnaît en premier terme la loi d'Archie (1942), n étant la porosité du sol, m un paramètre expérimental proche de 2, dépendant de la forme des grains du sol, supposée connue et unique, et S le degré de saturation en eau en % volumique.

Cette relation explique partiellement les phénomènes physiques mis en jeu, en particulier elle justifie le choix que nous avons fait de sélectionner les périmètres en fonction de la porosité de leurs sols, mais dans la mesure où les grandeurs σ_e et σ_s ne sont pas facilement déterminables, elle ne permet pas d'évaluer la salure du sol *in situ*. L'approche expérimentale est obligatoire.

En pratique, on prélève un échantillon de sol d'une centaine de grammes que l'on imbibe d'eau jusqu'à obtention d'une pâte juste saturée. On laisse l'équilibre sol-eau se faire, on extrait l'eau absorbée et on en mesure la conductivité électrique du liquide obtenu, appelé par contraction "extrait saturé". Cette mesure, notée ici CEsat, représente par convention la salure du sol (Richards, 1954), bien qu'elle souffre d'un certain nombre d'imperfections, en particulier, l'extrait saturé ne dissout pas la totalité des sels, mais seulement les plus solubles, il y a donc une ségrégation entre les ions (fig.3.1),

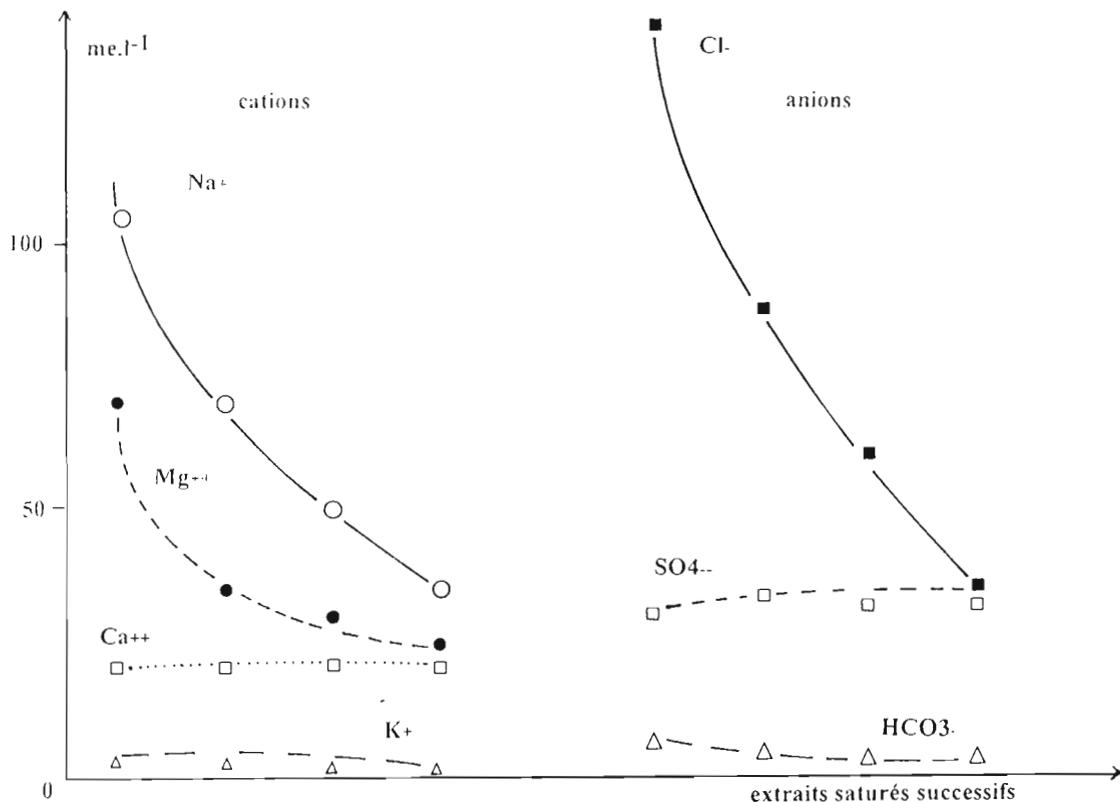


Fig.3.1- Extraction successive des sels d'un sol gypseux d'oasis par l'extrait à saturation (El Guettar).

- Chaque ion en solution possède une conductivité électrique équivalente propre. Une même valeur de CE_{sat} peut donc correspondre à une infinité de combinaisons ioniques qui chacune correspond à une valeur pondérale de sels différente (tab.3.1),

Ion	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	H ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	CO ₃ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	OH ⁻	NO ₃ ⁻
λ_n	59,5	53,0	50,1	73,5	349,8	76,3	80,0	69,3	44,5	198,3	71,5

Tab.3.1- Conductivité équivalente limite ($S.cm^2.e^{-1}$ à 25°C) des principaux ions que l'on rencontre dans les sols (Robinson et Stokes, 1959).

- Dans la gamme des salures rencontrées dans les sols, ce sont les logarithmes de la concentration ionique et de la conductivité électrique qui sont proportionnels. Le coefficient de proportionnalité dépend de la composition de la solution, du rapport des concentrations des ions bivalents et monovalents en particulier (tab.3.2). La valeur de CE_{sat} ne renseigne donc qu'imparfaitement sur la quantité pondérale des sels en solution.

référence	a	n	b	validité (CE en $dS.m^{-1}$)
Richards (1954)	9,92	1,091	0	4-50
Servant (1966)	9,9	1	0,2	0-35
Mc Neal (1970)	12,88	1	-3,61	0-10
Le Brusq et Loyer (1982)	8,9	1,075	0	0-60
Job (1985)	10,3	$2,3 + 0,01f^*$	0	0-100

Tab.3.2- Correspondance entre la concentration des solutions du sol (C_0 en $me.l^{-1}$) et sa conductivité électrique (CE en $dS.m^{-1}$): valeur des coefficients a et b de l'équation $C_0 = a.CE^n + b$, *avec: $f = (Ca + Mg + SO_4) / (Cl + Na + K + NO_3 + HCO_3)$, où Ca, Mg..., sont en $me.l^{-1}$.

La conductivité électrique de l'extrait saturé reste cependant une valeur reproductible et précise d'un laboratoire à l'autre (Job, 1979; Pleijsier, 1990) ce qui justifie son emploi généralisé comme étalon. Le pourcentage de saturation en eau donne de surcroît une idée de la texture de l'échantillon.

Conductivité d'un profil de sol.

A l'incertitude liée à la mesure sur un échantillon, s'ajoute celle qui tient à la distribution spatiale des sols dans le paysage. Si l'on prend comme exemple les sols des oasis de Gafsa, irrigués de manière traditionnelle par planches de 100 à 200 mètres carrés seulement, sur des sols limono-sableux perméables ($k_s = 2,5.10^{-5} cm.h^{-1}$), il y a trois échelles à l'intérieur desquelles on ne peut appréhender la salure du sol de la même manière: la planche d'irrigation, la parcelle, le périmètre irrigué en entier.

1)- La planche est la plus petite surface ayant une individualité géochimique en agriculture irriguée. Prenons par exemple le cas d'une parcelle cultivée en luzerne sous palmiers (fig.3.2). La conductivité électrique de l'extrait saturé y croît en profondeur, le rapport des concentrations des ions Ca^{++}/Mg^{++} y diminue. Ce sont les signes d'une irrigation qui lessive les sels en profondeur. Un prélèvement d'échantillons tous les 30 cm à partir d'un point en surface peut en rendre compte, un seul échantillon ne suffit pas. Cette homogénéité se manifeste sur quelques mètres carrés seulement.

2)- La situation d'une parcelle est différente. La salure du sol y varie d'un point à un autre, suivant la microtopographie, ou suivant que les cultures pratiquées dans les différentes planches requièrent des quantités d'eau différentes (fig.3.3). On ne peut plus se contenter de représenter la salure par un profil, il faut l'intégrer sur le volume de la parcelle.

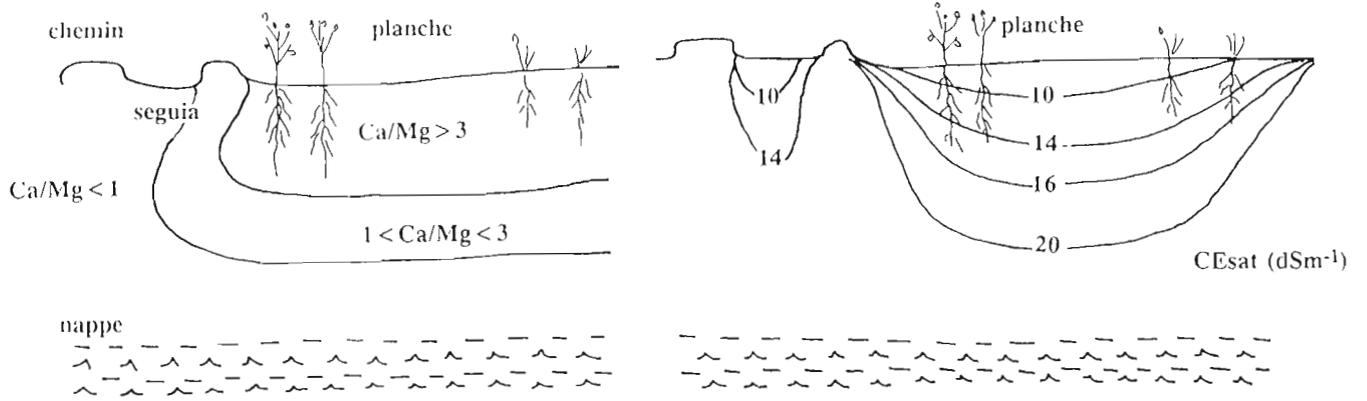


Fig.3.2- Profils salins d'une planche cultivée en luzerne sous palmier. L'irrigation est menée avec un tour d'eau de un mois, avec une quantité voisine de 2000 mm d'eau par an, la nappe est à 180 cm (oasis d'El Guettar, juin 1990, parcelle FH).

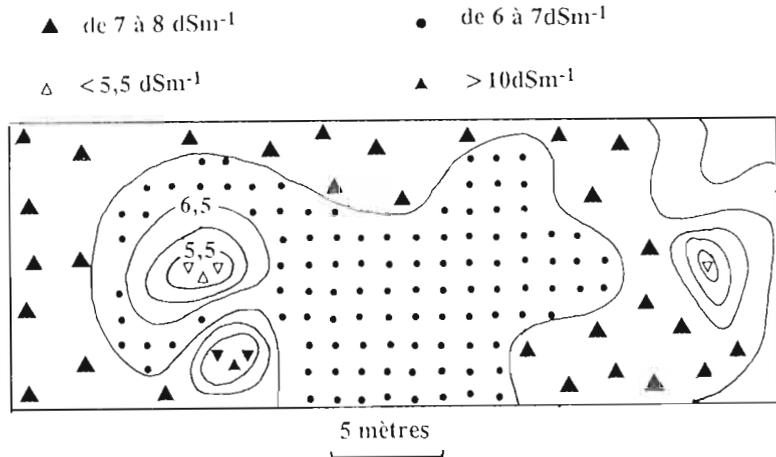


Fig.3.3- Variation de la salure sur une parcelle irriguée à la planche. Carte de la salure moyenne des premiers 120 cm de sol sur une planche plantée sur trois strates. La salure moyenne est 7 dSm⁻¹ avec deux petites planches à moins de 5 dSm⁻¹ et une autre à plus de 10 dSm⁻¹.

3) Enfin, au niveau du bassin versant, seules apparaissent les grandes tendances de salinisation, la variabilité intra-parcellaire n'est plus significative. on trouvera dans les chapitres suivants des exemples de mesures de la salure à de petites échelles (1/20 000 ème).

La figure 3.3 représente des valeurs intégrées de la salure du sol que l'on obtient par calcul à partir des mesures de CE_{sat}, en faisant la moyenne de la salure du sol tous les 20 cm. Le but est ici de calculer la quantité de sels contenue dans le sol pour faire un bilan salin. Pour une approche plus agronomique, il faut intégrer la salure de manière différente. Dès les années soixante, on a proposé (CRUESI, 1970) de prendre comme variable la valeur de la salure apparente globale intégrée sur la profondeur de maximum de densité racinaire et donnant plus de poids au sol de surface, qui importe pour la germination et la levée:

$$CE_{sat(0-80)} = 0,25[2.CE_{sat(0-20)} + CE_{sat(20-40)} + CE_{sat(40-80)}] \quad (2)$$

$CE_{sat(0-20)}$ étant la conductivité de l'extrait saturé d'un échantillon représentatif des 20 premiers cm de sol. Cette valeur, bien corrélée avec les rendements obtenus sur sites expérimentaux, est toujours utilisée en Tunisie (Ben Hassine, 1989). Malgré leur intérêt, toutes ces valeurs de salure intégrées ne peuvent être calculées pour de petites échelles, cela nécessiterait de trop nombreux prélèvements d'échantillons. Il faut donc trouver une méthode non destructive, mais intégrant la salure sur une profondeur connue. La conductivimétrie électromagnétique est une solution dont nous allons démontrer l'intérêt.

3.3-Théorie de la CEM.

La conductivimétrie électromagnétique a été abondamment utilisée par les géophysiciens en prospection minière peu profonde (Wait, 1958), mais ce n'est qu'en 1979 que son application à l'étude des sols a été envisagée (De Jong et al.) avec un appareillage permettant des mesures sur une profondeur compatible avec les exigences des pédologues, soit deux mètres environ.

Le principe en est le suivant: une variation du flux de champ magnétique créé par une bobine émettrice induit dans le sol des courants de Foucault dont l'intensité dépend de la conductivité électrique du sol. Ces courants produisent à leur tour un champ magnétique secondaire qui peut être mesuré par une bobine réceptrice associée à un galvanomètre (fig.3.4).

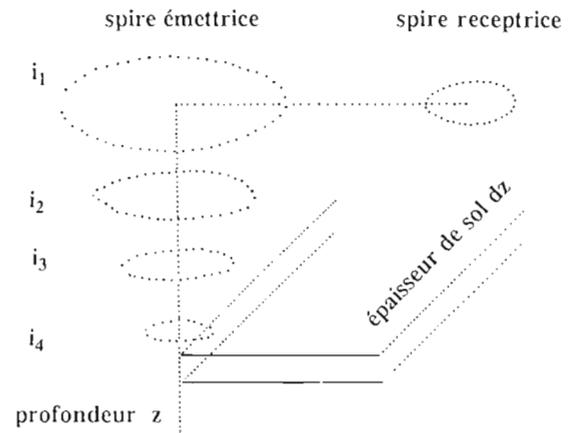


Fig.3.4- Principe de la conductivité électromagnétique dans les sols.

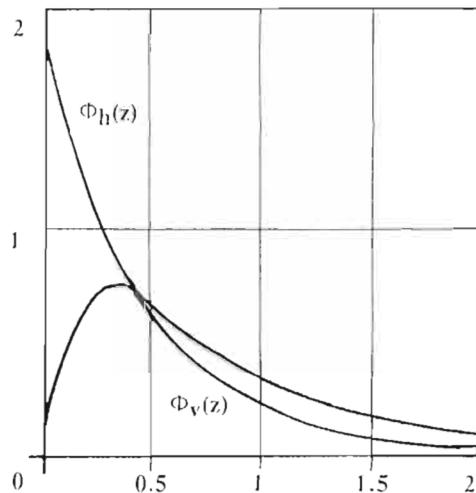


Fig.3.5- Contribution au champ secondaire d'une épaisseur élémentaire de sol située à une profondeur z comprise entre 0 et 2 mètres (configuration valable pour l'appareil EM-38, d'après Mc Neill, 1980).

Le volume de sol pris en compte dans la mesure est théoriquement illimité. Il dépend en fait de l'écartement s entre les bobines d'émission et de réception et de la fréquence f du courant d'excitation. Dans un sol homogène et isotrope, et pour une valeur s égale à 1 mètre, la profondeur théorique de pénétration est de deux mètres à peu près (Fig.3.5) si les bobines sont parallèles et verticales.

En effet, dans l'appareil utilisé, les grand axes des bobines émettrices et réceptrices sont dans un même plan et parallèles. On peut les positionner horizontalement, on travaille alors en mode coplanaire horizontal, dit CPH, ou verticalement, (mode CPV). Le champ secondaire produit dans les deux cas étant différent, la réponse d'une épaisseur de sol dz située à la profondeur z n'est pas la même. On obtient donc en un même point deux mesures distinctes, notées CEV et CEH.

On peut donc différencier les profils salins à partir d'un couple de mesure CEV-CEH et trouver ainsi une variable représentative de la dynamique de sels. Mais les courbes théoriques de la figure 3.5 sont obtenues pour un milieu homogène et isotrope en salure et teneur en eau. Dans la pratique, de tels milieux sont exceptionnels. Il faudra donc considérer les conditions naturelles de terrain.

3.4- Utilisation pratique de la CEM.

Les mesures prises en chaque point, CEV et CEH, sont étalonnées par rapport à la salure du sol en ce point, intégrée d'une manière ou d'une autre. Suivant le degré de précision requis, on répète l'étalonnage par famille de sol, ou seulement par classe de texture (fig.3.6).

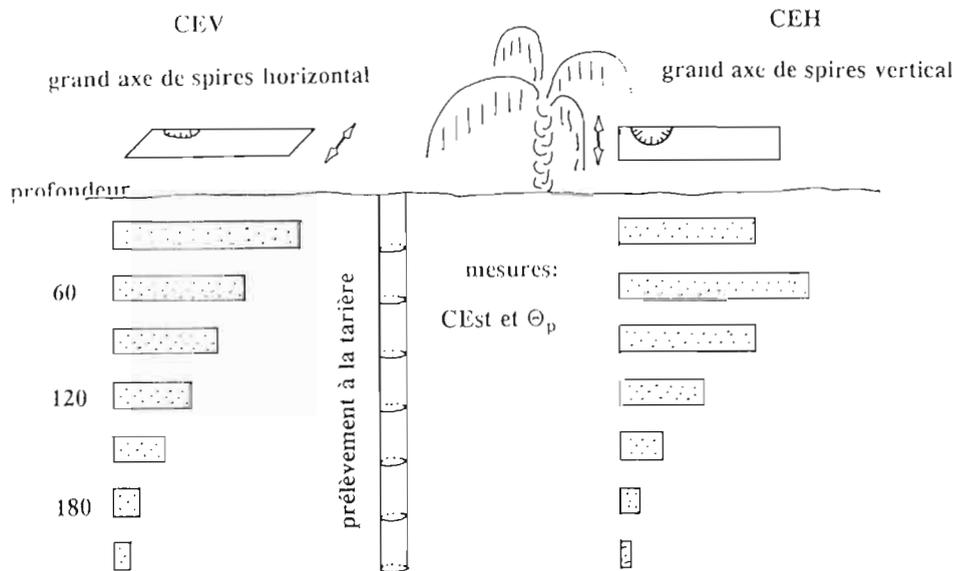


Fig.3.6- Principe de l'étalonnage sur le terrain des mesures CEV et CEH.

Des étalonnages ont été faits par comparaison avec la méthode électrique dite quadripôle (Rhoades et Ingvalson, 1971), mais aussi directement par rapport à la conductivité électrique de l'extrait saturé intégrée sur le premier mètre du sol (De Jong et al., 1979; Job et al., 1987; Herrero et Barcro, 1991). Parce qu'elles s'appliquent à des sols dont la teneur en eau n'est pas prise en compte, ces équations (tab.3.3) n'ont pas de portée générale.

α	β	n	r	ref:	Type de sol et lieu de prélèvement
0,052	-0,6	12	0,930	(1)	Solonetz bruns limoneux, Canada
0,056	0,75	100	0,874	(2)	Argile miocène gypseuse, Espagne
0,082	-2,22	60	0,953	(3)	Sol brun steppique argilo-limoneux, Canada

Tab-3.3-Etalonnage de la valeur $CEH(\theta)$ par rapport à la salure intégrée du sol à faible profondeur.

(1) De Jong et al., 1979: $CEsat_{(0-120)} = 0,33[CEsat_{(0-30)} + CEsat_{(30-60)} + CEsat_{(60-90)} + CEsat_{(90-120)}]$.

(2) Herrero et Bercero, 1991: $CEsat_{(0-100)} = 0,25[CEsat_{(0-25)} + CEsat_{(25-50)} + CEsat_{(50-75)} + CEsat_{(75-100)}]$.

(3) Wollenhaupt et al., 1986: $CEsat_{(0-120)} = 0,01[54CEsat_{(0-30)} + 26CEsat_{(30-60)} + 13CEsat_{(60-90)} + 7CEsat_{(90-120)}]$

Pour estimer la salure globale de sols irrigués, il faut exprimer les mesures de CEM à une valeur de l'humidité pondérale θ_p de référence, soit 20% pour choisir une valeur proche de la moyenne réelle de sols irrigués à texture équilibrée.

Pour cela, on prend 43 profils de salure moyenne sur 120 cm, $CE_{sat(0-120)} = 3,1 \pm 0,1$ dSm^{-1} pour lesquels on établit une corrélation simple entre CEH et θ_p :

$$CEH(20) = CEH(\theta_p) + 5,4(20 - \theta_p) \quad \text{avec: } 13 < \theta_p < 25 \quad \text{et } r = 0,847 \quad (3)$$

Cette équation permet de rapporter à $\theta_p = 20$, toutes les mesures faites dans la gamme des teneurs en eau θ_p que l'on rencontre dans les parcelles d'un périmètre irrigué à un instant donné, soit dans notre cas entre 8 et 28%.

On mesure ensuite sur une trentaine de points CEV et CEH, on y prélève tous les vingt centimètres de profondeur un échantillon dont on détermine la moyenne des conductivités d'extraits à saturation au laboratoire, et on ramène avec l'équation (3) les mesures de CEH à $\theta_p = 20$. On établit la corrélation entre $CE_{sat(0-120)}$ et $CEH(20)$, soit:

$$CE_{sat(0-120)} = 0,094CEH(20) - 4,68 \quad n = 31 \quad r = 0,964 \quad (4)$$

équation valable pour: $2 < CE_{sat(0-120)} < 40$

Cette relation permet de connaître la salure moyenne en n'importe quel point pourvu que l'on puisse y déterminer θ_p . Cette valeur est mesurée ou estimée à 5%, dans ce dernier cas l'erreur faite dépend de la salure globale. Elle n'excède pas 25 % (fig3.7).

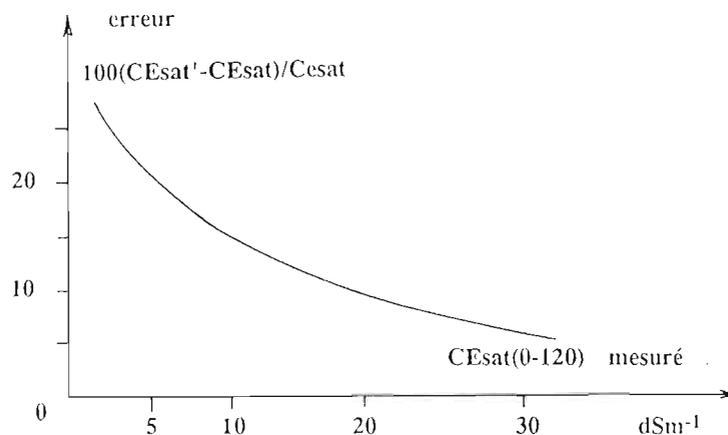


Fig.3.7- Erreur d'estimation sur $CE_{sat(0-120)}$ pour une estimation de $\theta_p = 20 \pm 5\%$ suivant la salure du sol.

Même si les corrélations entre CEM et $CE_{sat(0-120)}$ sont bonnes, la mesure reste influencée par les horizons sous-jacents. Des mesures plus fines seront nécessaires sur chacun des sites étudiés.

3.5-Estimation des profils salins.

La différence entre les modes de mesures verticaux et horizontaux permet, en théorie, de résoudre les profils salins. Soient en effet $\Phi_v(z)$ et $\Phi_h(z)$ les contributions respectives à la mesure CEM d'une couche élémentaire de sol située à une profondeur normalisée z , (rapport de la profondeur à la distance interspire e). La théorie montre que dans un milieu homogène:

$$\Phi_v(z) = 4z/(4z^2 + 1) \quad (6)$$

et:
$$\Phi_h(z) = 2 - 4z/(4z^2 + 1)^{1/2} \quad (7)$$

$$\int_0^z \Phi_v(z) dz = Hsv \quad (8)$$

$$\int_0^z \Phi_h(z) dz = Hsh \quad (9)$$

Hsv étant proportionnel à CEV et Hsh à CEh par construction.

Les valeurs des intégrales (8) et (9) sont données pour différentes profondeurs dans le tableau 3.4. L'intégrale (8) est plus grande entre les bornes 0 et 0,8 qu'entre 0,8 et 2. Autrement dit, en mode horizontal les couches superficielles donneront une réponse relative plus grande que les couches profondes. Au contraire la valeur de l'intégrale (9) est sensiblement identique pour les deux régions séparées par $z = 0,8$. Ce qui signifie qu'en mode vertical les couches superficielles de 0 à 80 cm (si $e=1$) auront la même réponse relative que le reste du demi-espace.

prof.h	0-20	0-40	0-60	0-80	0-100	0-120	0-200	0-300	∞
CEV	8	23	37	48	58	63	77	84	100
CEH	33	53	65	73	78	81	88	90	100

Tab.3.4- Contribution en % d'une épaisseur de sol située entre 0 et h cm à la lecture de CEM en mode vertical (CEV) et horizontal (CEH), pour l'appareil EM-38 de Geonics.

En mode horizontal, 81 % de la mesure provient des premiers 120 cm de sol. Donc si on étalonne la réponse de l'appareil par rapport à des prélèvements tarières faits de zéro à 120 cm c'est la mesure CEH qu'il faudra utiliser dans la corrélation avec la salinité vraie du sol.

Si le profil salin est homogène, la salinité est alors systématiquement sous-estimée de 19%. Sinon CEH est surestimé par rapport à $CE_{sat}(0-120)$ lorsque le profil salin est croissant et sous-estimé dans le cas contraire. D'où la nécessité de faire des mesures différentielles pour éliminer ce biais.

Les valeurs du tableau 3.4 ne sont valables en toute rigueur que pour un milieu homogène et de conductivité verticale constante. Ce n'est que rarement le cas dans les sols. Dans la pratique, les lignes de courant tendent à se concentrer dans les couches de conductivité élevée. Cependant dans la plupart des cas les horizons salins sont suffisamment continus pour qu'on puisse les considérer comme homogènes (Job et Askri, non publié).

Si le profil hydrique du sol n'est pas trop accentué, par exemple en fin de ressuyage, on peut distinguer les profils salins ascendants et descendants directement sur le terrain en se basant sur la valeur du rapport CEV/CEH. En première approximation, si $CEV > CEH$ le profil salin est descendant et vice versa.

L'appareil que nous avons utilisé au cours de notre étude sur les périmètres irrigués tunisiens, l'EM-38 de Geonics, dispose de deux bobines coplanaires distantes de 1 mètre. Il ne permet pas de différencier les salinités de deux couches de sol comprises entre 0 et 50 cm. Ce sont pourtant celles qui subissent le plus de variation d'état hydrique et salin sous irrigation en milieu aride, d'où l'intérêt de faire des mesures en mode horizontal. C'est la raison pour laquelle nous avons construit un appareil avec une distance interspires plus faible et une fréquence d'excitation du courant mieux adaptée à la mesure des salures de surface du sol (Job et al, 1992).

Parce qu'il est difficile d'apprécier les profils hydriques en tout point du sol, et que la répartition des sels est rarement homogène, l'interprétation basée sur les courbes théoriques données Chap.I est hasardeuse. On s'efforcera d'utiliser des méthodes d'interprétation par différence de deux mesures pour supprimer les biais éventuels.

A chaque point de prélèvement on fait deux mesures de conductivité apparente globale du sol: une mesure en mode vertical (CEV) et une mesure en mode horizontal (CEH).

L'influence de chaque horizon salin sur la mesure finale n'est pas la même dans les deux cas. En supposant que la salinité et l'humidité du sol soient uniformément répartie de 0 à 200 cm de profondeur, on aura:

$$CEV = a (37 CE_{sat(0-60)} + 26 CE_{sat(60-120)} + 19 CE_{sat(120-200)}) + b \quad (10)$$

$$CEH = a' (65 CE_{sat(0-60)} + 16 CE_{sat(60-120)} + 7 CE_{sat(120-200)}) + b' \quad (11)$$

Les coefficients a , a' , b , et b' s'obtiennent en choisissant plusieurs points d'étalonnage, cinq à dix, en général. Ils dépendent de la texture du sol, de sa porosité, de son humidité au moment de la mesure. On peut alors résoudre les équations (10) et (11) en négligeant la salure des horizons 120-200 cm et b et b' , qui représentent la conductivité du matériau brut. Si l'on pose:

$$s = CE_{sat(0-60)} / CE_{sat(60-120)} \quad r = CEV / CEH \quad \alpha = a' / a$$

on trouve:

$$s = (26\alpha - 16r) / (25r - 37\alpha) \quad (12)$$

Une fois l'étalonnage fait pour les équations (10) et (11), on mesure CEV et CEH d'où l'on déduit s .

Cette résolution n'est juste en théorie que si les profils salins et hydriques des points mesurés ont la même allure que ceux des points d'étalonnage et si les profils salins sont sensiblement identiques au cours de la prospection (Wollenhaupt, 1986). Là encore, la pratique montre que l'écart par rapport aux valeurs théoriques est assez faible.

3.6- Résultats d'étalonnage sur les périmètres irrigués de Tunisie.

Nouvelle Utique, Basse Vallée de la Mejerda (Zantour, 1990):

L'étalonnage a été fait sur des sols peu évolués d'apport à caractère vertique, avec des signes d'hydromorphie et d'halomorphie en profondeur. La texture est limono-argileuse fine, sur une assise argileuse située à 120 cm de profondeur. La nappe phréatique remonte fréquemment jusqu'à 60 cm de la surface en hiver. Les relations trouvées sont:

$$CEst_{(0-120)} = 0,065CEH(20) - 4,33 \quad n=10 \quad r=0,860$$

Cebala Ben Ammar, Basse Vallée de la Mejerda (Hachicha et Trabelsi, 1990):

L'étalonnage a été fait sur des sols alcalisés lourds hydromorphes par endroits, de salure moyenne sur les 120 premiers centimètres comprise entre 1,5 et 14,5 dS.m⁻¹ et une gamme de teneur en eau pondérale allant de 0,17 à 0,35.

$$CEsat_{(0-120)} = 0,043 CEH(23) - 1,93 \quad n=72 \quad r=0,849$$

Zama-Bouزيد, Haute Vallée de la Mejerda (Bransia et Job, 1990):

L'étalonnage a été fait sur des sols argileux lourds hydromorphes. La nappe se trouve à 150 cm en été, elle remonte vers 60 cm en hiver dans les parties basses du périmètre. La salure est peu importante et peu différenciée dans l'espace. Les relations trouvées sont:

$$CEst_{(0-120)} = 0,075.CEH - 0,230 \quad n=25 \quad r=0,984$$

$$CEH(\theta_2) = CEH(\theta_1) + 4,3(\theta_2 - \theta_1) \quad n=7 \quad r=0,880$$

Zaghuan:

L'étalonnage est fait sur des sols peu évolués d'apport alluvial, argileux, sans nappe phréatique proche de la surface:

$$CEst_{(0-120)} = 0,19 CEH \quad n=4 \quad r=0,860$$

Zelba, région de Mahdia (Job et Ben Hassine, 1991):

L'étalonnage est fait sur des limons calcaires à nodules, sur des parcelles de très petite taille, irriguées très irrégulièrement. On trouve:

$$CEsat = 0,085 CEH(20) - 2,24 \quad n=16 \quad r=0,927$$

Essaafet (Mahdia):

L'étalonnage est fait sur tout le petit périmètre dont la texture des sols varie de limono_sableuse à limono-argileuse.

$$CEst_{(0-120)} = 0,017 CEH(20) + 1,36 \quad n=46 \quad r=0,970$$

Sidi Saâd, Kairouanais (Ben Hassine et al., 1988a):

Les sols sont sablo-limoneux à limono-argileux suivant leur position topographique. Ils sont peu salés en amont, très salés en aval aux abords de la sebkha:

$$CEst_{(0-120)} = 0,05 CEH(20) - 0,85 \quad n=10 \quad r=0,900$$

Zaafrana III, Kairouanais (Hachicha, 1990):

L'étalonnage sur les sols peu évolués d'apport alluvial à texture fine avec un encroûtement de gypse à la profondeur de 80 cm donne les résultats suivants:

$$CEcin_{(0-120)} = 0,023 CEH(20) - 0,098 \quad n=5 \quad r=0,905$$

Medjez El Bab (Braouli, 1990):

$$CEst_{(0-120)} = 0,0055 CEH - 0,064 \theta_p \quad n=46 \quad r=0,970$$

$$CEst_{(0-120)} = 0,017 CEH(20) + 1,36 \quad n=46 \quad r=0,970$$

Oasis de Tarfaya, Nefzaoua (Zidi et al., 1993):

L'étalonnage est fait sur des sols limono-sableux interstratifiés avec du gypse lenticulaire éolien (entre 20 et 40%), avec une nappe située entre 60 et 200 cm de profondeur dans l'endroit étudié:

$$CEst_{(0-120)} = 0,11 CEH(\theta_p) - 0,08 \theta_p \quad n=4 \quad r=0,860$$

et: $CEst_{(0-120)} = 0,095 CEH(20) + 0,098 \text{ gypse \%} \quad n=21 \quad r=0,957$

Oasis de Gafsa-Lela (Job et Merai, 1992):

L'étalonnage est fait dans une parcelle plantée d'oliviers, irriguée régulièrement, sur des alluvions d'oued, limono-sableuses, contenant 23% de calcaire et 10 à 40 % de gypse. La nappe se situe entre 1 et 3 mètres suivant la topographie.

$$CEst_{(0-120)} = 0,08 CEH + 0,072 \theta_p \quad n=21 \quad r=0,918$$

$$CEst_{(0-120)} = 0,09 CEH(17) \quad n=11 \quad 0,15 < \theta_p < 0,19$$

Oasis de Gafsa Sud-Ouest:

L'étalonnage est fait dans une parcelle cultivée en luzerne, irriguée par aspersion, sur des alluvions fines d'oueds, argilo-limoneuses.

$$CEst_{(0-120)} = 0,13 CEH - 0,15 \theta_p \quad n=21 \quad r=0,970$$

Oasis d'El Guettar (Job et Merai, 1992):

L'étalonnage est fait sur l'ensemble de l'oasis, sur des colluvions calcaires interstratifiées de gypses éoliens lenticulaires avec souvent moins de 10% d'argile, dont la salinité varie de 3 à 40 dS.m⁻¹.

$$CE_{\text{Est}(0-120)} = 0,082 \text{ CEH}(20) - 0,64 \quad n=46 \quad r=0,970$$

pour une gamme de teneur en eau du sol θ_p comprise entre 0,15 et 0,25.

3.7- Relation entre les conductivités des extraits.

Pour simplifier les analyses nécessaires à l'étalonnage du conductivimètre électromagnétique, nous avons d'abord limité les mesures en laboratoire aux extraits sol/eau dans les rapports 1/5 et 1/10. Ensuite ces mesures ont été converties en extrait saturé par les équations de corrélations données dans les tab.3.5 et 3.6.

Cette pratique a été abandonnée par la suite, car dans la plupart des périmètres irrigués, la salure ne varie pas assez d'un point à un autre pour minimiser les erreurs d'estimation, car les valeurs de CE_{dix} ou de CE_{cin} restent trop groupées et l'étalonnage par rapport aux mesures de CEV et CEH est imprécis. Nous en sommes donc revenus aux valeurs de CE_{sat}, qui couvrent un plus large éventail.

Périmètre	a	b	n	r
Cebala	3,71	1,79	28	0,842
Mornaguia	6,9	-0,53	104	0,968
Bizerte	6,86	-0,18	35	0,974
Jendouba	4,93	-0,24	62	0,962
Zaghouan	5,3	0		
Zelba	7,9	-0,49	78	0,947
El Guettar	6,61	-8,8	91	0,994
Sidi-Saad	2	+0,65	19	0,900

Tab.3.5- Valeur des coefficients a et b dans la relation: CE_{sat}=a.CE_{cin}+b pour les sols de différents périmètres irrigués.

Périmètre	a	b	n	r
Bizerte	8,74	+2,5	30	
Zelba	16,16	-0,95	45	0,872
El Guettar	9,05	-7,2	19	0,930
Sidi-Saad	9,0	+0,79	47	0,870

Tab.3.6- Valeur des coefficients a et b dans la relation: CE_{sat}=a.CE_{dix}+b pour les sols de différents périmètres irrigués.

3.8- Effet de la teneur en eau des sols sur l'étalonnage.

La conductivité électromagnétique dépend en même temps de la salure et de la teneur en eau du sol. Il faut donc choisir une teneur en eau de référence pour que les résultats puissent être étalonnés par rapport à cette teneur en eau et que leur variation exprime celle de la salure du sol. On choisit parmi les profils qui ont servi à l'étalonnage sur un sol donné, ceux qui ont une même salure moyenne sur 120 cm et une teneur pondérale moyenne en eau différente. On cherche une corrélation simple entre les variables CEH et θ_p . La pente de la droite de régression donne le coefficient cherché.

Périmètre	facteur θ	n	Cesat	gamme de θ
Sidi-Saad	7,57	15	2	15-25
Zaghouan	5,3	4	2	15-25
El Guettar	5,12	25	5	14-25
Sols divers	5,4	88	4	8-28

Tab.3.7- Valeur du coefficient a de la relation $CEH(\theta_2) = CEH(\theta_1) + a(\theta_2 - \theta_1)$

Cette mesure a été faite à Sidi Saâd, Zaghouan et El Guettar. Pour tous les autres périmètres, on a utilisé une relation trouvée précédemment sur 88 sols de textures différentes, de diverses provenances (Mexique, Sénégal, Syrie, Tunisie). La teneur en eau de référence est 0,20. C'est la valeur la plus fréquente dans nos périmètres irrigués, en période de culture.

3.9- Conclusion.

Les mesures de conductivimétrie électromagnétique ont été étalonnées sur différents sols de Tunisie. Il est possible ainsi de déterminer par une simple mesure en surface des niveaux de salure très variables. Le faible nombre de mesures réalisées dans les périmètres non directement suivis de Tunis, n'a pas permis de modéliser l'effet de la teneur en eau du sol sur les mesures CEM en fonction de la texture et de la porosité, comme nous le souhaitions au départ, ce travail reste à faire.

CHAPITRE IV

DISTRIBUTION SPATIALE DE LA SALURE DANS LES SITES REPRESENTATIFS

4.1- Introduction.

Notre méthodologie étant au point, nous pouvons envisager d'étudier l'évolution dans l'espace et dans le temps des sols salés irrigués de Tunisie sur quelques sites expérimentaux. Le choix de ces sites a été fait en fonction des objectifs suivants:

1)- évaluer l'effet de l'irrigation à l'eau salée sur les grands périmètres équipés de moyens de distribution d'eau à la parcelle modernes. Ceci nous a amené à sélectionner les périmètres de Zama-Bouزيد dans la haute vallée de la Mejerda et celui de Sidi-Saad dans le Kairouanais.

2)- évaluer les dangers de salinisation sur des périmètres irrigués divisés en petites exploitations privées avec une irrigation non contrôlée à la source. Ceci nous a amené à choisir les périmètres de Zelba et l'oasis d'El Guettar.

3)- situer les sels dans les paysages de manière à prévoir quels sont les sols dont l'aménagement pour la culture irriguée peut-être fait sans risque à long terme. En effet, pour les grands périmètres, comme pour les plus petits, les investissements consentis par l'Etat pour l'adduction d'eau et sa distribution à la parcelle sont très importants (forages, citernes, distribution souterraine ou en surface dans des canalisations bétonnées, bornes, fossés de drainage le cas échéant, planage des parcelles).

Les sites choisis doivent en plus représenter une situation géomorphologique, pédologique et géochimique caractéristique d'une région donnée. Les résultats acquis de cette manière sur un périmètre pourront alors être généralisés à d'autres situations semblables. A partir des soixante quinze sites brièvement décrits au chapitre II nous avons choisi:

- Sidi Saâd, El Guettar, Tarfaya et Utique, sur lesquels les points (1) à (3) ont été traités.

- Grombalia, Zelba, Essaafet, Zaafrana, Lelat, Zama-Bouزيد, Cebala, Grombalia, sur lesquels seule l'évolution de la salure au cours du temps a été traitée.

4.2- Distribution des sels à Sidi Saâd (Ben Hassine et al., 1988; Hachicha et al., 1992).

Situation générale:

Le périmètre irrigué de Sidi Saâd est situé à 60 km au sud-est de Kairouan dans le fossé d'effondrement formé entre les chaînes du Jebel Cherahil et du Jebel El Akrouta (Fig.4.1). Il est juste en aval du barrage construit sur l'Oued Zéroud en 1981, qui forme la plus importante retenue en Tunisie (209 millions de m³). Primitivement destiné à protéger la ville de Kairouan des inondations dévastatrices du Zeroud, ce barrage permet aussi d'irriguer 2000 ha gérés par la Société de Développement Agricole de Sidi Saâd (SODASS) et de recharger la nappe phréatique de la plaine de Kairouan par des lachers périodiques. La salinité des eaux varie entre 2 et 4,5 g/l en fonction des années (4,3 g/l en octobre 89 et 2 g/l en avril 90).

Il y a deux grands types de sols sur ce périmètre: les sols peu évolués d'apport et les sols isohumiques. Ils sont profonds, sains et de texture grossière parfois moyenne à équilibrée, le plus souvent. La structure est faiblement développée, particulière à nuciforme, friable en surface, massive à éclats polyédriques en profondeur. Le périmètre est cultivé en céréales et fourrages, surtout de la luzerne. Des essais de coton ont été tentés pendant deux ans sur une cinquantaine d'hectares.

Des conduites souterraines amènent l'eau à des bornes qui desservent chacune deux fois cinq hectares. La dose d'irrigation est variable selon le système d'irrigation: gravitaire ou aspersion, qui eux aussi dépendent des cultures. Les premières irrigations nécessaires à la germination sont toujours faites par aspersion. La dose varie de 30-40 mm par tour d'eau en hiver à 60-80 mm en été, avec un tour d'eau de 8 ou 15 jours.

Distribution des sels:

Avant la mise en irrigation du périmètre, les sels se trouvent à l'état diffus dans les sols qui proviennent des alluvions limoneuses de l'oued Hatob et de ses affluents, lesquels drainent des formations miopliocènes salées et gypseuses (Fig.4.1).

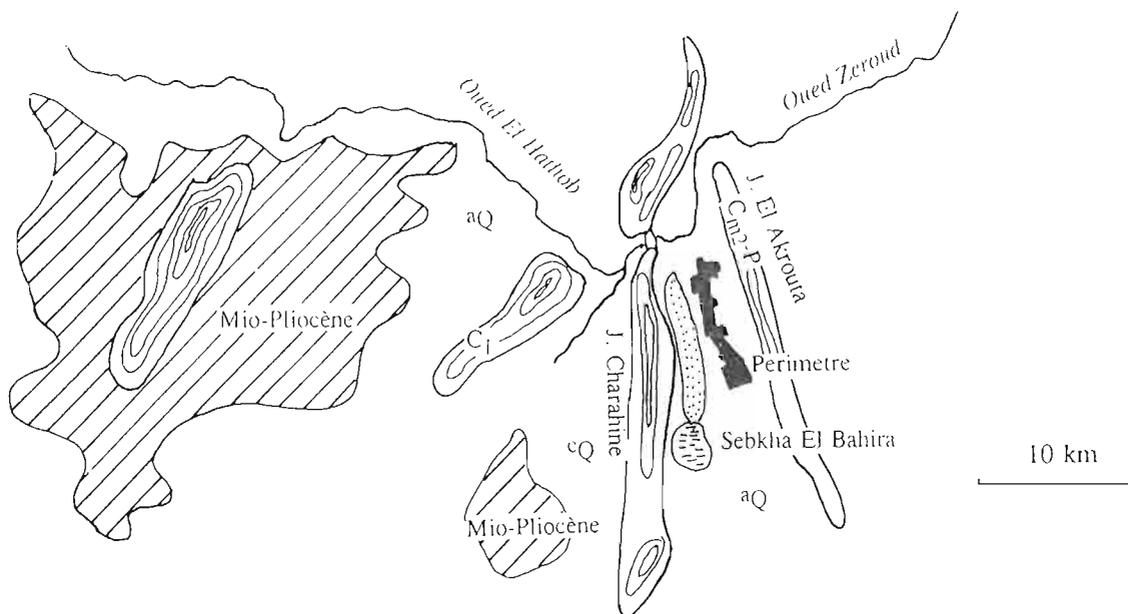


Fig.4.1- Environnement géologique du périmètre de Sidi-Saâd. Formations miopliocènes responsables de la présence de sels dans les alluvions quaternaires aQ irriguées entre les Jebels Cherahine et El Akrouta.

La redistribution des sels par les pluies se fait par drainage naturel vers le bas du fossé d'effondrement et abouti à la sebkha Bahira.

L'aménagement du paysage par l'irrigation accentue ce processus. La prospection électromagnétique sur une épaisseur de sol de deux mètres, avec un maillage de cinquante mètres, montre l'accumulation des sels dans la partie basse (Fig.4.2).

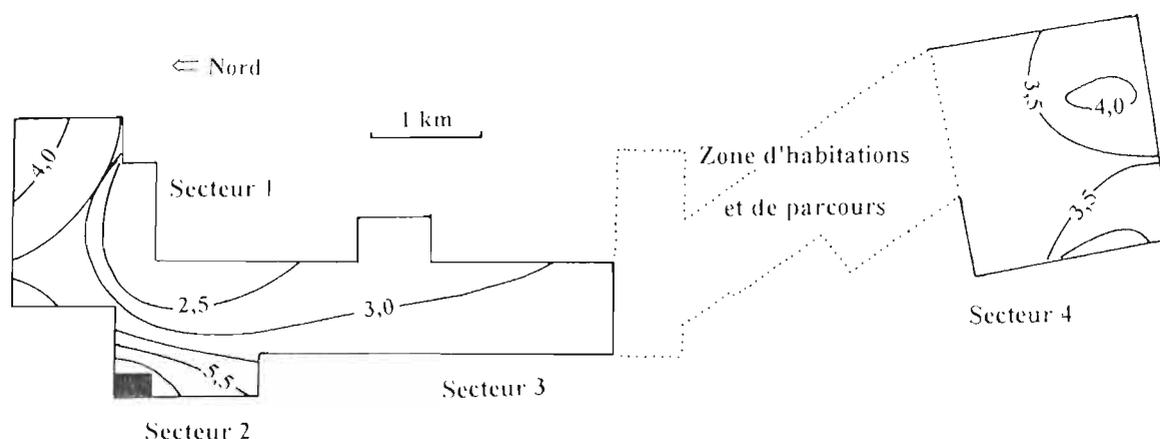


Fig.4.2- Distribution des sels à Sidi-Saad (Juin 1989). Les valeurs des courbes d'isosalinité (isohales) sont celles de l'extrait saturé moyen du sol entre 0 et 120 cm de profondeur en dScm-1, valeur calculée à partir des mesures CEM. Au Sud-est du secteur 2, en noir, la parcelle n°112NO de six hectares dont la salure a été suivie pendant deux ans (détail en figure 4.3).

La salure est généralement modérée sur tout le périmètre. Les sols lourds des parcelles de bordure, prévues pour des cultures de coton et de luzerne, dont les salures sont élevées ont été retirées du périmètre après notre étude. Les isohales ont été calculées avec le logiciel Geostat-PC de P. Boivin (1990) qui propose plusieurs options de krigeage.

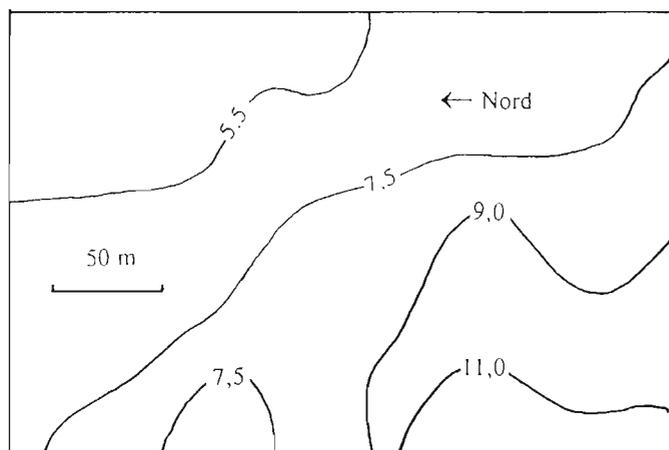


Fig.4.3- Détail de la salure de la parcelle n°112NO en juin 1988 (projection préliminaire).

4.3- Distribution des sels à El Guettar, région de Gafsa (Job, 1992).

L'Oasis d'El Guettar est située à environ 15 km à l'Est de la ville de Gafsa. Elle est orientée d'Est en Ouest sur environ six km entre le Jebel Orbata et le Chott El Guettar. Elle couvre 450 ha. La région reçoit 150 mm de pluies par an et possède une ETP (Penman) annuelle de 1500 mm.

L'eau d'irrigation, débitée à 120 ls^{-1} , provient de 4 forages qui captent la nappe du Zebbag inférieur entre 70 et 140 m de profondeur. La conductivité électrique de l'eau d'irrigation varie entre 2,37 et $3,86 \text{ dSm}^{-1}$.

Le projet de rénovation des oasis de Gafsa a fixé à $0,24 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ le taux d'irrigation. Ces données théoriques ne peuvent pas être appliquées actuellement. L'eau disponible est gérée par une AIC qui distribue l'eau par heure. Le morcellement est très important, il y a 2550 propriétaires qui possèdent souvent plusieurs lopins non contigus.

La répartition des sols dans l'Oasis est étroitement liée à la géomorphologie. Des formations eoliennes de gypse dunaires ont été recouvertes durant le quaternaire récent par les colluvions des oueds descendant du Jebel Orbata. De l'amont à l'aval, on rencontre les sols peu évolués alluviaux et colluviaux qui possèdent souvent un encroûtement gypseux de profondeur. En bas du paysage, les sols deviennent graduellement hydromorphes au fur et à mesure que l'on se rapproche du chott. Ils possèdent un encroûtement gypseux avec ou sans gley de profondeur. Les sols halomorphes fortement salés avec présence de nappe entourent le chott d'une frange toujours menacée par l'avancée du Chott. L'oasis est cultivée sur trois strates successives :

- Strate supérieure: palmiers dattiers avec 2 variétés dominantes: Ftimi, et Deglet Nour, cette dernière en lizière sud surtout,
- Strate moyenne: oliviers, grenadiers, abricotiers, pistachiers, figuiers,
- Strate inférieure: cultures fourragères et maraîchères.

Chaque système de culture correspond à une utilisation de l'eau différente, tant en fréquence qu'en quantité d'eau apportée. L'oasis d'El Guettar et son proche environnement constitue un bassin versant unique, ce qui y rend les études de bilan salin particulièrement intéressantes.



Fig.4.4- Distribution spatiale de la salure de sols de l'oasis d'El Guettar (en dSm^{-1} d'extrait saturé intégré sur les premiers 120 cm).

4.4- Distribution des sels dans l'oasis de Tarfaya (Zidi et al., 1993):

L'oasis de Tarfaya, créée en 1971, est située à 5 km à l'Est de Douz, dans la partie Sud de la Nefzaoua. La Nefzaoua est un grand glacis du Jebel Tebaga qui descend en pente douce vers le chott El Jerid. Ce glacis est entaillé de lits d'anciens oueds quaternaires, maintenant recouverts de sables éoliens. Des failles géologiques sortaient une centaine de sources artésiennes qui alimentaient autant de petites oasis (aïoun). Remplacées depuis une cinquantaine d'années par des forages, ces sources sont maintenant tarées. Les aïouns de petite taille sont abandonnées, la plupart sont ensablées. Autour des forages se développent des oasis modernes consacrées à la quasi monoculture du palmier Deglet Nour, entourées de nombreuses petites extensions familiales. Les eaux d'irrigations sont drainées dans le paysage grâce aux anciens lits d'oueds. Elles se rassemblent en hiver dans de petites dépressions où elles forment des lacs temporaires, transformés par évaporation en sebkhas de plus en plus salées (Fig4.5)



Fig.4.5- Dynamique générale des sels dans la Nefzaoua (1/250 000 ème).

La plupart des sols de la Nefzaoua se sont développés à partir de formations éoliennes gypseuses à très gypseuses. La caractéristique principale de leur formation est la grande homogénéité texturale et la grande variabilité spatiale de la couverture pédologique due aux remaniements par les oueds. La teneur en gypse des sols varie entre 20 et 45 %, diminuant en général avec la profondeur. La salinité diminue avec la profondeur. L'horizon de surface est généralement très salé et est toujours beaucoup plus salé que l'horizon qui le suit. La salinité est de plus en plus importante des limites sud du périmètre vers le Nord et le Nord-Ouest là où on note l'absence de cultures en relation avec les dépressions et particulièrement avec l'absence de bons exutoires.

L'oasis de Tarfaya est gérée par la société de développement agricole des dattes (SODAD). Sur une superficie de 127 ha, 100 ha sont plantés en palmiers soit à peu près 6500 pieds. Elle est alimentée par un forage artésien dans le complexe terminal d'une profondeur de 74 m, débitant un maximum de 80 l.s^{-1} . Le périmètre comporte un réseau d'irrigation constitué de canalisations en béton enterrées conduisant à des bornes. Le drainage est assuré par des fossés à ciel ouvert.

Comme dans un certain nombre d'oasis de la Nefzaoua, une mauvaise gestion des eaux et des sols a provoqué la remontée de la nappe phréatique, la salinisation des sols et une baisse de rendements des dattiers. L'irrigation se faisant à partir d'un seul forage à débit constant, il nous a semblé pertinent d'étudier l'évolution de la salure en fonction des doses d'irrigation au cours du temps.

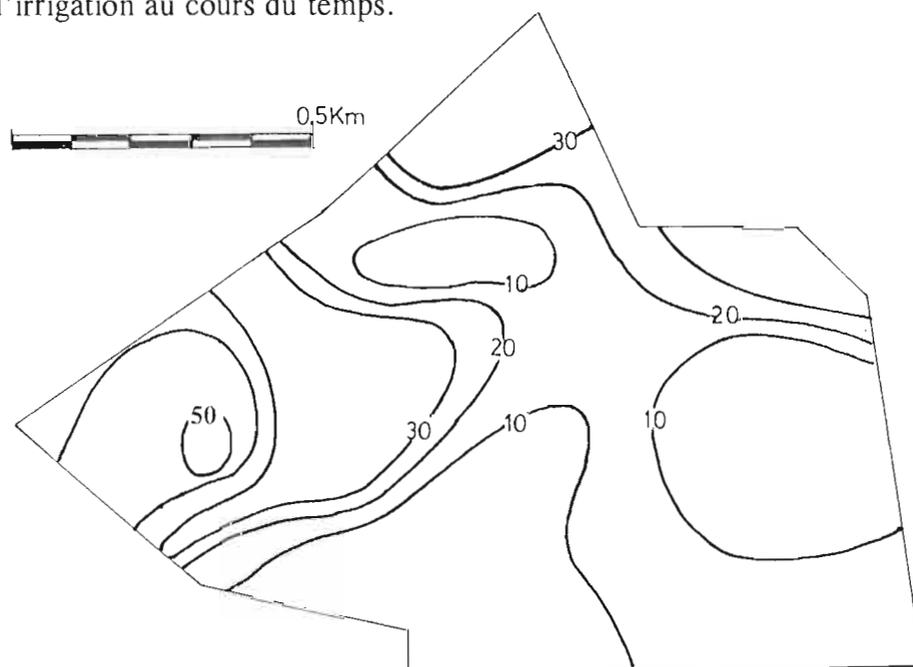


Fig4.6- Répartition spatiale de la salure des sols dans l'oasis de Tarfaya (Nefzaoua), valeurs de $\text{CEsat}_{(0-120)}$ en dSm^{-1} .

Une trentaine de piézomètres ont donc été installés pour déterminer le niveau de la nappe et sa salinité. La nappe est généralement comprise entre 0 et 100 cm de profondeur avec une moyenne de 75 cm. La salinité de la nappe varie de 3.5 à 100 dS.m^{-1} . Sa variation spatiale est en accord avec l'écoulement de la nappe.

La nappe remonte en toute saison car les quantités d'eau ne sont pas modulées en fonction de la profondeur de nappe. En hiver les quantités d'eau d'irrigation ne sont pas réduites, l'ETP est faible et les besoins des palmiers insignifiants. La nappe est si proche de la surface que les remontées capillaires se produisent sur 20% de la surface cultivée.

4.5- Conclusions.

L'intensification de l'agriculture en Tunisie passe par l'irrigation des sols salés de bas de pente. Les trois exemples traités dans ce chapitre montrent que même dans un milieu où les sels sont présents dans tout le paysage, c'est toujours la frange basse des périmètres, voisine de zones naturelles d'accumulation des sels qui est atteinte.

Dans la Nefzaoua, l'eau d'irrigation est de bonne qualité, l'eau de drainage en hiver ne dépasse pas 5 dSm^{-1} à la sortie des oasis. L'accumulation des eaux de drainage à l'aval des oasis crée des lacs temporaires. Nous allons voir dans le chapitre suivant comment prévoir les sels qui vont y précipiter en été, dans deux situations distinctes: celles de sols d'El Guettar, sous-irrigués, celle de sols de Tarfaya, sur-irrigués.

CHAPITRE V

PREVISION DE LA PRECIPITATION DES SELS PAR CAPILLARITE

5.1- Introduction.

Quelque soit la situation climatique des sols en Tunisie, la séquence complète de la dynamique des sels dans le paysage suit toujours l'ordre: accumulation des sels dans le sol, lessivage interne, transport par la nappe, accumulation dans les zones basses, remontées capillaires, évaporation et précipitation des sels à la surface. Il peut manquer une ou plusieurs étapes, mais la règle générale est la concentration de l'amont vers l'aval des eaux qui sont en équilibre avec le sol.

Dans les parties basses du paysage, les sels qui précipitent à la surface sont redissous par les pluies d'autant plus rapidement qu'ils sont plus solubles. La vitesse avec laquelle ces sels vont migrer par ruissellement ou infiltration dépend du type de sels qui vont y précipiter. Il est donc essentiel, pour comprendre la migration différentielle des ions dans le paysage de prévoir quels vont être les sels qui vont précipiter à la surface du sol.

Nous avons montré au cours de ce travail que cette prévision pouvait se faire facilement. En effet dans le processus de concentration d'amont en aval des périmètres irrigués, les ions libres de la solution du sol se combinent sous forme d'ions appariés qui sont les précurseurs des sels qui vont précipiter au terme de leur trajet, la plupart du temps par capillarité dans la partie où la nappe se rapproche le plus de la surface. Une simple analyse de cette solution permet donc de prévoir quels sont les sels qui vont précipiter ensuite dans les parties aval du paysage. C'est aussi un moyen de caractérisation géochimique des sols salés.

5.2- Calcul des ions appariés.

Dans une séquence de sols salés, la solution du sol est toute solution aqueuse en équilibre avec le sol, soit l'extrait saturé, soit la nappe phréatique. Les ions majeurs s'y combinent à partir d'une certaine concentration sous des formes diverses principalement: CaSO_4° , MgSO_4° , CaCO_3° , CaHCO_3^- , MgHCO_3^- , NaCO_3^- , NaHCO_3° , NaSO_4^- , KSO_4^- .

Les ions appariés sont des entités thermodynamiques dont on peut calculer la concentration dans toute solution à partir de leurs constantes de dissociation, produit des activités des ions qui les composent (tab.5.1).

Paire	ref	k	Paire	ref	k
CaSO_4°	(1)	$4,90 \cdot 10^{-2}$	MgSO_4°	(2)	$5,88 \cdot 10^{-3}$
CaHCO_3^+	(2)	$5,5 \cdot 10^{-2}$	MgHCO_3^+	(2)	$6,9 \cdot 10^{-2}$
CaCO_3°	(3)	$1,13 \cdot 10^{-8}$	MgCO_3°	(2)	$4,0 \cdot 10^{-4}$
NaCO_3^-	(2)	$5,35 \cdot 10^{-2}$	NaSO_4^-	(2)	$2,4 \cdot 10^{-1}$
NaHCO_3°	(2)	1,78	KSO_4^-	(2)	$1,1 \cdot 10^{-1}$

Tab.5.1- 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),

Le calcul des activités est fait à partir de la formule de Debye-Hückel si la conductivité électrique est inférieure à $2 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ et celle de Davies pour les concentrations supérieures, avec les notations suivantes:

$[\text{Ion}(0)]$	= concentration analytique Ion en $\text{mmol} \cdot \text{l}^{-1}$.
$[\text{Ion}(n)]$	= concentration de l'espèce Ion calculée après n itérations.
$\{\text{Ion}\}$	= activité de l'ion Ca.
z_i	= valence de l'ion i.
I	= force ionique de la solution en $\text{mmol} \cdot \text{l}^{-1}$
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).
$l_{i,c}$	= conductivité équivalente à la concentration c.
$l_{i,0}$	= conductivité équivalente à dilution infinie.

- première étape: on calcule la force ionique: $I(0) = 0,5 \sum z_i^2 [C_i(0)]$

puis: $\log f_i = -az_i^2 \sqrt{I} / (1 + ba_i \sqrt{I})$ quand $Ec < 2 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$

et: $\log f_i = -az_i^2 \sqrt{I} / (1 + \sqrt{I}) - 0,3 \cdot I$ quand $Ec > 2 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$

(d'après Davies, in Stumm et Morgan, 1981).

- deuxième étape: calcul des activités de chaque ion :

$\{\text{Ca}(1)\} = f_{\text{ca}}[\text{Ca}(0)]$, de même: $\{\text{Mg}(1)\} = f_{\text{mg}}[\text{Mg}(0)]$, ...etc,

- troisième étape: on calcule une première fois la concentration de chacun des ions appariés:

$\text{CaSO}_4(1)^\circ = 0,204 \{\text{CA}(1)\} \{\text{SO}_4(1)\}$ $\text{CaHCO}_3^- = 0,0182 \{\text{CA}(1)\} \{\text{SO}_4(1)\}$

etc....pour les autres ions.

D'où l'on déduit la concentration en ion libres:

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

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, la condition d'électroneutralité de la solution est vérifiée 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'une analyse chimique des éléments majeurs.

5.2-Application à la prévision de la précipitation des sels.

Les concentrations des ions appariés en solution ont été calculées pour deux séquences de sols à El Guettar et à Tarfaya. Les sels qui remontent à partir de la nappe par capillarité et qui précipitent en aval à la surface du sol ont été analysés par réfractométrie des rayons X.

La première oasis est située à 15 km de Gafsa, sur les colluvions crétacées du Jebel Orbata, envahies par du gypse lenticulaire provenant des formations mio-pliocènes avoisinantes. La deuxième oasis est située dans la Nefzaoua, à 10 km au sud-est de Douz, sur des sables gypseux éoliens.

L'oasis d'El Guettar n'étant pas drainée, les sols cultivés de la partie basse, en bordure de chott sont très salés. Les sels remontent par capillarité à partir de la nappe en hiver et au printemps, au moment où la nappe se rapproche jusqu'à 180 cm de la surface. A Tarfaya, il y a un réseau de drainage, mais en certains endroits la nappe se trouve à moins d'un mètre de la surface. Les remontées capillaires sont donc très importantes.

Ca	Mg	K	Na	Cl	SO4	HCO3	pH	EC	échantillon
8,3	8	0,3	8,7	8	15,3	3	7,7	2,4	Tarfya forage (Dec.92)
18,2	14	0,37	14	12	26	7	7,7	3,9	El Guettar (Juin.89)

Tab.5.2- Qualité des eaux de forages des oasis de Tarfaya et El Guettar (en me.l⁻¹).

Le faciès des eaux d'irrigation est le même dans les deux cas, l'environnement climatique pédologique est cependant différent. L'analyse des nappes (fig.5.1 et 5.2) montre qu'au cours du processus de concentration, se sont les sulfates de magnésium et de sodium qui vont accompagner le chlorure de sodium. Le gypse précipite en faible quantité, tout au début du processus de concentration des eaux.

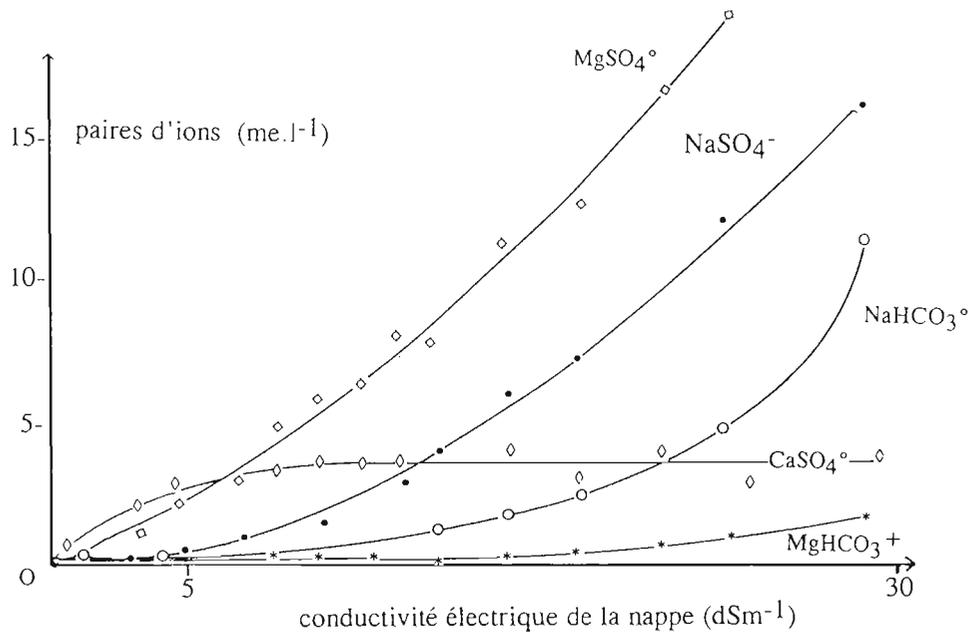


Fig.5.1 El Guettar: concentrations des ions appariés dans la nappe phréatique en fonction de sa conductivité électrique.

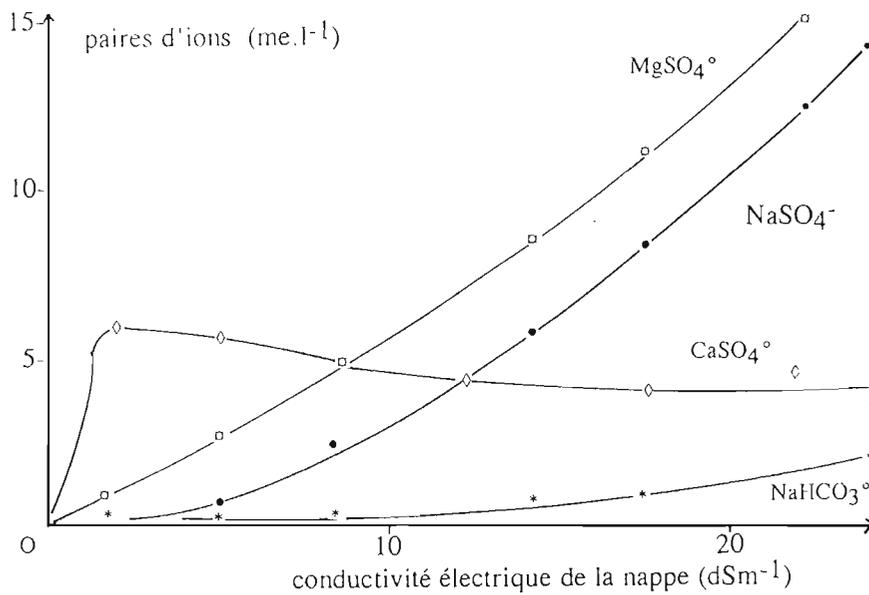


Fig.5.2. Tarfaya: concentrations des ions appariés dans la nappe phréatique en fonction de sa conductivité électrique.

La paire d'ion qui se forme en premier est toujours CaSO₄[°], puis vient le tour de MgSO₄[°] qui devient l'ion apparié dominant, suivi par NaSO₄⁻. Dans les deux cas, les diagrammes de rayons X confirment la présence en surface de thénardite Na₂SO₄ et de bloedite MgSO₄,Na₂SO₄,6H₂O.

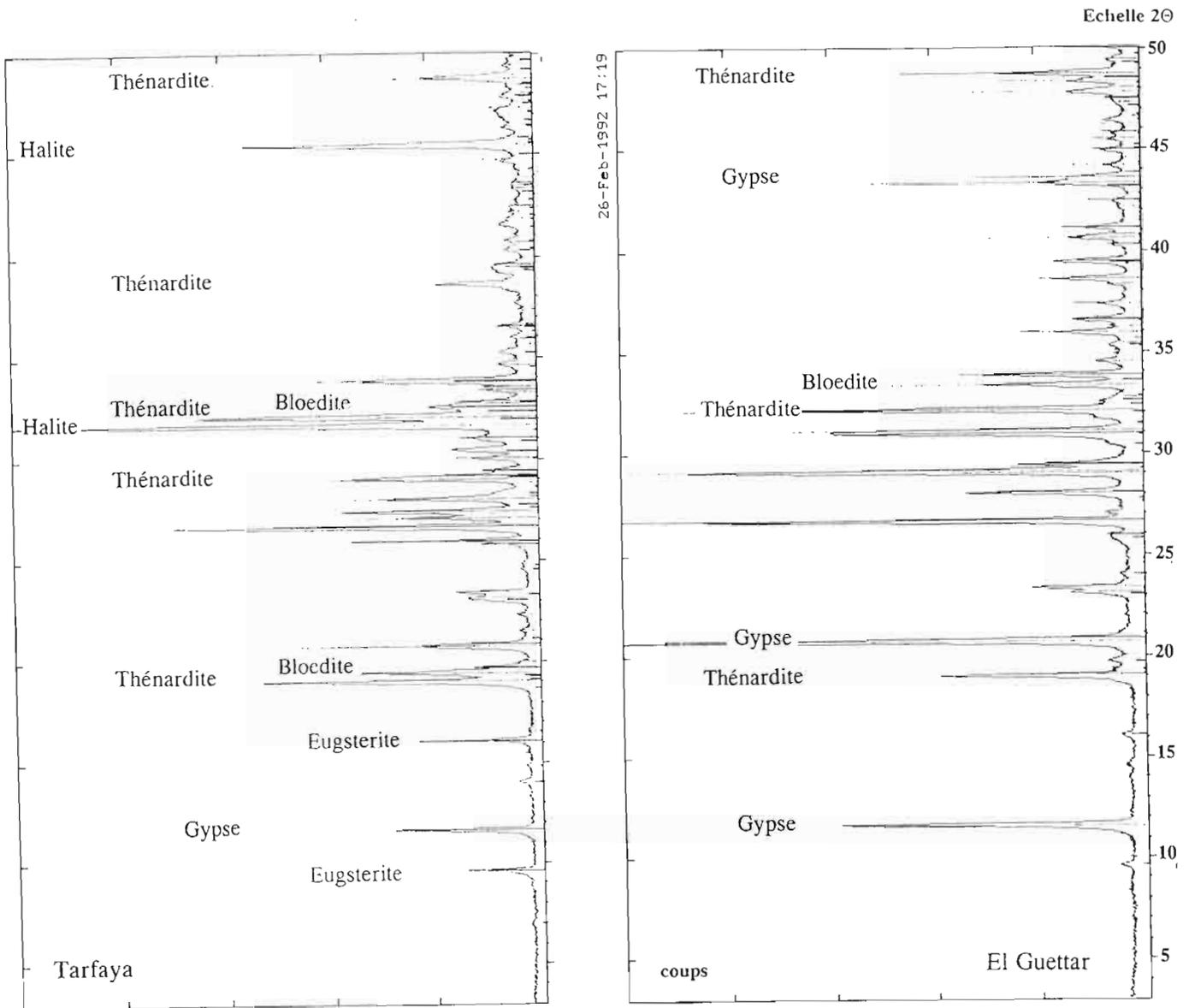


Fig.5.3- Diagramme de rayons-x de sels de surface. Les sels sont prélevés en Mars à l'aplomb de l'endroit où la nappe atteint le maximum de concentration (Analyses du laboratoire de pétrologie-minéralogie de l'Orstom, Bondy).

En hiver, période de repos des irrigations, les sels qui précipitent à partir de la nappe sont les mêmes dans les deux oasis: Les chlorures sont représentés uniquement par la Halite (NaCl), les sulfates par la Thénardite (Na_2SO_4) et l'Eugsterite ($\text{Na}_4\text{Ca}(\text{SO}_4)_3$). Les sels peu solubles, Gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Calcite (CaCO_3), et Dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), caractéristiques de l'environnement géologique immédiat apparaissent également. Les chlorures ne formant pas d'ions appariés, seuls les carbonates et les sulfates devant précipiter peuvent être décelés dans les eaux de nappe. Cette dynamique est caractéristique d'un bassin versant.

En été, les encroûtements de surface s'enrichissent, à El Guettar, par exemple d'Hexahydrate ($\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), de Kaïnite ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{KCl} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), de Kieserite ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), et de Konyaite $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2$, sels éminemment solubles.

La répartition des sels en surface obéit donc à deux dynamiques différentes: celle des nappes, dont la composition ne varie pas sensiblement d'une année à l'autre qui est caractéristique d'un bassin versant, et celle que provoque l'irrigation qui remet en mouvement des quantités importantes de sels dans un temps très court.

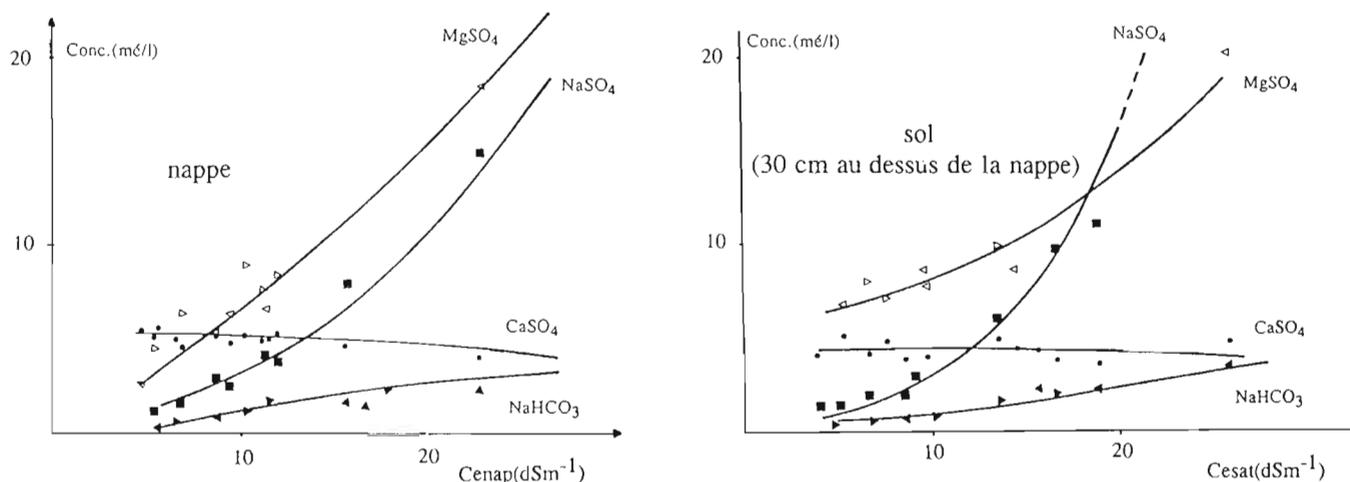


Fig.5.4- Enrichissement de la solution du sol en ions sulfate et sodium par remontées capillaires.

La détermination de la quantité de sels sujettes aux remontées capillaires sera faite par conductivimétrie électromagnétique (Chap.VI). Ce que l'on peut dire c'est que la composition saline de la solution du sol évolue depuis la nappe jusqu'à la surface, en perdant progressivement le faciès d'origine (tab.5.3) La nappe ne représente donc pas la solution du sol des périmètres irrigués.

niveau de mesures (cm)	a	b	r
0-20	0,44	4,60	0,54
20-40	1,10	-0,75	0,74
40-60	1,60	-0,61	0,89
60-80	1,27	3,20	0,89
80-100	1,61	0,88	0,90
100-120	21,36	2,29	0,92

Tab.5.3- Coefficients a et b de l'équation $C_{Nap} = aC_{Esat} + b$ en fonction de la profondeur.

5.3-Calcul des conductivités des solutions.

La mesure de la conductivité électrique d'une solution du sol est la mesure de base qui sert, pour un environnement géochimique donné, de facteur de concentration. 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 de l'appareil de mesure se produit et sous estime la conductivité réelle, les mesures (sur le terrain ou en laboratoire) ne sont plus fiables à partir de valeurs supérieures à 15 dSm^{-1} . Il est donc nécessaire de les recalculer. On utilise pour le faire, le principe suivant:

à température et pression constantes, si $I_{i,0}$ est la conductivité équivalente limite de l'ion i et si $I_{i,c}$ est celle du même ion à la concentration de la solution c , la conductivité électrique CE de la solution est telle que: (Job, 1985):

$$I_{i,c} < CE < I_{i,0}$$

Les conductivités électriques des ions étant additives, on a donc:

$$CE = CE(\text{Ca}) + CE(\text{Mg}) + CE(\text{Na}) + CE(\text{K}) + CE(\text{Cl}) + CE(\text{SO}_4) + \dots$$

On utilise les conductivités équivalentes limites données dans le tableau 5.4.

ion	H ⁺	NA ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	OH ⁻	Cl ⁻	SO4 ⁻⁻	NO3 ⁻	CO3 ⁻
li,o	350	50,1	73,5	59,5	53,0	198	76,3	80,0	71,4	69,3

Tab.5.4- Conductivités équivalents limites des ions majeurs du sol à 25°C (Robinson et Stokes, 1959).

On calcule les conductivités équivalentes li,c de chaque ion à partir de celles des sels dans lesquels ils sont combinés en utilisant la propriété d'additivité des conductivités (tab.5.5):

Concentration c (me/l)	0	0,1	2,5	10	20	30	100	200	500	1000
NaCl	126	123	122	120	118	115	111	106	103	96
CaSO ₄		122	112	100	90	79	72	72	72	72
MgSO ₄		123	111	100	90	80	64	60	50	41
Na ₂ SO ₄		123	122	115	109	107	100	84	80	69
CaCl ₂		130	128	114	120	118	112	103	100	90
MgCl ₂		123	122	119	114	111	103	97	93	81
Ca(HCO ₃) ₂			99	97	93	90	85	79	72	72
Mg(HCO ₃) ₂		95	93	92	90	87	83	79	79	79
NaHCO ₃		90	90	89	88	85	80	74	74	74
MgCO ₃		130	126	119	107	103	91	75	75	75
KCL	150	147	144	143	141	139	135	130	126	122
K ₂ SO ₄		139	133	123	115	107	104	104	104	104
CaCO ₃		137	133	125	114	114	114	114	114	114
Na ₂ CO ₃		130	128	123	118	114	101	85	79	67

Tab.5.5- Conductivités équivalentes de quelques sels en fonction de la concentration la concentration (en dS.m⁻¹.e⁻¹), pour quelques sels.

Ce programme nous a permis de rectifier 23 des 33 mesures faites sur la nappe de l'oasis de Tarfaya à des concentrations supérieures à 10 dS.m⁻¹.

5.4- Conclusions.

Un des buts que nous nous étions fixés au départ est d'expliquer le fonctionnement des sols salés en un point (ou une région) B, à partir des résultats trouvés en un point (ou une région) A, soit en conservant l'échelle, soit en la diminuant. Dans cette opération, appelée transfert d'échelle, la distance entre A et B, ainsi que leurs tailles respectives peuvent être quelconques. Il est clair que cette opération n'est possible que s'il existe un dénominateur commun entre les points A et B qui justifie une telle transposition.

Le faciès géochimique qui conduit à la précipitation de certains sels à partir de la solution du sol peut être ce dénominateur. En effet il intègre la qualité des sols et le climat, facteurs déterminants du comportement géochimique et peut être calculé très rapidement à partir de l'activité des ions appariés que nous avons présenté dans ce chapitre.

OASIS DE TARFAYA (NEFZAOUA)



Photo.1- Paysage endoréique de la Nefzaoua. En vert les oasis, cerclées de noir, les zones endoréiques.



Photo.2- Les oasis de Tarfaya (Douz, le 23 janvier 93):
(1)- axe de drainage hors du périmètre,
(2)- accumulation des sels dans le périmètre,
(3)- les extensions autour de puits privés.



Photo.4- Détail zone (3): cultures sur sols salés en aval de l'oasis.



Photo.3- Détail zone (2): la partie sommitale de l'aqueduc d'arrière plan est à -50 cm et la nappe à -180 cm par rapport à la surface.



PLANCHE 2

Photo.5- Détail zone (1): drainage principal vers le Chott El Jerid: eau douce en hiver, eau salée en été).

CHAPITRE VI

EVOLUTION DE LA SALURE DANS LE TEMPS

6.1-Introduction.

Il faut connaître l'évolution de la salure des sols pour prévoir les aménagements nécessaires au maintien de la productivité des sols dans les périmètres irrigués. Cette évolution dans le temps ne peut se prévoir que si la répartition des sels dans l'espace, c'est à dire verticalement dans le profil et horizontalement sur toute l'étendue du périmètre est connue, et ce avec un pas de temps saisonnier.

La méthode d'étude est donc la suivante:

- on suit une ou plusieurs parcelles représentatives d'une unité de sol dont le comportement géochimique est homogène à l'intérieur d'un périmètre par région et d'un périmètre par type d'exploitation,
- de la parcelle on passe au périmètre,
- l'ensemble des données est collectée pour donner une idée du rythme de salinisation des sols en Tunisie.

Dans la pratique, nous avons choisi une vingtaine de parcelles dans une gamme de sols et de modes d'irrigation représentant la plupart des situations que l'on rencontre en Tunisie. Ce chapitre est consacré à la présentation de ces parcelles.

6.2- Parcelles d'essai.

- Zama Bouzid (Bransia et Job, 1991):

Le périmètre de Zama est situé dans la plaine septentrionale de la Haute Vallée de la Medjerda dans la région de Bir Lakdhar, en climat semi-aride supérieur à 2 km à l'ouest de la ville de Bou Salem. Il occupe une terrasse alluviale sur la rive droite de la Medjerda, de texture fine.

Les apports d'eau sur les collines qui bordent la partie sud (pluviométrie annuelle 470 mm) se dispersent dans la plaine en formant une marja (marais en Arabe). Un ancien lit parcourant la plaine a été transformé en un canal de drainage à ciel ouvert, mais il est peu fonctionnel. Actuellement, le périmètre est irrigué à partir du barrage de Bou Heurthma avec une eau douce (moins de 0,6 g/l en année normale). La zone étudiée est la propriété de la Société de Mise en Valeur Agricole de Zama-Bouzid. L'irrigation s'y fait par rampe frontale autotractée de 160 mètres d'envergure. L'assolement est triennal (betterave sucrière, céréales, fourrages). Le site a été choisi à cause de l'homogénéité des profils hydriques du sol que l'on s'attend à y trouver du fait du type d'irrigation pratiquée.

Parcelle	taille (m)	culture pratiquée	θ_p	nappe
ZM1	50 x 80	maïs		2,5 m
ZM2	160 x 120	betterave		2,5 m
ZA1H	30x14	palmiers, abricotiers, luzerne	11	2 m

Tab. 6.1-Caractéristiques des parcelles dont la salure est suivie à Zama Bouzid.

La distribution spatiale et l'optimisation de l'échantillonnage ont été étudiées sur trois parcelles emboîtées de 400, 16000 et 80000 m² avec des mailles de mesures variant de 2x2 mètres à 100x100 mètres.

- Cebala Borj Touil (Hachicha et Trabelsi, 1992):

Le périmètre couvre environ 3000 ha, dans la Basse Vallée de la Mejerda, à 15 km au Nord de Tunis. Il reçoit 450 mm de pluie par an. Les sols sont argileux, peu perméables, plus ou moins hydromorphes, salés et alcalinisés. La nappe salée affleure en hiver par endroit, malgré un drainage par fossés à ciel ouvert, associé dans certains secteurs à un drainage souterrain. Les eaux usées épurées employées pour l'irrigation ont une salinité moyenne d'environ 5 dS.m⁻¹ et un SAR de 10. Il s'agit, du point de vue salinité, d'une eau dangereuse à haut risque de salinisation.

Trois campagnes de mesures ont été faites (sept. 89, mars 90, sept. 90) sur deux parcelles (Tab.6.1), plus une cartographie d'un secteur de 50 ha, avec une maille de 50 m, à la fois par CEM et par prélèvement d'échantillons de sol et la détermination de la conductivité de l'extrait au cinquième sur les niveaux 0-30, 30-50 et 50-80 cm.

- Utique-nouvelle (Zantour, 1991):

Le périmètre d'Utique-nouvelle a été aménagé depuis 1967. Il couvre 1107 ha et compte 203 exploitants dont plus de 40 % possèdent des parcelles de taille inférieure à 5 ha. La région est située dans l'étage bioclimatique semi-aride supérieur à hivers doux. La pluviométrie moyenne annuelle est de 480 mm.

Le périmètre est formé d'alluvions à caractère vertique, hydromorphes dans les parties basses, de texture limono-argileuse avec une assise argileuse à 120 cm.

La nappe phréatique peut remonter jusqu'à 60 cm de la surface. La salure est forte en profondeur. Le sol est pauvre en matière organique (1% au maximum), les horizons superficiels ont donc tendance à se saler. Le volume d'eau distribué dans le périmètre à partir de la Mejerda varie entre 1,5 et 3,3 millions de m³ selon les années. En avril 1990 et novembre 1991, elle titrait respectivement 4,3 et 3,8 g/l.

- Parcelles de Zaafrana III et d'Henchir El Oussif (Hachicha et Trabelsi, 1991):

Le périmètre de Zaafrana (120 ha) est situé dans le Kairouanais à 6 km au Nord de Bou Hadjla. Les sols sont des peu évolués d'apport alluvial de texture moyenne à fine en surface hydromorphes en profondeur avec par endroit un encroûtement gypseux de nappe à 80 cm et plus. Ils sont profonds, peu perméables en surface, perméables en profondeur, calcaires et de salinité initiale très faible, mais la topographie est très plane et le drainage externe quasi nul.

Le périmètre est conduit en semi-irrigué (maraîchage d'été et arboriculture). Un forage créé en 1957 débite une eau de 2,7 g/l (SAR de 12) à 60 l/s, soit à peine la moitié des besoins estimés à 6800 m³ha⁻¹. Le tour d'eau, de 7-9 jours en hiver, passe à 2-3 semaines en été.

La nappe phréatique se trouvait en avril 87 à 6 m environ. Ses oscillations annuelles sont faibles, de l'ordre de 50 cm.

Le morcellement des parcelles constitue une autre cause indirecte de salinisation car il empêche de gérer convenablement les sols: 57 % des agriculteurs possèdent des parcelles dont la taille est inférieure à 2 ha.

Périmètre	parcelle	Taille (m)	Maille	CEH mini-max
Zaafrana III	ZFR1	160x120	20x20	30-150
H. El Oussif	BBHA	160x150	20x20	58-170

Tab.6.2- Caractéristique des parcelles des périmètres de Zaafrana et d'Henchir El Oussif.

- Parcelle de Essaafet (Ben Hassine et Job, 1991):

Le petit périmètre d'Essafet est situé à 10 km à L'Ouest de Mahdia à l'aval d'un glaciais encroûté, en bordure de l'Oued Chiba. Il est composé de sols bruns calcaires tirsifiés à hydromorphie de profondeur. La topographie est en très légère pente vers l'Est. Une nappe perchée, due à un horizon argileux rend le sol boueux pendant plusieurs mois d'hiver. Une vingtaine d'hectares sont irrigués depuis 1982 à partir d'un puits artésien. La culture d'oliviers qui existait avant la mise en eau du périmètre est complétée depuis par des cultures sous serres diverses.

Un forage récemment creusé doit permettre la mise en culture de soixante hectares supplémentaires. Les sols ont occupés par des oliviers avec cultures intercalaires.

Parcelle	taille	couverture du sol	θ_p	nappe
ES1	4000 m ²	oliviers -maraichage	15	perchée (150 cm)

Tab.6.3- Caractéristique de la parcelle de Essaafet (région de Mahdia).

- Parcelles de Zelba (Ben Hassine et Job, 1992):

Le périmètre de Zelba d'une soixantaine d'hectares est composé de petites parcelles d'un hectare qui sont subdivisées en petits lopins. La quantité d'eau utilisée n'étant pas la même pour chaque culture. Les sols sont bruns isohumiques sur limon à nodules de calcaire. Leur texture est limono-argileuse à argilo-limoneuse. Un seul forage débitant 20l/s alimente le périmètre. La main d'eau est trop faible pour l'ensemble du périmètre. La plupart des agriculteurs l'ont abandonné en 1992.

Parcelle	taille	couverture du sol	θ_p	nappe
Z11	2600 m ²	mosaïque de planches -maraichage	12	sans
Z14	70000 m ²	mosaïque de parcelles	10	sans

Tab.6.4- Caractéristiques des parcelles suivies dans le petit périmètre de Zelba.

- Oasis de Lelat (Job et Merai, 1991):

L'oasis de Lelat fait partie des 3000 ha d'oasis et de jardins de Gafsa. Elle s'étend sur 700 ha sur la rive gauche de l'oued El Melah. Elle est alimentée en eau par une retenue sur l'oued d'où partent deux séguias et par un petit forage artésien. C'est une oasis traditionnelle, à propriété morcelée. L'eau est de bonne qualité, mais le tour d'eau peut atteindre un mois dans les parties basses, où l'olivier moins gourmand en eau, remplace progressivement l'association palmier-abricotier-maraichage. Le périmètre a été complètement équipé de conduites enterrées depuis 1992. Un barrage filtrant sur l'oued El Melah est en cours de construction.

Comme à Zama Bouzid, trois parcelles emboîtées les unes dans les autres ont été choisies pour tester les stratégies d'échantillonnage et les transferts d'échelles des mesures.

maille	nb de mesures	taille (m)	θ_p	parcelle
2 x 2	24	14 x 18	10	GA0
7 x 10	24	30 x 70	11	MR2
100 x 100	39	1000 x 400	12	SA1

Tab.6.5- Caractéristiques des parcelles emboîtées de l'oasis de Lelat.

- Oasis d'El Guettar (Job, 1992):

C'est dans cette oasis que l'étude la plus complète a été menée sur cinq parcelles qui ont été suivies pendant quatre années. Quatre parcelles couvrent quatre modes de gestion de l'eau différents, de la parcelle cultivée sur une seule strate de palmiers, consommant une quantité d'eau minimale à celle cultivée sur trois strates toute l'année à consommation d'eau maximale. La cinquième parcelle, récemment récupérée sur des sols de chott a servi à faire des mesures de lessivage et de drainage interne des sels.

Parcelle	taille (m)	couverture du sol	θ_p	nappe
FH	40 x 40	oliviers seuls	12	25 m
MB	12 x 11	palmiers, oliviers	10	2 m
SLH	30 x 14	palmiers, abricotiers, luzerne	11	2 m
GL	30 x 16	parcelle pionnière sur chott		3,5 m
GR	220 x 30	mosaïque de parcelles		variable

Tab. 6.6- Caractéristiques des parcelles dont la salure est suivie à El Guettar pendant quatre années. L'ensemble GR groupe 64 parcelles irriguées à partir d'un même borne pour contrôler les quantités d'eau utilisées.

- Parcelle de Grombalia (El Hammami, non publié):

L'Office des Terres Domaniales (OTD), gère la ferme d'élevage intensif Ennour en bordure de la zone basse de Soliman. ce sont des sols très lourds, vertiques, alcalinisés. Ils sont cultivés en fourrages divers, sorgho et luzerne principalement. Les sols sont peu salés en amont et assez salés en aval.

Parcelle	taille	couverture du sol	θ_p	nappe
GR1	200 x 100	sorgho	12-17	3 m
GR2	1400 x 70	orge-blé	17	1 à 3 m

Tab.6.7- Caractéristiques des parcelles suivies à Grombalia.

- Parcelles de Sidi Saâd:

Le périmètre a été décrit en détail dans le chapitre précédent. Trois parcelles de 5,5 ha, de texture équilibrée à limono-argileuse ont été sélectionnées. La parcelle SS7 est irriguée par une rampe frontale autotractée.

Parcelle	taille	couverture du sol	θ_p	nappe	texture
SS7	300x180	labour puis orge	10-15	sans	moyenne
SS8	220x160	jeune luzerne	11-19	sans	limoneuse
SS9	300x180	orge	11-16	3 m	limono-argileuse

Tab.6.8- Parcelles de Sidi-Saad.

- Parcelles de Gafsa Sud-Ouest:

Le périmètre de Gafsa Sud ouest est géré par l'OTD de Gafsa. Ces sols, d'alluvions grossières à fines suivant la position topographique, sont très calcaires. Ils constituent les jardins de Gafsa, qui continuent la palmeraie vers le Sud-Ouest. Deux parcelles ont été choisies en 1989. Ne pouvant obtenir de renseignement sur la gestion des eaux d'irrigation, ces deux parcelles n'ont plus été suivies en 1991.

Parcelle	taille (m)	couverture du sol	θ_p	nappe
GS1	21 x 16	maraichage	7	sans
GP1	40 x 70	oliviers	9-11	sans

Tab.6.9-Oasis de Gafsa sud-ouest. Parcelles OTD.

6.3- Résultats à la parcelle.

Dans les périmètres irrigués que nous avons étudié dans le Nord du Pays, figure 6.1, (1) et (2), la distribution des sels à l'intérieur d'un périmètre est assez homogène, mais il y a des secteurs entiers atteints par les sels, en général à cause d'un mauvais planage du sol. Cette salure n'est pas toujours perçue par l'agriculteur, car elle évolue lentement dans le temps et elle ne se manifeste pas visuellement par des efflorescences en surface. Les sols ne sont donc pas amendés en conséquence et les rendements dans ces secteurs sont très faibles.

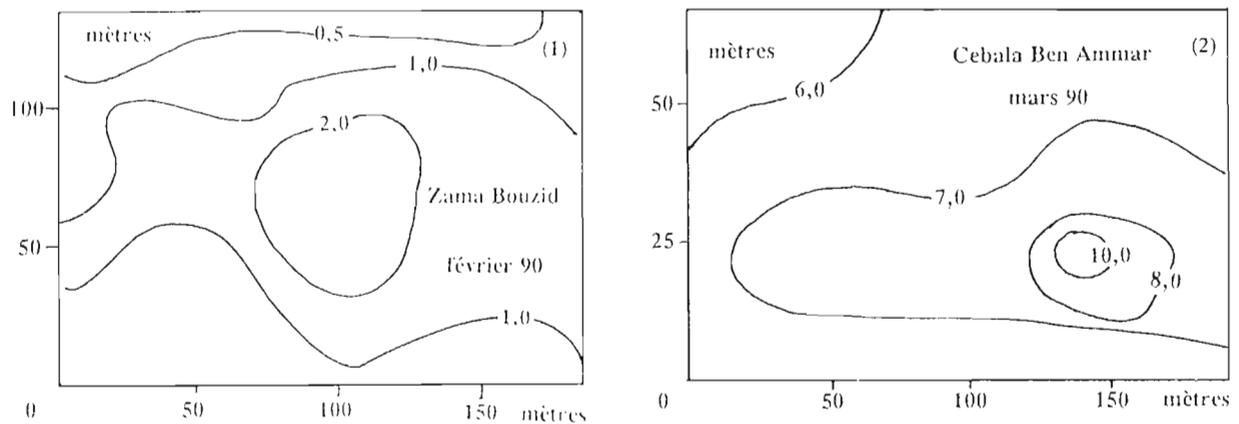


Fig.6.1- Répartition de la salure dans deux parcelles de périmètres de la Vallée de la Mejerdah (conductivité moyenne de l'extrait saturé entre 0 et 120 cm en dS.m⁻¹).

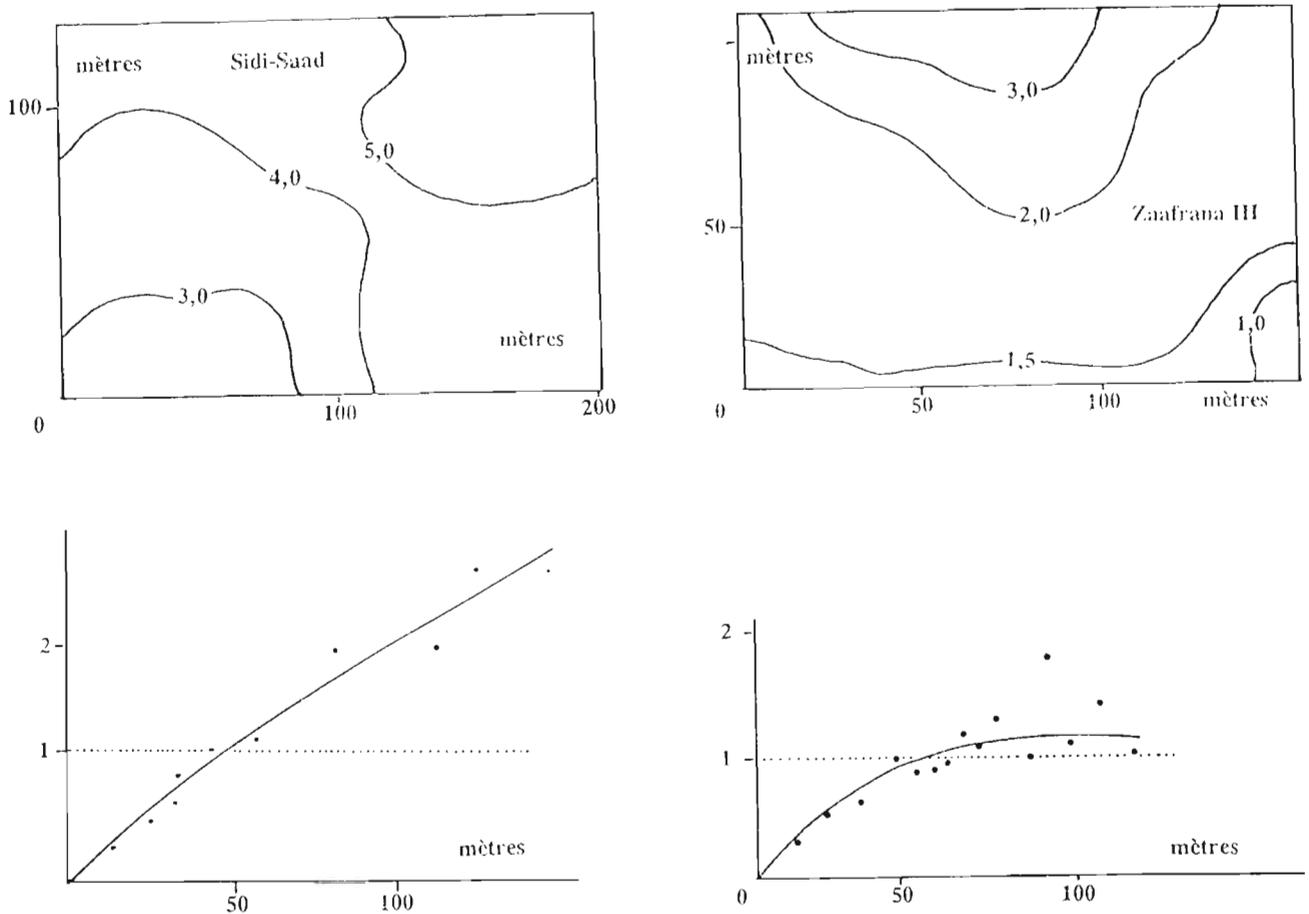


Fig.6.2- Variation de la salure du sol sur 120 cm de profondeur pour deux parcelles expérimentales du Centre tunisien (conductivité moyenne de l'extrait saturé entre 0 et 120 cm en dS.m⁻¹) et variogrammes normés correspondants (nombre pur).

Dans le Centre, la salure est modérée, les sols ne sont pas alcalins, la variabilité spatiale est faible.

Dans le Sud, les superficies irriguées par les agriculteurs propriétaires sont très petites. La distribution des sels dans les sols a une très grande variabilité, en profondeur et en surface. Une même planche de quelques m^2 peut drainer dans une partie et présenter des profils de remontées capillaires dans une autre. La dynamique des sels est très rapide (quelques semaines pour une inversion des profils). La réhabilitation des sols est par contre plus facile que dans le Nord car les sols sont perméables et peu argileux (fig.6.3).

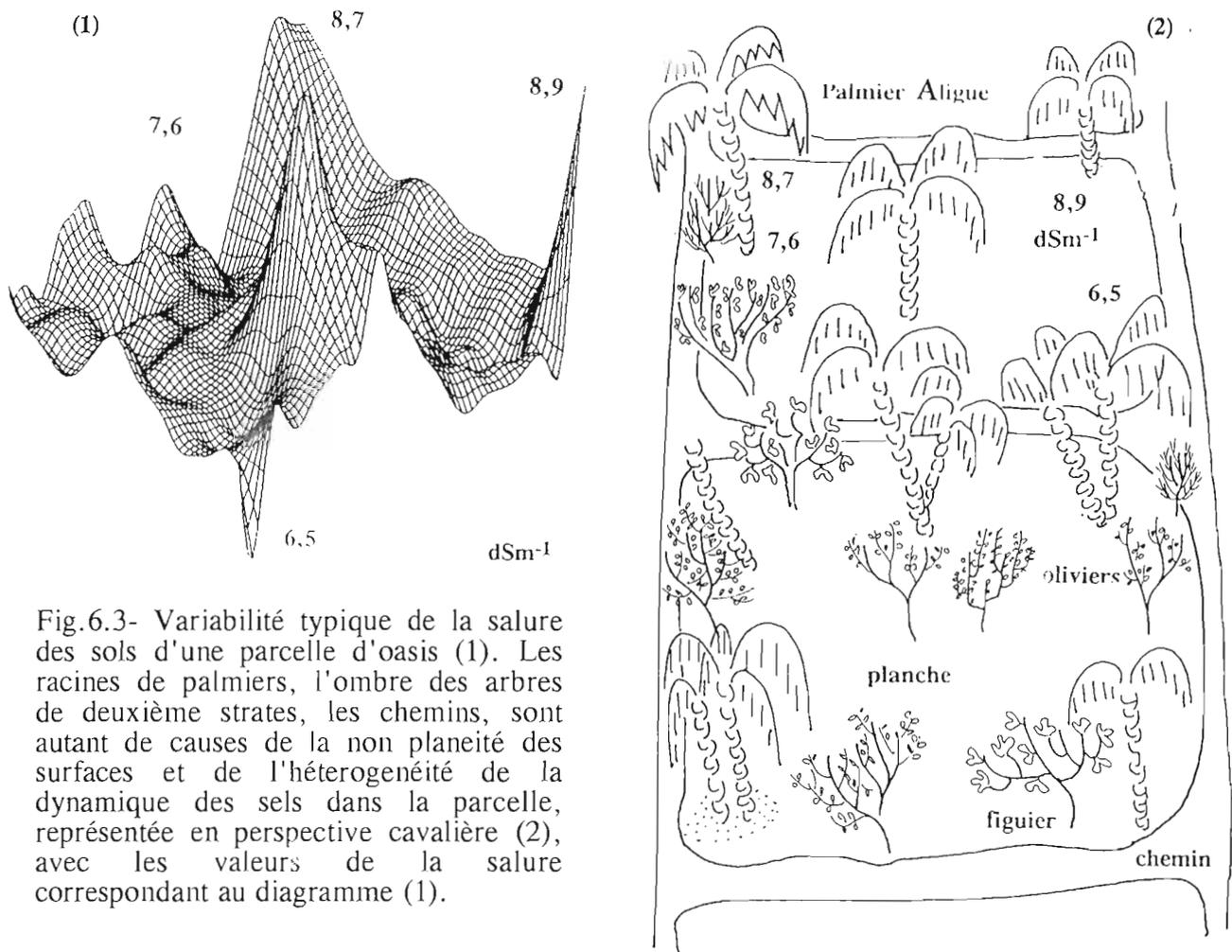


Fig.6.3- Variabilité typique de la salure des sols d'une parcelle d'oasis (1). Les racines de palmiers, l'ombre des arbres de deuxième strates, les chemins, sont autant de causes de la non planéité des surfaces et de l'hétérogénéité de la dynamique des sels dans la parcelle, représentée en perspective cavalière (2), avec les valeurs de la salure correspondant au diagramme (1).

La méthode de mesure de la salure des sols par conductivité électromagnétique mise au point en Tunisie, permet donc d'aborder toutes les situations, même les plus complexes, avec des pas de temps et d'espace très courts (pas de 2×2 mètres dans la fig.6.3). Elle nous a permis de mettre en évidence les problèmes d'échelle liés à la salure des sols.

-L'échelle des grandes exploitations du Nord qui doivent rentabiliser les investissements hydrauliques par un choix des terres à mettre en culture qui évite la mise en valeur des zones salées.

- Celle des petits agriculteurs dans le Sud qui doivent adapter leurs techniques de culture et leurs amendements à la bonification de petites surfaces.

-Evolution dans le temps:

- Tant que l'agriculteur ne modifie pas sa manière d'irriguer, la salure de sa parcelle n'évolue pas sensiblement dans le temps, au moins sur une période de trois années (fig.6.4, (1) à (4)). Le niveau de la salure du sol pour une parcelle donnée est donc une question de gestion de l'eau et du sol.

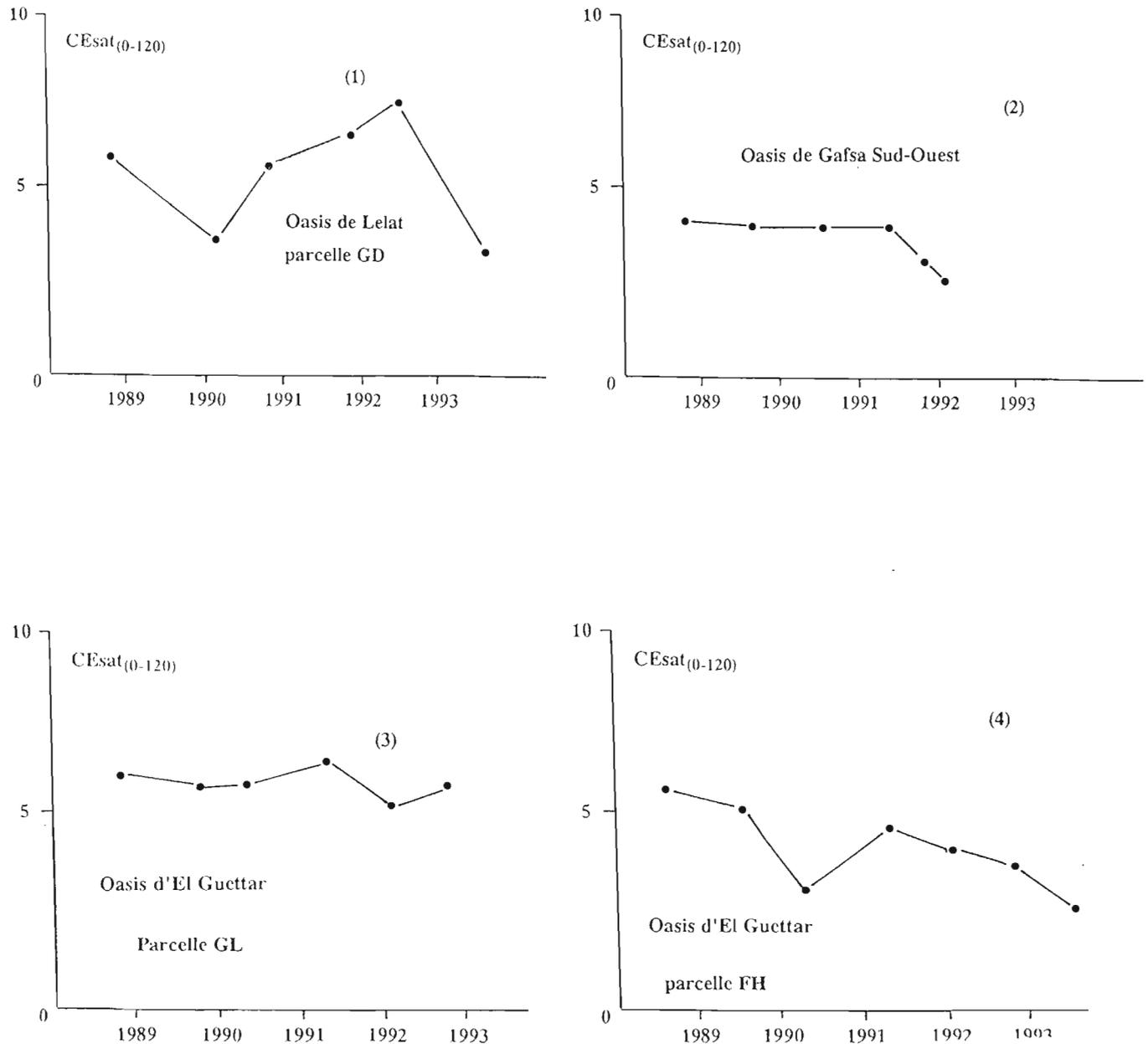


Fig.6.4- Evolution de la salure de quatre parcelles dans les oasis de Lela, Gafsa Sud-ouest et El Guettar. Dans les figures (1) et (4), la baisse de salure au début de l'année 1990 est causée par des pluies exceptionnelles (247 mm en deux jours, soit une fois et demi la pluviométrie annuelle moyenne) qui a provoqué un lessivage des sels, dans les parcelles à bon drainage externe. La parcelle de la fig. (2) est de texture argileuse, et la parcelle (3), se situe dans une partie non drainante.

6.5- Optimisation des paramètres de CEM des sols.

Une série d'expérimentations pour quantifier l'effet des variables édaphiques principales sur la méthode d'évaluation des sels par conductivimétrie électromagnétique a été faite sur les sites de Zama-Bouزيد, Sidi-Saâd, El Guettar et Cebala Ben Ammar.

- Cebala Ben Ammar: comparaison entre méthode CEM et par prélèvement d'échantillon:

La cartographie de la salinité globale a été entreprise par un emploi séparé des deux méthodes, conductivimétrie électromagnétique et détermination de la CEs sur des prélèvements de sols (Hachicha et Trabelsi, 1990). La mesure CEM permet une bien plus grande précision grâce à la multiplication du nombre de mesures qu'elle permet (fig.6.4), malgré des variations de teneur en eau du sol de 20 à 25% pondéral sur les 50 hectares prospectés.

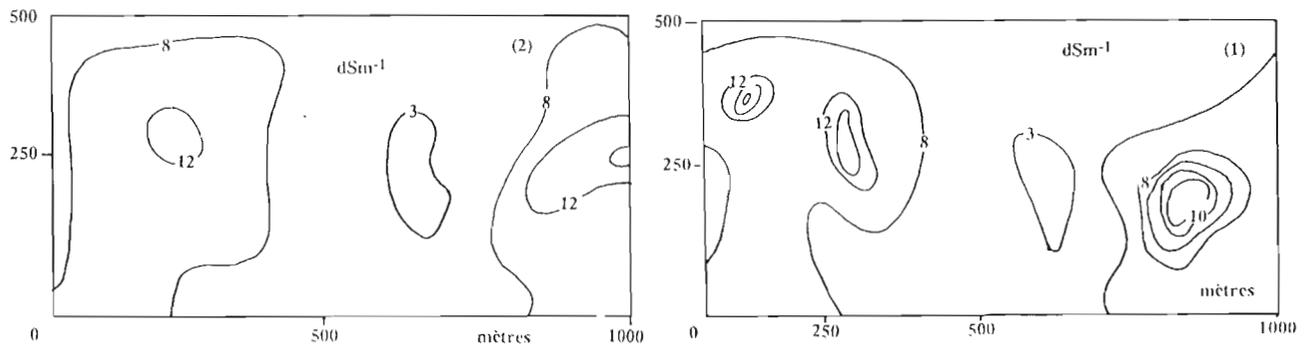


Fig.6.5- Carte des salures du sol sur 120 cm: fig.(1), CEsat₍₀₋₁₂₀₎ mesuré directement sur échantillons prélevés à la tarière. fig.(2), mesures CEM converties en CEsat₍₀₋₁₂₀₎.

- Influence de l'humidité sur la mesure CEM; parcelle de Sidi Saad et d'El Guettar:

On opère sur une surface de 1 m² par la méthode du drainage interne. La première sur des sols limono-argileux du centre à Sidi-Saad, avec une nappe profonde (3,5 mètres) permettant de distribuer la salure du sol entre 0 et 200 cm, la deuxième à El Guettar avec une nappe située à 2,5 mètres sur des sols limoneux.

Dans les deux cas, l'influence de la teneur en eau de sols sur la mesure de CEM concorde avec les calculs obtenus sur un grand nombre d'échantillons. Ils sont par contre plus précis. L'effet de la porosité sur la mesure CEM peut donc être apprécié pour une large gamme de sols, sans qu'il soit nécessaire de renouveler les expérimentations de terrain.

num	f	CEDIX	CEH	CEV	Temps
SC4	22,1	0,39	83	90	0
SC5	21,2	0,37	75	88	8 heures
SC1	18,3	0,35	52	60	24 heures

Tab.6.10- Mesures permettant de quantifier l'effet de l'humidité du sol sur les valeurs CEV et CEH. les mesures sont intégrées sur 120 cm.

$$CEH(\theta_1) = CEH(\theta_2) + 7,5(\theta_2 - \theta_1) \quad \text{et:} \quad CEV(\theta_1) = CEV(\theta_2) + 7,8(\theta_2 - \theta_1)$$

Une étude plus approfondie est en cours à El Guettar (Askri, non publié).

-Lessivage de sols très salés:

L'expérimentation a été menée à El Guettar sur une parcelle de sol très salée qui a été récupérée sur le chott (Fig.6.6). Les doses d'irrigation appliquées sont celles utilisées habituellement par les agriculteurs, soit 10l/s pendant 45 minutes sur une parcelle de 23x26 mètres, soit 85 mm d'eau par tour. La salure peut-être diminuée de 20 à 10 dSm⁻¹ avec 250 mm d'eau seulement.

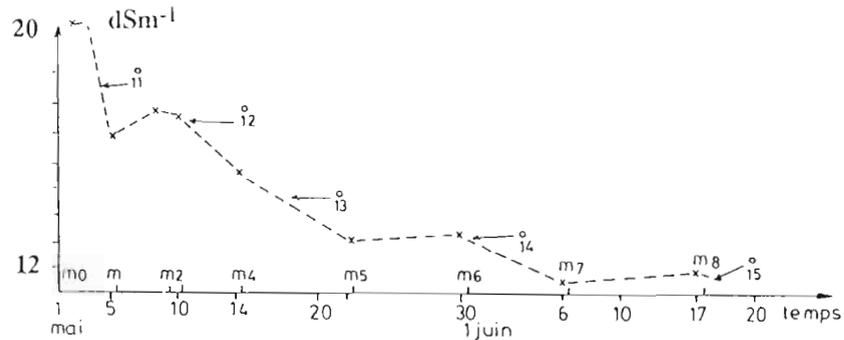


Fig.6.6- Lessivage de sels d'une parcelle de sols limoneux initialement très salés à El Guettar. Les lettres m_i renvoient aux irrigations successives.

La désalinisation des sols est très rapide entre ces deux valeurs. ensuite, lorsque la salure diminue, un équilibre entre les doses et la salure du sol s'établit, généralement autour de 6 dSm⁻¹ pour ces sols (fig.6.4).

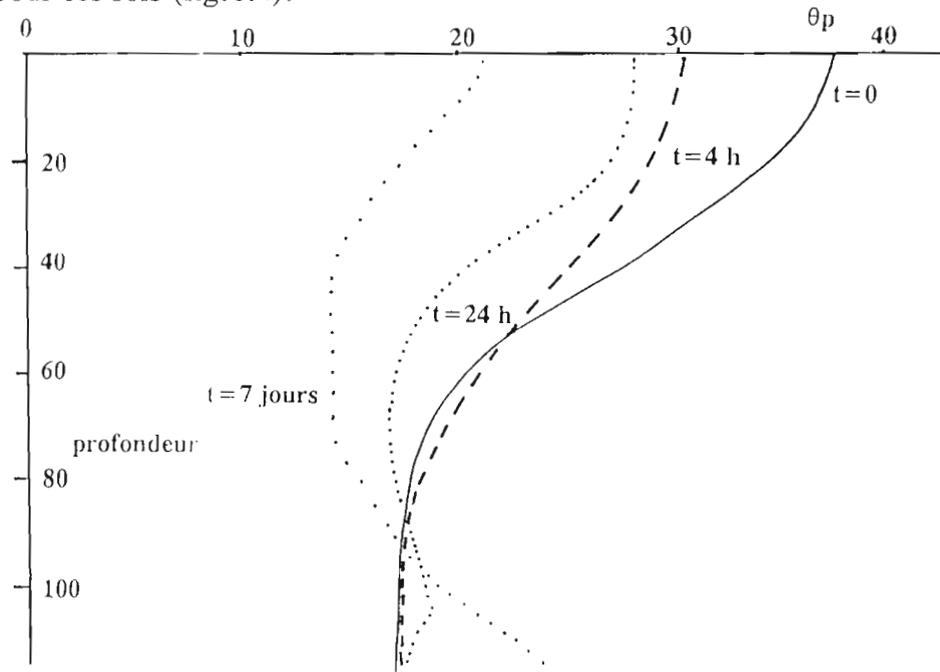


Fig.6.7- Redistribution de l'eau dans un profil de sol stratifié gypseux d'El Guettar. Expérience de drainage interne (apport d'eau de 180 mm, évaporation nulle). Les mesures de teneur en eau du sol sont rapportées au poids, non au volume de sol.

Dans les parcelles très ombragées d'oasis, l'eau d'irrigation se distribue dans le sol en fonction des porosités de chaque horizon. Les doses moyennes disponibles, soit $0,26 \text{ ls}^{-1}\text{ha}^{-1}$ à El guettar, par exemple, ne permettraient un lessivage des sels en dehors du profil, que si la nappe se trouvait à moins de deux mètres de profondeur. Or dans ce cas, les remontées de nappes induites par l'irrigation augmentent la salure des horizons de surface par capillarité.

6.6- Conclusions.

A l'exception de la Nefzaoua où l'eau est abondante, dans la plupart des périmètres irrigués, toutes les surfaces ne sont pas mises en eau en même temps. Dans les oasis du Sud, il y a dans chaque parcelle des palmiers qui peuvent s'alimenter en eau à partir de la nappe, en l'absence de toute irrigation. Dans le Centre et le Nord, l'arboriculture fruitière et plus rarement la jachère permettent l'économie d'eau.

Il reste des études à faire sur les besoins en eau des cultures pour définir en fonction du type de sol, les doses d'irrigation qui permettent de maintenir les sels en bas du profil, sans contaminer la nappe ni provoquer son ascension. Un séminaire a été organisé (Orstom et Direction des Sols du Ministère de l'Agriculture) à Tozeur sur la gestion de l'eau et des sols dans les oasis, les 8-9 décembre 1992. Il y a été recommandé de focaliser les études pluridisciplinaires sur un seul site, de manière à pouvoir répondre à ces questions, vitales pour l'économie de l'eau.

QUELQUES UNES DES STATIONS EXPERIMENTALES



Photo.1- Sols alcalins sur nappe perchée à Mornaguia.



Photo.2- Parcelle experimentale a Kalaat Landelous.



Photo.3- Installation des tensiometres à Zelba.



Photo.4- Pose d'un piezometre à Cebala.



Photo.5- Mesure de CEM en mode horizontal à Zelba.



Photo.6- Rampe d'irrigation à Sidi Saâd sur sols peu salés.

CHAPITRE VII

CONCLUSIONS

7.1-Résultats.

La Direction des Sols en Tunisie a une longue tradition d'étude des sols salés, tant en matière de diagnostic, que de cartographie et d'analyse en laboratoire. Ses études couvrent l'ensemble du territoire tunisien, on en trouvera une liste dans le chapitre suivant. Ce sont le plus souvent des inventaires pédologiques d'unités de paysage naturel, en vue d'un aménagement, les études de fonctionnement, quant à elles, ont été faites sur des parcelles, voire des monolithes.

La seule approche globale de la salinisation des sols à l'échelle du pays a été faite par le CRUESI à travers un ensemble de stations expérimentales dans lesquelles les variables sol, eau, climat, et système de culture ont été étudiées sur des parcelles. Cette échelle d'étude a permis de bien connaître les paramètres du fonctionnement hydrique des sols, cependant, elle ne convient pas à l'explication des changements de l'environnement.

Notre premier objectif était donc d'appréhender en Tunisie les problèmes de la salinité des sols à l'échelle du périmètre irrigué.
--

Pour y arriver, nous avons proposé une méthodologie adaptée aux variables dont dépend l'évolution de la salinisation. Après une enquête et des mesures préliminaires sur le terrain, nous avons retenu un réseau d'observatoires. Nos résultats se situent à deux niveaux:

- Résultats au niveau de la recherche:

La variable spatialisée que nous avons adoptée, c'est à dire: la salure globale apparente mesurée par conductivimétrie électromagnétique, a permis de nous affranchir de l'hétérogénéité de la répartition des sels dans le sol.

La cartographie basée sur cette mesure et l'emploi d'un logiciel géostatistique (Boivin, 1988), permettent de définir les tendances spatiales de variation et l'évolution dans le temps tout en maîtrisant l'erreur d'estimation.

Pour le transfert des résultats, les unités de paysage sont définies sur la base de critères agropédologiques. La parcelle représentative est un sous-ensemble d'unité fonctionnelle homogène dans laquelle sont faites les mesures. Le transfert d'échelle impose:

- le choix d'une variable qui garde sa signification à toutes les échelles étudiées,
- la connaissance de sa structure au sens géostatistique,
- la division de l'ensemble en autant d'unités susceptibles de variations semblables au cours du temps
- la définition d'un pas de temps et d'une durée des mesures.

Ceci fait, le transfert d'échelle est possible entre parties du paysage soumises à des variations de même nature et de même sens.

Cette démarche impose un grand nombre de mesures et une connaissance minimum du phénomène à toutes les échelles et en tout point de la zone étudiée. Mais les résultats acquis peuvent être régionalisés, ce qui est un intérêt majeur et général.

Concernant la dynamique des sels dans les zones irriguées, nous avons pu montrer que l'ensemble de la Tunisie pouvait être divisé en zones géochimiques homogènes à l'intérieur desquelles la précipitation des sels dans le paysage par évaporation pouvait être prédite par la détermination des ions appariés dans la solution du sol.

On dispose ainsi d'un dénominateur géochimique commun qui permet de passer de l'échelle du périmètre irrigué à celle du petit bassin versant.

Les recherches sont actuellement poursuivies dans cette direction.

Tout en gardant une coopération prioritaire entre la Direction des Sols et l'Orstom, il est maintenant possible, et même indispensable de poursuivre des études de sols salés dans un cadre élargi, prenant en compte la gestion de l'eau au niveau de l'utilisateur et son devenir après irrigation. Ce travail nécessite:

- en amont des enquêtes approfondies pour quantifier l'usage de l'eau à la parcelle, enquêtes qui sont du ressort d'agro-économistes et de bioclimatologistes,
- au centre l'intervention de pédologues familiarisés avec le traitement de variables spatialisées,
- en aval des mesures pour quantifier les sels exportés par les nappes souterraines, domaine de compétence des hydro-géologues.

Seule cette approche systémique permettra de préconiser des économies d'eau tout en maintenant la production agricole et la salure de sols à un niveau acceptable, sur l'ensemble du territoire. Les compétences existent, il suffit de les mobiliser.

CHAPITRE VIII

PUBLICATIONS ET RAPPORTS DU PROGRAMME SOLS

SALES EN TUNISIE

1989-1994

- BEN HASSINE H., 1989- Evolution saisonnière et variation interannuelle de la salure du sol dans la basse vallée de la Mejerdah, DS, Tunis, pub., n°E-S198, 10 p.
- BEN HASSINE H., HACHICHA M., JOB J.O., LOYER J.Y., 1988- La Conductivité électromagnétique: application au suivi de la salinité des sols des périmètres irrigués de Tunisie. Pub., DS/Orstom, 23 p.
- BEN HASSINE H., HACHICHA M., JOB J.O., LOYER J.Y., 1988- Etude de la salinité du périmètre de Sidi Saad. Situation en Juin 1988.DS/ORSTOM, 13 fig., 12p.
- BOIVIN P., BRUNET D., JOB J.O., 1988- Conductivimétrie électromagnétique et cartographie automatique des sols salés: une méthode rapide et fiable. Cah., ORSTOM sér., Pédol. vol. XXIV, n°1, p:39-47.
- BOIVIN P., HACHICHA M., JOB J.O., LOYER J.Y., 1989- Une méthode de cartographie de la salinité des sols. Science du Sol, Bull. de l'Association Française pour l'Etude du Sol, vol.27, n°1, p:69-72.
- BRANSIA M., 1990- Diagnostic de la salure dans le périmètre irrigué de Souk-Esseb. Cartographie de la salure à Jendouba. Séminaire sur le suivi de la salinité dans les périmètres irrigués, Sidi Thabet, 4-6 juin.
- BRANSIA M., JOB J.O., 1990- Cartographie de la salure dans le périmètre irrigué de Zama-Bou Salem. Deuxième Atelier sur l'utilisation de la CEM pour le suivi de la salure des sols, Sidi Thabet, 25-26 juin, DS/Orstom, 7 p.
- GRIRA M., 1993- Hydromorphie et salure des sols des oasis de Nafzaoua et Gherib. Etude de cas de Regim Matoug 1 et 2. in: "Salinisation des sols et gestion des eaux dans les oasis", actes du séminaire de Tozeur. Direction des Sols/Orstom, 7-9 déc. (sous presse).
- HACHICHA M., 1993- Les contraintes hydro-pédologiques dans les périmètres irrigués. Dir. Sols ES-265.

- HACHICHA M., BEN HASSINE H., 1992- Irrigation et salure dans le périmètre de Zelba. Direction des Sols, ES-263.
- HACHICHA M., BEN SALEM H., 1990- Risque de salinisation des sols dans le P.I. Cebala - Borj Touil. Direction des Sols/CRDA-Ariana, pub. n°E-2066.
- HACHICHA M., JOB J.O., 1994- La salinisation des sols en Tunisie: Bilan, recherches actuelles et perspectives d'aménagement. Numéro spécial du bulletin "Sols de Tunisie" n°15. Étude en cours d'édition.
- HACHICHA M., JOB J.O., 1994- Rapport de synthèse sur l'emploi de la conductivimétrie électromagnétique pour la surveillance de la salinisation des sols. Direction des Sols/Orstom (sous presse).
- HACHICHA M., MOHDI M., SOUSSI A., 1992- La salinité des terres dans le Kairouanais à travers le suivi des parcelles dans trois périmètres irrigués. DS, Tunis, 28 p.
- HACHICHA M., TRABELSI A., 1990- Salinité des terres et perméabilité des sols dans le périmètre de Cebala-Borj Touil irrigué aux eaux usées. Direction des Sols, ES-257.
- HACHICHA M., TRABELSI A., 1993- Evolution sous culture irriguée à l'eau salée des sols lourds salés de Kalaât Landelous. Résultats de la campagne de mesure de l'été 92 (sous presse).
- HACHICHA M., TRABELSI A., 1993- Evolution des sols sous irrigation dans le périmètre de la Cebalat Borj-Touil. ES 275.
- HACHICHA M., ZIDI M., JOB J.O., 1993- Lecture bibliographique sur les oasis tunisiennes; tendances de recherche. Séminaire sur la gestion des eaux et des sols dans les oasis, DS/Orstom, Tozeur, 8-9 déc., 9 p.
- JOB J.O., 1990- Conductivimétrie Electromagnétique: exemple d'étalonnage. Deuxième Atelier sur l'utilisation de la CEM pour l'étude des sols salés. ORSTOM/DS, Sidi-Thabet, 26-27 Juin, p.
- JOB J.O., 1992- Les sols salés de l'oasis d'El Guettar. Thèse, Univ., Montpellier II, 150 p.
- JOB J.O., BEN HASSINE H., 1991- Périmètres irrigués de Essaafet, Zelba-I (Gouvernorat de Mahdia). Etude la salinité globale par conductivimétrie Electromagnétique. ORSTOM/DS, 13 p.
- JOB J.O., BEN MOUSSA H., BELGHIT A., MTIMET A., 1993- Effet des crues de 1990 sur une oasis de montagne. Sècheresse, vol.4, n°3, p:153-159.
- JOB J.O., BOIVIN P., LOYER J.Y., 1991- Conductivimétrie Electromagnétique et représentation spatiale des sols salés. Premières journ., sur l'utilisation de la CEM pour L'étude des sols salés. ORSTOM/DS, Sidi-Thabet, 1-2 juin, 17 p.
- JOB J.O., HACHICHA M., 1989- Logiciels de base de données et cartographie automatique de la salure globale des sols. Premières Journées sur l'informatique appliquée à l'étude des sols salés, 28 juin-6 juillet, Direction des Sols, Tunis.
- JOB J.O., HACHICHA M., 1990- Suivi de la salure des périmètres irrigués par Conductivimétrie Electromagnétique. Rapport de campagne, 1989-1990. ORSTOM/DS, Tunis, 20 p.

- JOB J.O., HACHICHA M., 1991- Notion d'échelle et variabilité spatiale de la salure des sols. Séminaire ORSTOM/IFREMER, "Séminfor 4", 11-13 Sept., Brest, 3p.
- JOB J.O., HACHICHA M., 1994- La salinisation des sols et la gestion des eaux dans les oasis. Actes du séminaire de Tozeur. Direction des Sols/ORSTOM. en cours.
- JOB J.O., HACHICHA M., LOYER J.Y., 1990- Conductivimétrie Electromagnétique et cartographie de la salinité des sols. ORSTOM/DS, 33 p.
- JOB J.O., MERAI M., 1991- Suivi de la salure dans les oasis de Gafsa. Etat d'avancement du programme au 1/6/91.
- JOB J.O., MERAI M., 1992- Origine et gestion des sols salés de l'oasis d'El Guettar. Direction des Sols, Pub. n°ES- 627, 56 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., MOHDI M., HACHICHA M., 1989- Suivi de l'évolution de la salinisation des terres dans le périmètre irrigué de Sidi-Saad. Direction des sols, E-S n° 255.
- JOB J.O., TABBAGH A., LOYER J.Y., 1992- Réalisation d'un conductivimètre électromagnétique à faible pénétration. ORSTOM/CNRS, rapport de contrat de recherche MRT n°88L0467, 17 p.
- MTIMET A., PONTANIER R., 1993- Contraintes édaphiques et utilisation des eaux saumâtres en milieu oasien. in: "Salinisation des sols et gestion des eaux dans les oasis". Actes du séminaire de Tozeur, Direction des Sols/Orstom, 7-9 déc., (sous presse).
- MTIMET A., HACHICHA M., 1993- Les problèmes de drainage dans les oasis de Tozeur et Kébili. Note de conjuncture - Dir. Sols.
- PONTANIER R., JOB J.O., 1989- Quelques réflexions sur les recherches à mener en matière de sols salés. Journées du programme Environnement du CNRS, Lyon, 13-15 janvier.
- SAID A., 1993- Evolution de la salinité dans les oasis du gouvernorat de Gabès. in: "Salinisation des sols et gestion des eaux dans les oasis", actes du séminaire de Tozeur. Direction des Sols/Orstom, 7-9 déc. -sous presse).
- ZANTOUR M., 1992- Suivi et contrôle de la salinité des périmètres publics irrigués du gouvernorat de Bizerte (Périmètre d'Utique Nouvelle). CRDA Bizerte, 10 p.
- ZIDI Ch., JOB J.O., HACHICHA M., GRIRA M., 1993- Gestion des eaux et des sols dans l'oasis de Tarfaya, Direction des Sols, pub. n° ES-273, 12 p.

CHAPITRE IX

BIBLIOGRAPHIE SUR LES SOLS SALES DE TUNISIE

(1941-1993)

9.1-Introduction

Ce chapitre donne par ordre alphabétique les études faites en Tunisie sur les sols salés que nous avons compilées à partir des fonds documentaires auxquels nous avons eu accès à Tunis. Cette liste n'est pas exhaustive, mais elle donne un juste aperçu de l'importance des sols salés, des très nombreux travaux qui y ont été consacrés et de l'expérience acquise dans ce domaine par les chercheurs tunisiens. Le chapitre II, "Périmètres irrigués de la Tunisie: état de la situation", page 8, y fait abondamment référence.

9.2- Références bibliographiques.

- 2-ANONYME, 1941- Oasis de Sidi Ahmed Zaroug: un exemple d'utilisation des eaux salées en agriculture. Rés. Gén. de France à Tunis, p: 12-16.
- 4-ANONYME, 1952- Etude pédologique et hydrologique de la haute vallée de la Medjerdah, secteur 2, annexes du fascicule I. H.A.R, Sect., Spec., Et., Pédo., Hydro., n° 113.
- 6-AUBERT G., 1976- Les sols sodiques en Afrique du Nord. Ann. I.N.A. El Harrach, VI, 1, p.185-196.
- 8-BACH-HAMBA I., 1992- Bonification des sols: cas du périmètre irrigué de Kalaat Landalous. Caractérisation de la salinité initiale du sol en vue de la détermination des facteurs et des zones à risque de salinisation. Mém., Cycle de spécialisation INAT, 170 p., annexes.
- 10-BAHRI A, 1981- Geochemical characterisation of waters and soils of irrigated areas in the valley of Kairouan and the evaluation of the leaching fraction. Colloque Arabe sur l' Utilisation des Eaux Saumâtres en Agriculture, Tunis, 18-22 mai., 12 p.
- 12-BAHRI A, 1982- Utilisation des eaux et des sols salés de la plaine de Kairouan (Tunisie). Thèse de Doc. ing., INPT/CRGR, Toulouse, 156 p.
- 14-BAHRI A., El AMAMI S., 1983- Méthodologie de la recherche sur les sols salées. CRGR, 5 pages.

- 16-BAHRI A., EL AMAMI S., 1986- Utilisation of saline waters and soils in Tunisia. Results and research prospects, Research Centre for Rural Engineering, 16 p.
- 18-BAHRI A., GALLALI T., EL-AMAMI S., 1985- Hydropédologie des paysages en Tunisie centrale: évolution géochimique des eaux et des solutions interstitielles au cours de leur concentration. 1er Congr., Nat., Sci., Terre: actes, n° 31, T. 2, p: 247-255.
- 20-BALDY CH., COINTEPAS J.P., 1971- Parcelle d'essai de Ksar Ghilane. Sols de Tunisie n° 3, p: 3-58.
- 22-BALDY CH., COINTEPAS J.P.; POUGET M. 1967- Parcelle d'essai de Ksar Rihane: Résultats de 15 années d'essais. S/Secr. d'Etat d'Etat à l'Agriculture, Etudes Spéciales, Section de Pédologie, 42 p.
- 24-BECOMEV-PAVA, 1964- Etude des périmètres irrigués type en Tunisie. Secrétariat d'Etat à l'Agriculture, Tunis, 48 p.
- 26-BELKHODJA K., 1966- Les sols des bourrelets éoliens des sebkhas de Tunisie. Conf., Sols Méditerranéens, Madrid.
- 28-BELKHODJA K., 1969- Les sols halomorphes de Tunisie. Sols de Tunisie, n° 1, p: 21-50.
- 30-BELKHODJA K., 1970- Salinité et humidité du sol. Estimation de la salinité de la solution du sol. DRES, Div., des Sols, E-S 75, 9 p.
- 32-BELKHODJA K., 1972- Origine, évolution et caractères de la salinité des sols dans la plaine de Kairouan (Tunisie Centrale). Contribution à l'étude de leur mise en valeur. Sols de Tunisie, n° 4, 105 p.
- 34-BELKHODJA K., 1971- Les sols irrigué et irrigables en Tunisie. DRES, Div., des Sols, E-S 79, 7 p., cartes.
- 36-BELKHODJA K., 1971- Parcelle d'essai de Bou-Salem pour l'irrigation d'appoint avec l'eau de la Medjerdah. Div., des Sols, n° E-S 77, 15 p.
- 38-BELKHODJA K., KHALFALLAH S., 1971- Enquête sur les sols à agrumes irrigués à l'eau salée, 9 p. 2 cartes.
- 40-BELKHODJA K., KHALFALLAH S., 1972- Rapport sur la tolérance des agrumes à l'eau salée d'irrigation en fonction de la qualité du sol et des conditions culturales. DRES, Div., des Sols, E-S 83, 71 p. 5 cartes.
- 42-BELKHODJA K., LASRAM M., 1972- Notes bibliographiques sur l'irrigation des agrumes à l'eau salée. Div., Sols, E-S 84, 13 p.
- 44-BELKHODJA K., KHALFALLAH S., LASRAM M., 1973- Etude de la qualité des fruits de l'orange maltaise demi-sanguine en Tunisie en fonction de la nature du sol et de la qualité des eaux d'irrigation. DRES, Div., Sols, n°E-S 85, 13 p.
- 46-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.
- 48-BEN AISSA L., 1985- Géochimie des eaux et des sédiments de la lagune d'El Kantara (Sud-Est). Approche thermodynamique de la précipitation des carbonates. Mémoire DEA, Fac. Sci. Tunis, 82 p.
- 50-BEN GACEM A., non daté- Note sur les besoins en eau de l'oasis de Gabès. DRE, Tunis.
- 52-BEN HADEF H., 1990- Etude sur modèle numérique de l'aménagement de la Sebkha Séjoui. Mémoire de 3ème cycle, INAT. 69 p.

- 54-BEN HASSINE H., 1989- Comportement du sol de la parcelle de simulation à Zelba après deux années d'irrigation par des eaux saumâtres. Bilan des sels et analyse géochimique, n°E-S 254, 17 p.
- 56-BEN HASSINE H., 1991- Evaluation de l'état de la salinité des sols du périmètre irrigué de Zelba après les pluies de l'hiver 89/1990, E-S 261.
- 58-BEN HASSINE H., BEN HASSINE T., BEN AMMAR A., 1989- Evolution saisonnière et variation interannuelle de la salure du sol dans la basse Vallée de la Mejerdah. Dir., des Sols, E-S 193.
- 60-BEN HASSINE H., BEN HASSINE T., BEN AMMAR A., 1980- Contrôle des périmètres irrigués. Salure et profondeur de la nappe phréatique du périmètre irrigué d'El Habibia (Août 1979 et Mars 1980), n° E-S 128A.
- 62-BEN HASSINE H., BEN HASSINE T., BEN AMMAR A., 1983- Contrôle des périmètres irrigués. Etude de la salinité de la nappe phréatique dans les périmètres irrigués d'El Habibia et de la rive gauche de la Mejerdah.
- 64-BEN HASSINE H., HACHICHA M., JOB J.O., LOYER J.Y., 1988- Etude de la salinité du périmètre de Sidi Saad. Situation en Juin 1988, (convention DS/SODASS). Ministère de l'Agriculture de Tunisie, Dir., des Sols et ORSTOM, 13 figures, 12 p.
- 66-BEN HASSINE H., HACHICHA M., JOB J.O., LOYER J.Y., 1988- La Conductivité électromagnétique : application au suivi de la salinité des sols des périmètres irrigués de Tunisie. Pub., Dir., des Sols de Tunisie/ORSTOM , 19 fig., 1 ph., 23 p.
- 68-BEN NEJI M., 1987- Contribution à l'étude du comportement hydraulique des accumulations gypseuses en Tunisie présaharienne. Mémoire DEA, Fac. des Sciences, Tunis, 65 p.
- 70-BEN SALAH A., 1966- Etude de l'irrigation traditionnelle dans l'oasis de Gabès. Tunis. Sous-Secrét., d'Etat à l'Agric., pub. n° E-S 60, 15 p.
- 72-BEN ZINA N., RIEU M., 1985- Prévision de la salinisation des sols dans les périmètres irrigués. Périmètre de Bou-Salem: Dir., des Sols, n° E-S 216, Tunis.
- 74-BESBES M., 1978- L'estimation des apports aux nappes souterraines. Un modèle régional d'infiltration efficace. Thèse de Doc. d'Etat. Univ., Paris VI, 270 p.
- 76-BOIVIN P., HACHICHA M., JOB J.O., LOYER J.Y., 1989- Une méthode de cartographie de la salinité des sols: conductivimétrie électromagnétique et interpolation par krigeage. Science du Sol, Vol.27, n°1, p: 69-72.
- 78-BOUAZIZ E., non daté- Comportement des cultures arbustives irriguées à l'eau saumâtre dans les conditions arides de la Tunisie centrale. Le Grenadier. Cahier du CRGR N°10, 25 p.
- 80-BOUAZIZ E., 1973- Influence de la salure et de la fertilisation azotée sur une culture de Tomate irriguée à l'eau salée. DESN, Univ. Paris VII, Paris.
- 82-BOUAZIZ. E., 1974- Observations préliminaires à l'étude de fertilisation en condition de salinité. CRGR, Tunis.
- 84-BOUAZIZ E., 1977- Comportement de l'olivier variété Chemlali irrigué à l'eau saumâtre dans les conditions arides de la Tunisie Centrale. Les Cahiers du CRGR, n° 4, 21 p.
- 86-BOUAZIZ E., 1978- Comportement des cultures arbustives irrigués à l'eau saumâtre dans les conditions arides de la Tunisie Centrale, chap. 2: le grenadier. Cahiers du CRGR n° 10, 25 p.

- 88-BOUAZIZ E., 1980- Tolérance à la salure de la pomme de terre. *Physiologie Végétale*, Vol. 18, n° 1, p: 11-17.
- 90-BOUAZIZ E., 1983- Intensification et irrigation à l'eau saumâtre de l'olivier (*Olea europea L.*) dans les grandes plaines du Centre Tunisien. Mémoire de 3ème cycle de spécialisation (oléoculture et oléotechnie). INAT/CRGR, 122 p.
- 92-BOUAZIZ E., BOUZAZI A., GALLALI T., EL AMAMI S., 1979- Tolérance à la salure de la pomme de terre. Séminaire sur la physiologie et le développement des plantes en milieu salé, 17-20 Mai, Sfax, 7 p.
- 94-BOUAZIZI H., 1981- Etude de la salinité et de l'envasement de la retenue du barrage Nebeur sur l'oued Mellegue (Tunisie). Thèse Doc, Univ. Besançon, 168 p.
- 96-BOUAZIZI H., BROQUET P., VIGUIER C., 1985- Résultats préliminaires de l'étude relative à la salinité et à l'envasement du lac du Barrage Nebeur sur l'Oued Mellègue, Tunisie. 1er Congr. Nat. Sci. Terre. Oct 1981, Vol.2, p: 73-83.
- 98-BOUKSILA F., 1992- Bonification des sols: cas du périmètre irrigué de Kalaat Landalous. Caractérisation physique des sols et étude de la variabilité spatiale de leurs propriétés en vue de la détermination des facteurs et des zones à risque de salinisation. Mém., Cycle de spécialisation INAT, 192 p., annexes.
- 100-BOURALY J., 1952- Etude pédologique et hydrologique de la Haute Vallée de la Medjerdah. Fascicule I. Section Spéciale d'Etudes de Pédologie et d'Hydrologie n°113, 26 p. 1 carte.
- 102-BOURALY J., 1954- Note sur les variations de l'humidité et de la teneur en sel de l'eau du sol entre deux irrigations à la Soukra. H.E.R., Sect., Spec., Etude Pédo., Hydro. n°708/E.
- 104-BOURALY J., 1958- Note sur le transport par le vent des agrégats limono-argileux des sols salés à alcali de Heriet El Batène (Kairouan). H.E.R., Sect., Spéc., Et., Pédo., Hydro., n° 131.
- 106-BOUZAZI A. 1978- Influence de la qualité de l'eau d'irrigation sur le comportement du soja et du tournesol. Séminaire sur l'olivier et les autres plantes oléagineuses 7 Juillet, Mahdia, 2 p.
- 108-BOUZAZI A., 1977- Rendement de quelques cultures en fonction de la salinité de l'eau d'irrigation. Journée d'information sur l'utilisation des eaux salées, Sfax, 18 Déc., 3 p.
- 110-BOUZAZI A. 1979- Effet des eaux salées sur le rendement agricole. Colloque de Zaghuan sur l'eau et l'énergie 10-18 Mars, 4 p.
- 112-BOUZAZI A., 1980- Irrigation à l'eau salée de deux variétés de cotonnier dans les essais de plein champ. *Physiologie Végétale*, Vol.19, n° 1, p: 35-44.
- 114-BOUZAZI A., 1982- Les besoins en eau des palmiers. Session de formation réservée au jardinage et à la protection des palmiers dattiers, Sidi Thabet, 19 Avril-4 Mai, 8 p.
- 116-BOUZAZI A., 1987- L'utilisation des eaux saumâtres en irrigation. CRGR, 7 p.
- 118-BOUZAZI A., 1987- La réponse des cultures de la salinité. CRGR, 3 p.
- 120-BOUZAZI A., EL AMAMI S., 1980- Irrigation à l'eau salée de deux variétés de cotonnier dans les essais de plein champ. *Physiologie Végétale*, Vol 18, n° 1, p: 35-44.
- 122-BRANSIA M., 1988- Diagnostic de la salure dans le périmètre irrigué de Souk-Essebt. Cartographie de la salure à Jendouba. Séminaire sur le suivi de la salinité dans les périmètres irrigués, Sidi Thabet, 4-6 juin., 9 p.

- 124-BRANSIA M., JOB J.O., 1990- Cartographie de la salure dans le périmètre irrigué de Zama-Bou Salem. 2ème atelier sur l'utilisation de la CEM au suivi de la salure des sols, Sidi Thabet, 25-26 juin 1990. ORSTOM/DS, 7 p.
- 126-BRYSSINE G., CHEROTSKY G., 1951- Note sur la relation entre la salure du sol, celle de l'eau d'arrosage et le régime d'irrigation. 70 ème Cong., de L'AFAS, Tunis, C.R.76, p: 71-76.
- 128-BUREAU P., 1959- Tolérance à l'eau salée de quelques cultures pratiquées en Tunisie. H.A.R, Sect., Spec., Etude Pédo., Hydro. n° 16, 22 p.
- 130-BUREAU P., COINTEPAS J.P., ROEDERER P., 1961- Tolérance à l'eau salée de quelques cultures pratiquées en Tunisie.H.A.R., Section Spéciale d'Etudes Hydrologiques et Pédologiques, E-S 16, 22 p.
- 132-BUREAU P., ROEDERER P., 1961- Contribution à l'étude des sols gypseux du Sud tunisien: croûtements gypseux de la partie sud du golfe de Gabès. Bull. de l'A.F.E.S., Paris.
- 134-CERAMALLY P., 1969- Note sur les problèmes géochimiques des eaux de la région du Kriz. Tunis, BIRH, 8 p., DRÉ, Tunis.
- 136-CERAMELLE P., 1969- Note sur la situation hydrogéologique de l'oasis de Tozeur. Tunis, BIRH., 4 p.
- 138-CHAABOUNI Z., 1976- Techniques et problèmes de drainage dans les zones arides de Tunisie: essai de synthèse des travaux menés par le CRUESI 1976. Séminaire sur la Recherche Scientifique et le Développement des Zones Arides, Tozeur, 26-28 Nov., 5 p.
- 140-CHAABOUNI Z., 1977- Exigence de quelques cultures annuelles de point de vue besoin en eau et drainage des sols dans les périmètres irrigués de la région de Sfax, 8 p.
- 142-CHAABOUNI Z., 1981- Economie dans l'utilisation des eaux saumâtres pour l'irrigation et son influence sur le drainage et la salinité du sol dans les régions arides de la Tunisie Centrale. Colloque arabe sur l'utilisation des eaux saumâtres en agriculture, CRGR ALECSO, 18-22 Mai, Tunis, 5 p.(en Arabe).
- 144-CHAABOUNI Z., BOUAZIZ E., BOUZAIID A., 1988- Etude de l'influence des eaux d'irrigation d'un gramme par litre de salinité sur la productivité du Maïs dans les zones semi-arides. ACSAD/CRGR.
- 146-CHATTAOUI T., DUFÉY S., LAUDELOUT H., 1977- Simulation physique et mathématique du mouvement des sels dans les sols de la haute Vallée de la Mejerdah de Tunisie. Sols de Tunisie n° 9, p: 110-148.
- 148-CHAUVEL A., 1962- Carte des possibilités de drainage et d'assainissement de la plaine de Grombalia. Carte pédologique de Grombalia-Soliman. H.E.R., Sect., Spéc., Et., Pédol., Hydrol., étude n° 206.
- 150-COINTEPAS J.P. 1961- Compte rendu concernant la parcelle d'essai de Ksar Rhilane: Période 1952-1960. H.A.R, Sect., Spéc., d'Etudes Pédo., Hydr., 20 p.
- 152-COINTEPAS J.P., 1959- Les Sols de la zone côtière entre Sidi Ali et Mahdia. H.A.R, Sect., Spéc., d'Etudes Pédo., Hydr., n° 154 28 p.
- 154-COINTEPAS J.P., 1963- Note sur le drainage du périmètre de Melloulèche. Subdivision d'Etude Pédologique n° 236, 7 p., 1 carte.
- 156-COINTEPAS J.P., 1965- Irrigation à l'eau salée et drainage en Tunisie. Cah. ORSTOM, sér., pédol., vol., III, n° 4, p: 299-304.
- 158-COINTEPAS J.P., 1965- Résultats d'un essai d'irrigation à l'eau salée en Tunisie. 8ème Congrès International de la Science du Sol , E-S 58, 6 p.

- 160-COINTEPAS J.P., 1968- Résultats d'une étude de l'évolution de la salure dans le Sud tunisien. ES 67, DRES Tunis, 12 p.
- 162-COINTEPAS J.P., Irrigation à l'eau salée et drainage en Tunisie. Cah., ORSTOM, Sér., Pédol., Vol. III, n° 4, p: 299-305.
- 164-COINTEPAS J.P., MORI A., 1968- Considérations sur la dynamique des sels dans quelques sols de Tunisie. Mission ORSTOM en Tunisie, 48 p.
- 166-COINTEPAS J.P., MORI A., 1968- Etude typologique des sols salés de Tunisie, 27 p.
- 168-COINTEPAS J.P., NOVIKOFF G., DAMAGNEZ G., 1961- L'irrigation à l'eau salée en Tunisie, ORSTOM/DRES, Div., des Sols, E-S 31.
- 170-COINTEPAS J.P., EL AMAMI S., HAMZA H., 1969- Besoin en eau de l'oranger et évolution comparée de l'arbre et du sol à l'irrigation en fonction de la qualité et de la quantité de l'eau. H.E.R, Service Pédologique, E-S 69.
- 172-COINTEPAS J.P., ROEDERER P., 1961- Premiers résultats de l'évolution de la salure du sol par irrigation à l'eau salée en Tunisie. Ann. Agron., Vol.12, n° 1, p: 121-126.
- 174-COINTEPAS J.P.; NOVIKOFF G.; ROEDERER P. 1959- Cours de perfectionnement UNESCO sur la salinité: notice explicative de la tournée. Etudes Spéciales. Sect. Spéc. d'Etudes de Pédologie et d'Hydrologie. Secr., d'Etat à l'Agriculture. 1 Vol. 50 p.
- 176-COLOMBANI J., 1977- Les apports telluriques naturels dissous de la Medjerdah à la Méditerranée convention D.R.E.S/ORSTOM Action de type B. 14 p.
- 178-COQUE R., 1979- Sur la place du vent dans l'érosion en milieu aride. L'exemple des lunettes (burrelets éoliens) de la Tunisie Méridionale. n°1 et 2, p: 15-21.
- 180-COTHA 1958- Aménagement des oueds Zeroud et Merguellil. Etude pédologique, évolution de la salure. Sect., Spéc., Etude Pédo., Hydro., rapport n° RCT 420.
- 182-CRAMER S., 1982- Zum litoral-bereich im gemaessigt-ariden klima : das sebkhagourine-system, Sud-tunesien. Thèse Doc., Berliner Geowiss. Abh., Reihe A., 105 p.
- 184-CRUESI, 1967- Influence des doses et fréquences du mode d'irrigation et de la salure à l'eau d'irrigation sur la qualité des récoltes, 5 p.
- 186-CRUESI, 1969- Quelques aspects de l'irrigation à l'eau saumâtre dans le Centre et le Sud. Coll. Régional Sfax, 3,4,5 mars 1969, 86 p. + cartes.
- 188-CRUESI, 1969- Consommation d'eau des palmiers à Tozeur. Lab., de physique du sol, rapport n° 31, 3 p.
- 190-CRUESI, 1967- Réaction des palmiers dattiers à l'irrigation. Note n° 1, Tunis.
- 192-CRUESI, 1967- Réaction du sol et de certaines cultures à l'irrigation à l'eau saumâtre. Note n°2, 16 p., multigr.
- 194-CRUESI, 1968- Lessivage des sols salés d'Utique. Note n° 4, 12 p.
- 196-CRUESI, 1968- Résistance à la salure. Note Technique n° 5, 39 p.
- 198-CRUESI, 1968- Luzerne irriguée à l'eau saumâtre. Note n° 7, 35 p.
- 200- CRUESI, 1968- Aspersion à l'eau saumâtre, note n° 9, 15 p.
- 202-CRUESI/UNESCO, 1970- Recherche et formation en matière de d'irrigation avec des eaux salées: 1962-1969. Rapport technique, 243 p.
- 204-DAMAGNEZ J., DE VILLELE O., 1959- Besoins en eaux d'une culture d'orangers. Influence de la salure et de l'enracinement. Ann. SBAT, Vol. 32 pp.159-180.

- 206-DAMAGNEZ J., DE VILLELE O., 1961- Les besoins en eaux réels des cultures et les possibilités d'optimisation des réserves d'eau du sol en Tunisie. Influence de la salure. Annales Agronomiques, Vol. 12, n° 1, p: 109-119.
- 208-DE FORGES J.M., OLLAT Ch., 1974- Evolution chimique des sols irrigués avec des eaux saumâtres. Réf: PGIS-TN-SGN/02766.
- 210-DESAUNETTES J.R., 1951- Emploi des méthodes américaines de caractérisation des sols salés. H.E.R., Sect., Spéc., d'Et., Péd., Hydr. n° E-S 110.
- 212-DESAUNETTES J.R., 1955- Méthodes analytiques du laboratoire de pédologie. H.E.R., Sect., Spéc., Et., Pédo., Hydro., 76 p.
- 214-DESSUS P., 1947- Etude préliminaire concernant diverses oasis du Nefzaoua. Sec., Spéc., Et., Pédo., Hydro., n°72, Tunis, 20 p.
- 216-DESSUS P., 1950- Note concernant les périmètres de Zarzis et l'utilisation des eaux des puits artésiens de Zaouia IV de Zarzis.
- 218-DESSUS P., 1950- Note sur l'utilisation des eaux salées dans les territoires du Sud. La Tunisie Agricole, Vol.51, n° 3, p: 34-46.
- 220-DESSUS P., 1952- Note préliminaire concernant le périmètre irrigable de Chakmou. Sect., Spéc., Et., Pédo., Hydro., n° 377/E, 5 p.
- 222-DESSUS P., GELPE J., 1953- Note sommaire concernant le périmètre d'El Faouar du point de vue drainage. Pub n° 494/E.
- 224-DOMMERGUES Y., COMBREMMENT R., BECK G. et OLLAT Ch., 1969- Note préliminaire concernant la sulfato-réduction rhizosphérique dans un sol salin tunisien. Revue Ecol. Biol. Sol, 6, p.115-129.
- 226-DUMAS. J.M., 1966- Problème d'expérimentation sur le drainage en Tunisie: suggestions et bibliographies. H.A.D., pub., n° 123, 38 p.
- 228-ECHAARI H., 1978- Lessivage de sols de la partie aval du périmètre de Melloulèche, C.R.G.R., n° 32.
- 230-ECHAARI H., 1970- Etude du périmètre irrigué de Nakta, Tunisie. Rapport de stage ORSTOM, 39 p.
- 232-EHRWEIN J., 1952- Enquête sur l'utilisation des eaux chargées en vue de l'irrigation dans la région de Sousse. H.E.R, Sect., Spec., Etude Pédo., Hydro. (n° non connu).
- 234-EL AMAMI S., 1975- Comportement de l'olivier irrigué à l'eau douce et à l'eau salée. Synthèse des résultats des essais conduits en Tunisie. Deuxième Séminaire Oléicole International, Cordoue, 6-17 Octobre, 5 p.
- 236-EL AMAMI S., 1976- Rendements de quelques cultures expérimentées en Tunisie en fonction de la salinité de l'eau CNEA, 4 p.
- 238-EL AMAMI S., 1976- L'utilisation de l'eau dans les zones arides de Tunisie. Séminaire sur la recherche scientifique et le développement des zones arides de Tunisie, Tozeur 26-28 Nov., 7 p.
- 240-EL AMAMI S., 1977- L'utilisation des eaux de ruissellement pour l'Agriculture dans les zones arides Tunisiennes les cahiers du CRGR n° 7, 7 p.
- 242-EL AMAMI S. 1979- Projet d'expérimentation d'irrigation goutte à goutte sur palmeraie, 5 p.
- 244-EL AMAMI S., 1981- L'expérience Tunisienne dans l'utilisation des eaux saumâtres en agriculture. Colloque arabe sur l'utilisation des eaux saumâtres en agriculture, CRGR ALECSO, 18-22 Mai, Tunis, 5 p.(en Arabe).

- 246-EL AMAMI S., BAHRI A., MARRAKCHI M., 1979- Problème de la productivité en milieu salé: recherches et perspectives. Séminaire sur la physiologie et le développement des plantes en milieu salé, 17-20 Mai, Sfax.
- 248-EL AMAMI S., BALDY Ch., POUGET M.J., 1967- Rénovation d'une palmeraie littorale ancienne, étude de sa remise en culture intensive. Annales de l'INRAT, Vol.40, fasc.8, p: 2-41.
- 250-EL AMAMI S., CHAABOUNI Z., 1980- Projets pilotes à l'échelon national et régional. Réunion des comités nationaux arabes. Rapport sur la mobilisation des eaux saumâtres, l'économie de l'eau et l'évolution, 5 p.
- 252-EL AMAMI S., LABERCHE J.C., 1973- Climats et micro-climats des oasis de Gabès comparés à l'environnement désertique. Annales de l'INRAT, vol.46, n° 3, p: 1-20.
- 254-EL-BATTI A., 1974- Hydrogéologie de la plaine d'Enfidaville. Th. Doct. 3e Cycle, Univ., Grenoble, 122 p.
- 256-EL FEKIH M., 1988- Sols et eau dans les oasis. Journées d'études des régions présahariennes, Kébili, 20-23 Mars, 6 p.
- 258-EL IDRISSE M.R., 1988- Diagnostic de la salure de sols par mesure de la résistivité électrique "in situ". ORSTOM, Tunis, 43 p.
- 260-EL MAHJOUB M., BOUZAIIDI A., 1987- Effet de la salinité des eaux d'irrigation sur la sensibilité du cotonnier au *Macrophomina phaseoli*. Agronomie et Horticulture n° 2, p: 1-6.
- 262-EL MAHJOUB M., BOUZAIIDI A., JOUHRI A., 1979- Influence de la salinité des eaux d'irrigation sur la sensibilité du tournesol au *Macrophemica phaseoli* (Maabt). Annales de Phytopathologie, Vol. II, n° 1, p: 61-67.
- 264-ENNABLI M., 1981- Problèmes du sel dans les eaux souterraines en Tunisie. Sem., sur le dessalement de l'eau, 1980, Tunis, 21 p.
- 266-ERHWEIN 1952- Enquête sur l'utilisation des eaux chargées en vue de l'irrigation de Sousse. H.E.R., Sect., Spéc., Et., Péd., Hydro., n° 109.
- 268-FLORIDA S., PERTHUISOT J.P., 1970- Une série saline flamande: la Sebkhia el Kebira de Zarzis. C.R. Acad. Sc. Paris, t.270, p: 1668-1671.
- 270-FOURNET A., non daté - Note provisoire sur l'étude de la Sebkhia Sedjoumi (Tunis). Sect., Spéc., Et., Péd., Hydro., n° 1038/E 4 p. 2 cartes.
- 272-GAILLARD C., 1957- Quelques aspects du problème de l'eau dans les oasis. Cahiers de Tunisie, Vol.5, n° 17-18, p: 7-21.
- 274-GALLALI T., 1979- Influence de la pression partielle de CO₂ sur les variations du pH et l'échange NA/Ca-Mg dans les sols salés en Tunisie, 5 p
- 276-GALLALI T., 1980- Transferts sels-matière organique en zones arides méditerranéennes. contribution à l'étude pédo-biologique des sols salsodiques formés sur matériaux sédimentaires. Thèse doc. d'Etat., Univ., Nancy I, 202 p.
- 278-GALLALI T., 1981- La géochimie des sols et les eaux de surface en Tunisie. Pratique de l'irrigation dans la basse vallée de la Medjerda. Doc. n° 4: le mouvement des sols dans l'utilisation des eaux saumâtres en agriculture - Tunis 18 Mai, 8 p.

- 280-GALLALI T., EL AMAMI S., JACQUIN F., 1979- A kinetic study on mineralization of substrates tagged with C14 and incorporated into highly carbonated salsodic soils. Studies about humus-Transaction of the international Symp. "Humus et Planta VIII" Brno, Tchecoslovaquie, Vol.1, p. 164-169.
- 282-GLORIEUX. C.H., 1969- Résistance des asperseurs à moyenne pression fonctionnant avec des eaux chargés. Publication H.A.D., n° 128.
- 284-GOLDSMITH F.B., SMART N., 1982- Age, spacing and growth rate of tamarix as an indication of lake boundary fluctuations at sebkhet Kelbia, Tunisia. J. Arid Environ., n° 5., p: 43-51.
- 286-GROTZ R., 1985- New developments in the Ben Galouf oasis (southern Tunisia). Geographisches Institut, Universität Stuttgart, Silcherstr. Applied Geography and Development, n° 25, p: 88-102.
- 288-GUEDDARI M., 1980- Géochimie des sels et des saumures du Chott El Jerid , sud tunisien). Thèse doc. 3ème cycle, Univ. Paul Sabatier, Toulouse, 131 p.
- 290-GUEDDARI M., 1984- Géochimie et thermodynamique des évaporites continentales. étude du lac Natron en Tanzanie et du Chott El Jerid en Tunisie. Thèse Doc. d'Etat, Univ. Louis Pasteur, Strasbourg, 127 p.
- 292-GUYON, B. 1965- Considération sur l'hydraulique du drainage des nappes. CRUESI, 112 p.
- 294-HACHICHA M., 1985- Sur l'évolution des sols d'une lunette argileuse de la basse vallée de la Mejerdah. Mémoire de 3ème cycle INAT, 87 p.
- 296-HACHICHA M., 1987- Exploitation des données. 1- Traitement informatique d'un suivi de l'évolution de la salure du sol par des capteurs. 2- Analyse géostatistique. Dir., des Sols, E-S 235, 19 p.
- 298-HACHICHA M., 1993- Les contraintes hydro-pédologiques dans les périmètres irrigués. Dir., des Sols, E-S 265.
- 300- HACHICHA M., BEN HASSINE H., 1990- Irrigation et salure dans le périmètre de ZELBA entre Sept. 88 et Sept. 89, E-S 263.
- 302-HACHICHA M., BEN SALEM H., 1990- Risque de salinisation des sols dans le périmètre irrigué de Cebala-Borj Touil. Dir., des Sols/CRDA Ariana, n° E-2066.
- 304-HACHICHA M., DJELIDI B., TRABELSI A., BRARI N., 1992- Impact du drainage sur les variations saisonnières de la salinité dans le périmètre de Cebala-Borj Touil, irrigué aux eaux usées épurées. Dir., des Sols, E-S 264.
- 306-HACHICHA M., JOB J.O., 1991- Sols irrigués et salinisation en Tunisie. ORSTOM/DS, Tunis, 35 p.
- 308-HACHICHA M., MHIRI A., STOOPS G., 1987- Aspects micromorphologiques de l'évolution des sols de lunettes argileuses en Tunisie. Micromorphologie des Sols, Ed. AFES, p: 193-196.
- 310-HACHICHA M., MOHDI M., SOUSSI A., 1990- La salinité des terres dans le kairouanais à travers le suivi des parcelles dans trois périmètres irrigués. Dir., des Sols, Tunis, 28 p.
- 312-HACHICHA M., SOUSSI A., 1990- Diagnostic de la salure actuelle des sols dans le périmètre de Gafsa Sud-Ouest, Dir., des Sols.
- 314-HACHICHA M., TRABELSI A., 1990- Contrôle de la salure des sols dans le périmètre irrigué de Cebala-Borj-Touil irrigué aux eaux usées. Dir., des Sols, Tunis, 22 p.

- 316-HACHICHA M., TRABELSI A., 1990- Etude de la perméabilité et de la salinité dans le périmètre irrigué de Cebala, secteur des eaux usées. Dir., des Sols, pub. n°E-S 257.
- 318-HADDAD A., 1981- Etude de l'isotherme à 90°C du système ternaire K_2SO_4 - $MgSO_4$ - H_2O . Mémoire de DEA, Faculté des Sciences de Tunis, 45 p.
- 320-HAMDANE A., MAMI A., 1977- Etude des conditions de drainage, de salure et d'alcalinité dans les périmètres irrigués de la basse vallée de la Mejerdah. DRES, E-S 128.
- 322-HAMZA M., 1959- Cours d'entraînement sur la salinité des sols. Rapp., Génér., Sect., Spéc., Et., Pédol., Hydrol., n° 36.
- 324-HAMZA M. 1959- Etude pédologique de l'oasis d'El Hamma-Béchima. Sec., Spéc., Et., Pédol., Hydro., E-S 160, Tunis, 42 p.
- 326-HAMZA M., 1961- Contribution à l'étude de la tolérance de l'olivier à la salure et à l'asphyxie Subdivision d'Etudes Pédologiques, E-S 35, 20 p.
- 328-HAMZA M., 1978- La salinisation secondaire en Tunisie. Sols de Tunisie n° 10, p: 1-39.
- 330-HAOUES H., 1963- Note sur les ressources en eau de l'oasis de Degache. BIRH, Tunis, 9 p.
- 332-HARZALLAH-SKHIRI F., 1982- Recherches sur les modalités d'adaptation des plantes aux sols salés: Thèse de doc. 3ème cy., Univ., P. et Marie-Curie, Paris VI, 67 p.
- 334-HERNOT A., 1953- Note sur le drainage du périmètre de Chouigui-Oued Bou Soumt par puits filtrants, N° 553/E.
- 336-HERNOT A., 1955- Drainage des nappes superficielles par la Mejerdah, de Djedeida à la mer en 1953/1954. SSEPH, n° 121.
- 338-HOLLIS G.E., 1986- Forecasting the future salinity regimes of Garaet el Ichkeul, Tunisia after a water diversion scheme and wetland conservation measures. Int. Conf. Water Quality Modeling, 1986, Bournemouth, p: 403-419.
- 340-HORMAN G., BRANSIA M., 1989- Le drainage des sols argileux sous irrigation. rapport de fin de projet, E-S 249.
- 342-HORN (van), J.W., COMBREMONT R., NANAA O., OLLAT Ch., 1969- Leaching efficiency. Int., Conf., on Arid Lands in a Changing World, 3-13 juin, Tucson, Arizona, USA, 25 p.
- 344-JACQUIN, F., MALLOUHI N., GALLALI T., 1978- Influence des ions Na sur l'évolution de la paille C14 incubée avec des sols lourds. Bull. ENSAIA - Nancy XX, I-II, p.3-11.
- 346-JACQUIN, F., MALLOUHI N., GALLALI T., 1979- Etude sur l'intensité des transferts de matières organiques sous l'influence de la salinité. C.R.Acad.Sci., t.790, Série D.
- 348-JEDOUI Y., BOBIER C., CIRAC P., PUJOS M., 1981- Contribution à la connaissance des systèmes lagunaires en domaine méditerranéen: hydrologie et sédimentologie du Bahiret El Bou Grara (Tunisie). Thétys, Vol. 10, n° 1., p: 39-52.
- 350-JOB J.O., 1990- Conductivimétrie Electromagnétique: exemple d'étalonnage. Deux., Journ., sur l'utili., de la CEM pour L'étude des sols salés. ORSTOM/DS, Sidi-Thabet, 26-27 Juin, 3 p.

- 352-JOB J.O., 1992- Les sols salés de l'oasis d'EL Guettar (sud tunisien). Thèse Doc., Univ., Montpellier II, 150 p.
- 354- JOB J.O., BEN HASSINE H., 1990- Périmètres irrigués de Essaafet, Zelba-I (Gouvernorat de Mahdia). Etude la salinité globale par conductivimétrie Electromagnétique. ORSTOM/DS, 13 p.
- 356- JOB J.O., BOIVIN P., LOYER J.Y., 1988- Conductivimétrie Electromagnétique et représentation spatiale des sols salés. Premières journ., sur l'utili., de le CEM pour L'étude des sols salés. ORSTOM/DS, Sidi-Thabet, 1-2 juin, 17 p.
- 358-JOB J.O., HACHICHA M., 1990- Suivi de la salure des périmètres irrigués de Tunisie par conductivimétrie électromagnétique. Rapport de campagne 1989-1990. ORSTOM/DS, 21 p.
- 360-JOB J.O., HACHICHA M., 1991- Notion d'échelle et variabilité spatiale de la salure des sols. Séminaire Séminfor 4 "Transferts d'Echelle" ORSTOM/IFREMER, 11-13 Sept., Coll., Coll., et Séminaires, ORSTOM.
- 362-JOB J.O., HACHICHA M., LOYER J.Y., 1990- Conductivimétrie Electromagnétique et cartographie de la salinité des sols. ORSTOM/DS, 33 p.
- 364-JOB J.O., MERAI M., 1990- Etude de la salinité de l'oasis d'El Guettar. Dir., des Sols, E-S 258.
- 366-JOB J.O., MERAI M., 1991- Suivi de la salure dans les oasis de Gafsa. Etat d'avancement du programme au 1/6/91.
- 368-JOB J.O., MERAI M., 1992- La salure des sols de l'oasis d'El Guettar. Séminaire national sur la salinisation des sols et l'impact sur les rendements. ATPNE, 26-27 juin, Tunis, 9 p.
- 370-JOB J.O., MOHDI M., HACHICHA M., 1990- Suivi de l'évolution de la salinisation des terres dans le périmètre irrigué de Sidi-Saad. Dir., des Sols, E-S 255.
- 372-JOUIROU M., 1982- Faciès sédimentaires et processus dynamiques dans la formation d'un milieu lagunaire: évolution holocène et actuelle du lac de Tunis et de ses abords. Thèse 3ème cycle, Univ. Bordeaux I, 231 p.
- 374-KACEM M., 1990- Contribution à l'étude de la réutilisation des eaux de drainage dans le gouvernorat de Kébili. Cas du périmètre de SMIDA. Mémoire de 3ème cycle, INAT, Tunis, 127 p.
- 376-KADRI A., 1987- Pédologie des milieux gypseux. Contribution à l'étude hydro-pédologique et géochimique des accumulations. Mémoire de DEA, 171 p.
- 378-KADRI A., GALLALI T., 1988- Contribution à l'étude hydro-pédologique et géochimique des accumulations gypso-salines dans le Nefzaoua, Tunisie présaharienne. Rivista di agricoltura subtropicale e tropicale, Anno LXXXII, n° 1-2, p: 189-241.
- 380-KALLEL M.R., 1985- Salinité des eaux de surface en Tunisie. Ressour. Eau Tunisie, n° 8., p.: 21-34.
- 382-KHALFALLAH S., VIEILLEFON J., HACHICHA M., BEN HASSINE H. et BRANSIA M., 1988- Recherche sur les conditions d'emploi d'eau de salinité différente pour la récupération et l'irrigation des sols présentant des phénomènes de salure. Rapport final, DS/INAT, E-S 248.
- 384-KHALFALLAH S., LASRAM M., 1976- De l'influence de la nature du sol et de la salure de l'eau d'irrigation sur la qualité des oranges maltaises demi-sanguine de Tunisie. Div., des Sols E-S 94, 13 p.
- 386-KOVDA V., 1963- Tolérance des plantes aux sels en solution dans l'eau d'irrigation et dans le sol. SCET/CGR, 10 p.

- 388-LACHAAL M., 1992- Exploration de la variabilité de la tolérance au sel chez la lentille (*Lensulinaris*). Thèse 3ème cycle, Fac. sci., Tunis.
- 390-LARGUECHE H., 1960- Comportement du système racinaire de quelques essences forestières dans les sols salés. H.A.R., Sec., Spéc., Et., Pédol., Hydrol., E-S 32, 33 p.
- 392-LONG G., SABATHE R., 1951- Etude de quelques profils pédologiques en relation avec les associations végétales des terrains salés de la région de Sidi Bou Zid.
- 394-LOYER J.Y., CLAUDE J., FRANCILLON G., 1976- Les alluvions déposées par l'oued Mejerda lors des crues exceptionnelles de Mars 1973. DRES/ORSTOM, 132 p.
- 396-MAKNI-SIALA A., 1991- Etude géochimique et microbiologique de la nappe phréatique de la région de Jebeniana. Mémoire de DEA, Fac. Sci., Tunis, 104 p.
- 398-MALET. PH., 1965- Essais l'irrigation de Betterave à sucre avec des eaux salées et sur sol alcalinisé à Bou Salem, Tunisie. Pub., H.A.D., n° 131.
- 400-MALET. PH., 1969 -Essais d'irrigation du blé tendre Tobar 66 avec des eaux salées et sur sol alcalinisé à Bou Salem, Tunisie. pub., H.A.D, n° 130.
- 402- MALET. P.H., BROSSIER , 1966- Etude du comportement des tomates et des piments irrigués par aspersion avec des eaux salées à plus de 2,5 g/l. H.A.D, publication n° 120.
- 404- MALLOUHI N., JACQUIN F., 1984- Influence des ions sodium sur les mécanismes d'humification. Sciences du Sol, Vol. 26, n° 4. p: 215-222.
- 406-MAMI A., 1977- Un essai simple de lessivage d'un sol à excès de sel situé à Nianou, plaine de Grombalia. DRES, Div., des Sols, E-S 122.
- 408-MAMI A., 1977- Etude de l'influence de la profondeur de la nappe phréatique sur la salinité du sol dans la basse vallée de la Mejerdah (El Habibia). DRÉS, Div., des Sols, E-S 121.
- 410-MAMI A., 1978- Etudes et investigations hydropédologiques pour le drainage des terres et des sols. DRES, Div., des Sols, E-S 142.
- 412-MAMOU A., non daté- Utilisation des isotopes en hydrologie dans le Sud Tunisien. Deuxième symposium des ressources en eau.
- 414-MAMOU A., 1978- Le tarissement des sources artésiennes dans le Sud Tunisien et son effet sur l'augmentation de la salinité de l'eau. DRE, Gabès. 22 p.
- 416-MARAI M., 1986- Contrôle de la salinité dans les oasis de Gafsa Sud-Ouest et de Lella. n° 2049/E.
- 418-MASSON. J., LOBERT A., 1965- Evolution de la salure des sols sous irrigations périmètres de Hendi Zitoun. Etude E-S 106.
- 420-MAY D. 1984- Untersuchungen zur geoökologischen situation der noerdlichen Nefzaoua-Oasen (Tunesien). Stuttgarter Geogr. Studien, Vol.102, p: 1-223.
- 422-MEBHIOUB K., 1985- Etude géochimique des quatre premiers bassins de le saline de Sfax. Ann. Mines Géol., n° 31, T.2., p: 133-137.
- 424-MEDHIOUB Kh., PERTHUISOT J.P., 1981- The influence of peripheral sabkhas on the geochemistry and sedimentology of a tunisian lagoon: bahiret el Biban. Sedimentology, Vol. 28, n° 5., p: 679-688.

- 426-MEKRASI A.F., 1978- Comblement des déficits en eau d'irrigation dans la région de Ghannouch (Gouvernorat de Gabès).
- 428-MENENTI M., LORKEERS A., VISSERS M., 1986- An application of thematic mapper data in Tunisia: estimation of daily amplitude in near-surface soil temperature and discrimination of hypersaline soils. I.T.C. Journal, n° 1., p: 35-42.
- 430-MHIRI A., 1978-Recherches sur la sulfato-réduction rhizosphérique dans un sol salé. Thèse Doct. d'Etat, Univ. Paris VII, 190 p.
- 432-MHIRI A., 1977- Sur la sulfato-réduction rhizosphérique dans un sol salin, causes de l'engorgement du sol de Nekta. Ann., INRAT, Vol.50, Fasc.2.
- 434-MHIRI A., 1985- Sur la sulfato-réduction rhizosphérique. Exsudation des sulfates par les racines de la Féverole (*Vicia faba*, var., minor). 1er Congr. Nat., Sci., Terre, 1981, Tunis. Ann. Mines Géol., n° 31, T.2., p: 287-293.
- 436-MHIRI A., 1985- Effet de l'irrigation sur la stabilité structurale des sols de texture fine. Ann. Mines Géol., n° 31, T.2., p: 295-301.
- 438-MHIRI A., ELLOUMI M.J., LAOUNI M., 1983- Economie d'eau en irrigation de cultures familiales dans les zones arides. in: Proc. of Symp., "Isotopes and Radiation techniques in Soil Physics and irrigation studies", IAEA/FAO, Aix en Provence, p: 285-290.
- 440-MONTOROI J.P., 1981- Etude de deux séquences de sols salés dans le Nord et le Sud tunisien. Rapport de stage, DRES, Div., des Sols, 143 p.
- 442-MONTOROI J.P., 1983- Etude de la dynamique de l'eau et des sels sur une séquence de sol argileux de la basse vallée de la Medjerdah (secteur d'El Habibia): rapport de campagne 1981-1982, E-S 207.
- 444-MONTOROI J.P., BEN JERIDI F.D., 1985- Etude de la dynamique de l'eau et des sels sur une séquence de sol argileux de la basse vallée de la Medjerdah (secteur d'El Habibia). Rapport de la campagne de mesure 1983, E-S 229.
- 446-MTIMET A. 1987- Sauvegarde des oasis de Gabès. Etat de la salure et comportement hydrique, E-S 241, 57 pages.
- 448-MTIMET A., 1984- Carte des ressources en sols de la Tunisie feuille de Zarzis, E-S n° 205, 21 p., 1 carte.
- 450-MTIMET A., 1980- Note préliminaire concernant la région d'Oued El Melah. Dir., des Sols, n° 70, 4 p. 2 cartes.
- 452- MTIMET A., 1991- Sauvegarde des oasis du gouvernorat de Gabès. Dir., des Sols, E-S 259.
- 454- MTIMET A., ESCADAFAL R., 1982- Carte des ressources en sols de la Tunisie. Feuille de Medenine. Dir., des Sols, 19 p., 1 carte.
- 456-MTIMET A., BESBES M., BEN AMMAR M., BEL HADJ BELGACEM M., 1987- Sauvegarde des oasis du gouvernorat de Gabès: état de salure des sols et comportement hydrique. Dir., des Sols, E-S 241, 57 p.
- 458-NAANAA O., 1969- Contribution à l'étude de l'évolution des sols irrigués à l'eau salée. Influence des doses d'irrigation sur un sol salin de Tunisie et sur sa culture (luzerne). Rapport de stage ORSTOM/CRUESI, Tunis.
- 460-NOVIKOFF G., 1956- Les associations halophiles de Tunisie. H.A.R, Sect., Spec., Et., Pédo., Hydro., E-S 10, 13 p.

- 462-NOVIKOFF G., 1958- Relation entre la structure de la végétation et la stratification des milieux halophiles en Tunisie. Bull. Serv., Carte Phytogéographique, série B, Tome II, Fasc. 1,.
- 464-NOVIKOFF G., 1960- Etude agrologique de quelques palmeraies des Nefzaouas et du Djerid. H.E.R., Sect., Spéc. Ét., Pédol., Hydrol., E-S 26, 33 p.
- 466-NOVIKOFF G., 1961- Contribution à l'étude des relations entre le sol et la végétation halophile en Tunisie. Annales de l'INRAT, Vol. 34, 339 p.
- 468-NOVIKOFF G., 1963- Etude pédologique et possibilités d'aménagement de l'oasis de Gafsa-El Ksar, rive droite. H.E.R., Subd., d' Etudes Pédologiques n° 235, 4 p, 2 cartes.
- 470-NOVIKOFF V., 1932- Les eaux salées et les plantes cultivées. Bull. Soc., Horticulture de Tunisie, 30 ème année. 1ère partie: n° 286, p: 73-76. 2ème partie: n° 287, p: 97-101.
- 472-NOVIKOFF V., 1935- Note sur l'irrigation avec les eaux salées. Almanach agricole tunisien, p: 327-330.
- 474-NOVIKOFF V., 1946- Note sur l'utilisation des eaux salées. Ann., SBAT, Vol. 19, Tunis, 26 p.
- 476-OCHI R., 1984- Modélisation des transferts de l'eau et des sels dans un sol du périmètre irrigué de la haute vallée de la Mejerdah. Mémoire de 3ème cycle, INAT, 122 p.
- 478-OLLAT Ch., et BECVAROVA H., 1964- Analyse des sels solubles et échangeables. Manuel d'analyse CRUESI/UNESCO, document interne, 39 p.
- 480-OLLAT Ch., et al., 1969- Salure et alcalisation d'un sol salé et calcaire irrigué avec des eaux saumâtres, CRUESI, 8 p.
- 482-OLLAT Ch., et al., 1969- Lessivage et desalcalisation d'un sol salé à alcali, CRUESI, 7 p.
- 484-OLLAT Ch., 1973- Influence d'un amendement gypseux sur le sol de Chott Mariem (1971-1972), Doc., n° 3327, CRGR.
- 486-OLLAT Ch., 1973- Observations concernant l'évolution de la salinité de divers sols de Tunisie irrigué à l'eau salée. Doc., n° 3392.
- 488-OLLAT CH., BECVROVA A., BOUZAIDI A., COMBREMONT R., 1969- Lessivage et desalcalisation d'un sol salé à alcali. Agrokemia es Talajtan, T.18, p: 103-112.
- 490-PAGE W.D., 1972- The paleoclimatic significance of gypsum soils, Southern Tunisia. Geol. Soc. Amer., Abstr. Programs, Vol. 4, n° 7., p: 620.
- 492-PAN C.L., Melle HOLDERBACH, BEN DJEMIA H., 1959- Influence des différentes concentrations en sels des eaux d'irrigation et la croissance du riz. Ann. SBAT, Vol. 32, pp. 1-41.
- 494-PAN C.L., BEN DJEMIA H., 1962-Tolérance du riz à différentes concentrations de l'eau en sel. Ann. INRAT, Vol. 35, pp. 205-216.
- 496-PERTHUISOT J.P., 1975- La Sebkhia El Mellah de Zarzis. Génèse et évolution d'un bassin paraliq. Travaux du labo de Géologie, ENS, Paris, 252 p.
- 498-PERTHUISOT J.P., 1974- Les dépôts salins de la Sebkhia El Melah de Zarzis. Conditions et modalités de la sédimentation évaporitique. Rev., Géogr., Phys., et Geol., Dynamique, Vol. XVI, Fasc. 2, p: 177-188.

- 500-PERTHUISOT J.P., FLORIDA S., JAUZEIN A., 1972- Un modèle récent de bassin côtier à sédimentation saline: la Sebkhah el Melah (Zarzis), Tunisie. Rev. Géogr. Physique et de Géologie Dynamique,, Vol. XIV, Fasc. 1, p: 67-84.
- 502-PERTHUISOT J.P., JAUZEIN A., 1975- Sebkhahs et dunes d'argiles: l'enclure endoréique du pont du Fahs, Tunisie. Rev., Géographie Physique et Géodynamique, T. 2, Vol. XVI, Fasc. 3, p: 295-306.
- 504-PONCET J., 1960- La mise en valeur du sud tunisien. STB/E-51, 62 p.
- 506- POUGET M., 1966- Utilisation des eaux de la nappe du continental intercalaire région d'El Hamma. H.E.R., Subd., d' Etudes Pédologiques n° 307, 2 p.
- 508- POUGET M., 1968- Contribution à l'étude des croûtes et encroûtements gypseux de nappe dans le sud Tunisien. Cah. ORSTOM, Ser. Pédol. Vol. VI, n° 3-4, p: 309-365.
- 510-POUGET M., S.D.- Les encroûtements gypseux actuels de nappe dans le Sud Tunisien 33 p.
- 512-RABIA M., 1985- Etude géologique de la région des chotts (Sud Tunisien) par télédétection spatiale. Détection de la radio-activité naturelle et analyse hydrogéochimique. Mémoire de 3ème cycle, INAT, Tunis, 204 p.
- 514-RAHAINGOMANANA Nathalie, 1992- Observations sur le périmètre irrigué avec les eaux usées traitées de Cebala durant la campagne estivale 1992. Rapport de stage CRGR/ORSTOM, 29 p.
- 516-RICOLVI M., 1975- Quelques aspects de la mise en valeur du Jerid (Sud Tunisien). Options méditerranéennes, n° 28, p: 89-93.
- 518-ROEDERER P., 1966- Note sur les sols halomorphes. DRES, Div., de Pédologie, E-S 50, 11 p.
- 520-ROEDERER P., FOURNET A., SOURDAT M., 1961- Types de sol des parcelles de l'ONU. Réactions prévues à l'irrigation. ORSTOM, 19 p.
- 522-SAIDANE A., BAERT L., VANDERDEELEN J., 1974- Sur le comportement des phosphates en milieu calcaire et salin. I-Etude théorique des équilibres du système CaCO_3 , CO_2 , H_2O , P_2O_5 , SO_3 , CaF_2 , Mg, Na, Cl. Mededelingen Fakulteit Landbouw. Wetenschafen Gent, 39, n° 1, p: 305-336.
- 524-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 Doct, Univ. Nancy, I.N.P.L., Nancy, 208 p.
- 526-SASSI S., 1969- Contribution à l'étude de la Sebkhah Tejimane et du Chott El Guettar. Thèse Doc., 3ème cycle, Paris.
- 528-SIMONEAU P., 1960- Influence de la salinité sur les plantes et les cultures en Afrique du Nord, E-S 28.
- 530-SLAMA. F., 1975 - Drainage et lessivage de l'azote, du potassium, du sodium et du calcium (Cherchef) Laboratoire de Chimie du sol, CRGR,
- 532-SLAMA F., BOUAZIZ E., 1976- L'irrigation à l'eau salée. Effets sur la chimie du sol, effets sur le développement du soja (Résultats de la station de Cherfech). Cahiers du CRGR, n°x, 39 p.
- 534-SLAMA F., BOUZAIIDI A., 1977- Le tournesol (*H. annuus* L.) irrigué à l'eau saumâtre. Les cahiers du CRGR n° 5, 16 p.
- 536-SOULAMAGNON H., 1929- Recherche sur les chlorures apportés au sol par l'atmosphère. Ann. SBAT, Vol. 6 pp. 163-174.

- 538-SOULAMAGNON H., CONSTANT, SCHEUR, 1933- Recherche sur les chlorures apportés au sol par l'atmosphère. Ann. SBAT, Vol. 10 pp. 169-178.
- 540-SOURDAT M., 1960- Etude de la Sebka de Skanes. H.A.R, Sect., Spec., Et., Pédo., Hydro., n° 164, 27 p. 6 cartes.
- 542-SUSINI J., ROUAULT M., KERKEB A., 1972- Essais d'utilisation en analyse des sols salés d'une électrode sensible aux ions sodium. Cah. ORSTOM Sér., Pédo., Vol. X, n° 3.
- 544-SUSINI J., 1981- Electrode ionique sensible aux ions calcium. sa fabrication, son utilisation dans les eaux et les suspensions de sol. DRES, E-S 196
- 546-TRON M., 1955- La mise en valeur de la vallée de la Medjerdah: quelques problèmes techniques posés par l'irrigation. Etude n° 172, 32 p.
- 548-UNESCO, 1973- Relation between alkalization and salinity. Tunisia: Research and training on irrigation with saline water. Tech., Report, Chap. II, 25 p.
- 550-UNESCO, S.D.- Algérie, Tunisie Etude des ressources en eau du Sahara septentrional. Rapport sur les résultats du projet. Conclusions et recommandations, p: 1-78.
- 552-VALLES V., VALLES A.M., 1982- Etude méthodologique des transferts d'eau et des sels dans un monolithe de sol argileux. 2ème partie: suivi de la salure par capteurs et caractérisation géochimique des solutés. Dir., des Sols n° E-S 199, 47 p.
- 554-VALLES V., VALLES A.M., VIELLEFON J., 1983- Etude méthodologique des transferts d'eau et des sels dans un monolithe de sol argileux. 3ème partie: Suivi de la salure par capteurs et caractérisation chimique de solutés. ORSTOM/DRES, pub E-S 203, 70 p.
- 556- VAN DER BERG 1960- Rapport sur les problèmes d'irrigation et de drainage dans le périmètre d'irrigation de la Basse Vallée de la Mejerdah. DRES, n° E-S 18.
- 558-VERNET A., 1968- Etude sur l'irrigation de l'oranger à l'eau douce et à l'eau saumâtre. Bulletin de l'ENSAT n° 20 et 21.
- 560-VIEILLEFON J., 1979- Contribution à l'amélioration de l'étude analytique de sols gypseux. Cah., ORSTOM Sér., Pédo., Vol. XVII, n° 3.
- 562-VIEILLEFON 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. ORSTOM/DS, E-S 181, 22 p.
- 564-VIEILLEFFON J, OLIVE P., HUBERT P., 1983- Etude méthodologique des transferts d'eau et de sols dans un monolithe de sol argileux. 1ère partie. DRES/OTORSTOM, E-S 198, 36 p.
- 566-VIEILLEFFON 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 DRES/ORSTOM 1981, 101.p, Dir., des Sols, E-S 190.
- 568-VIEILLEFON J., 1983- Recherches sur l'économie de l'eau et la prévention de la salure dans les périmètres irrigués en Tunisie. DGRST/ORSTOM, 20 p.
- 570-WATSON A., 1985- Structure, chemistry and origins of gypsum crusts in southern Tunisia and the Central Namib Desert. Sedimentology 32, p: 855-875.
- 572-WINDMOSER P., 1984- Programmes d'action pour la maîtrise de la salinité et pour les mesures d'amendements des sols dans les périmètres irrigués de Bou Heurthma. GTZ/OMVPI, Jendouba, 78 p.

- 574-YANKOVITCH L., 1946- Recherche d'une méthode d'étude de la résistance des plantes aux chlorures. C.R., Conf. de Pédologie, Montpellier, Ed. AFES, p: 416-419.
- 576-YANKOVITCH L., BOEUF F., 1946- A partir de quelle teneur en NaCl une terre devient-elle salée? C.R. Acad., Agriculture, de France, t.52, p: 186-189.
- 578-YANKOVITCH L., 1949- Résistance aux chlorures des plantes cultivées. Ann. SBAT, Vol. 22 pp. 21-76.
- 580-YANKOVITCH L., 1950- Résumé des travaux du SBAT sur les terres salées et leur utilisation. La Tunisie Agricole, Vol. 51, n° 2, p: 13-15.
- 582-YANKOVITCH L., 1951- Résistance aux chlorures des plantes cultivées. II- Betterave potagères, radis, navet, chou et fenouil, tomate marmande d'Algérie. Ann. SBAT, Vol. 24 pp. 33-64.
- 584-YANKOVITCH L., 1951- Résultats obtenus au Service Botanique et Agronomique de Tunisie concernant la résistance des plantes cultivées aux chlorures. Note présentée au Congrès de l'APAS, Tunis, 7 p.
- 586-YANKOVITCH L., et YANKOVITCH G., 1953- Nitrification des terres salées. C.R. Acad., Agriculture de France, Vol. XXXIX, p: 321-323.
- 588-ZANTE P., VIEILLEFON J., 1981- Contribution à l'étude des transferts du Gypse sur une toposéquence de sols du Sud Tunisien. ORSTOM/DS, E-S 191, 31 pp.
- 590-ZANTOUR M., 1990- Suivi et contrôle de la salinité des périmètres publics irrigués du gouvernorat de Bizerte (Périmètre d'Utique Nouvelle). CRDA Bizerte, 10p.
- 592-ZARROUK A., MARZOUK B., CHERIF A., 1982- Action du chlorure de sodium sur la croissance des plants d'oliviers. Séminaire international sur l'utilisation des eaux chargées en oléiculture, 19-22 Oct., 1982 Tunis. INRST, 5 pages.
