

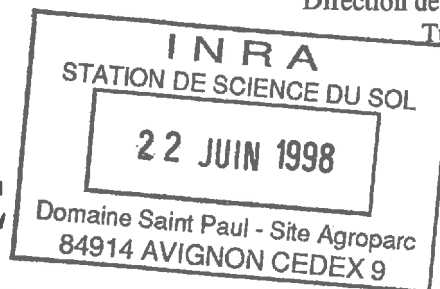
N° d'ordre: 98-6

N° de série: D 23

Ecole Nationale Supérieure Agronomique
de Rennes
Institut National de Recherches Agronomiques de
Rennes

Institut National de Recherches
en Génie Rural, Eaux et Forêts
Direction des Sols
Tunisie

THESE



Présentée le 23 Février 1998 devant

L'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE DE RENNES

Pour obtenir le titre de Docteur de l'E.N.S.A.R.
Mention: **Sciences de l'environnement**

par

Mohamed HACHICHA

MISE EN VALEUR DES SOLS SALES

Organisation, Fonctionnement et Evolution

de sols salés du Nord de la Tunisie

devant le jury composé de Messieurs:

G. BOURRIE, Professeur à l'Université de Rennes I
C. CHEVERRY, Professeur à l'ENSAR
A. MHIRI, Professeur à l'INAT (Tunisie)
M. RIEU, Directeur de Recherches, ORSTOM
G. STOOPS, Professeur à l'Université de Gand (Belgique)
D. ZIMMER, Directeur de Recherches, CEMAGREF

Président du jury
Directeur de Thèse
Examineur
Rapporteur
Rapporteur
Examineur

" الجنة تحت أقدام الأمهات "

إلى بثينة و خليل،

إلى روح أبي،

إلى أمي التي علّمتني الصبر.

Le paradis est sous les pied des mères.

A Boutheina et Khalil,

A la mémoire de mon père,

A ma mère qui m'a appris la patience.

REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont d'abord à ces grains de terre venus de ces montagnes si hautes et si lointaines. Arrachés de leur berceau au cours d'un jour pluvieux, ils ont entamé leur migration. D'un ruisseau à un oued et d'un oued à un autre, ils se sont retrouvés dans le grand lit de la Mejerda. A la fin de leur parcours, brassés par des méandres et éjectés dans une plaine, ils ont été largués dans la mer. Petit à petit, ils ont senti l'accalmie. D'autres grains, des connaissances et des étrangers venus d'ailleurs, sont venus se joindre à eux. Pour la première fois de leur vie, ils goutaient les sels. Emprisonnés au milieu des autres grains, ils observaient leur espace se comprimer et d'autres grains se superposèrent dessus. Ils se retrouvaient dans une eau salée qui les baignait à partir de la base. Puis un jour, des racines de plantes inconnues venaient se mettre dessus et les déranger. Ce sont des halophytes, des êtres particuliers, très avides d'eau salée. Une familiarité s'instaurait entre les divers grains et même avec ces halophytes qui les purifiaient des sels. Ces derniers, des êtres malsains qui affectaient leur identité. Ils vécurent ainsi jusqu'au jour où des êtres à six et quatre pâtes et même des êtres rampants sont venus creuser des chenaux et des galeries et se confondre à leur habitat. Puis récemment, ils sentirent tous le tremblement. Des fossés profonds ont été creusés un peu partout délogeant ces amis de tout genre et décapant les halophytes. Depuis, ils ne comprennent plus rien. Les sels qui les faisait souffrir par la base, proviennent maintenant d'en haut. Maintenant, plusieurs êtres partagent leur espace, des cucurbitacées, des solonacées, des légumineuses, et la liste n'en finit pas. Ils ne se posent plus de question, ils subissent les désirs de l'homme.

C'est un peu l'histoire de ces grains de terre, de ces êtres qui partagent leur espace et des sels qui les affectent dans leur monde d'aujourd'hui et de demain, que je développe dans les pages suivantes.

Mes remerciements vont ensuite aux personnes qui m'ont aidé à construire cette étude.

Je tiens à remercier vivement le Professeur 'Si' Ali Mhiri, qui m'a proposé le sujet depuis plus d'une quinzaine d'années. Car cette étude s'est déroulée d'une manière intermittente, depuis un mémoire du cycle de spécialisation en pédologie de l'INAT achevé en 1985, à cette thèse entamée à partir de 1992. Il m'a transmis son intérêt pour ces grains de terre et ces grains de sels. Il m'a aidé à les reconnaître et à les analyser, à imaginer leur histoire et à les comprendre. Pour tout ceci, je ne mesurais pas l'affection et l'admiration que je lui porte.

Ma gratitude est profonde pour Monsieur le Professeur Claude Cheverry. Il s'est intéressé à mes grains de terre et de sels quand ma conviction pour leur étude, un moment, a faibli, et a cru en moi quand j'ai douté de moi-même. Je le remercie pour toute son aide et sa clairvoyance. J'ai trouvé en lui un maître attentif toujours disponible et prêt à approfondir avec enthousiasme chaque nouveau problème posé. Il m'a constamment prodigué des conseils au cours de mes séjours dans son laboratoire à Rennes.

Je remercie Monsieur le Professeur Georges Stoops à qui je dois mes connaissances en micromorphologie et mon ouverture sur une des multiples méthodes d'approche de la pédologie qui m'était inconnue. Il m'a apporté une aide très précieuse pour protéger mes grains dans le coton, les expatrier en Belgique, et les imprégner dans les résines afin de les observer de très près et imaginer leur monde dont jamais personne ne soupçonnait la richesse et la complexité. Il me fait de plus l'honneur d'être le rapporteur de ce travail.

Je tiens à adresser mes plus vifs remerciements à Monsieur le Professeur Guilhem Bourrié, Directeur de recherches à l'Université Rennes I qui me fait l'honneur de participer au jury.

Je remercie également M. Michel Rieu, Directeur de Recherches à l'ORSTOM pour avoir accepté de faire partie du jury et d'être le rapporteur. A travers lui, j'exprime toute ma reconnaissance pour l'aide que l'ORSTOM et ses chercheurs m'ont apporté au cours de mes travaux en Tunisie et mes séjours en France.

Ma reconnaissance va à M. Daniel Zimmer, Directeur de Recherches et Chef de la Division DEAN du Cemagref, qui m'honore en faisant partie du jury.

Je tiens à remercier ma collègue Akiça Bahri, Maître de Recherches à l'INRGREF (Tunisie), que ma carrière a croisé un jour. Ses empreintes apparaissent depuis dans mes écrits. Elle m'a assuré son aide multi-facettes, le cadre pour achever l'étude et même de la poursuivre prochainement. Qu'elle trouve ici le témoignage de mon profond respect.

Cette thèse a le privilège d'avoir bénéficié de l'aide et du soutien matériel de plusieurs institutions tunisiennes et européennes:

- L'Institut National Agronomique de Tunis, et en particulier le Laboratoire de Science du Sol, m'a vu entamer mes études et mes recherches. Ma reconnaissance va aussi bien aux enseignants qu'aux techniciens que j'ai côtoyés au cours des années.

- La Direction des Sols, et en particulier la Sous Direction de la Recherche et de l'Expérimentation Pédologique ont constitué mon lieu d'épanouissement pour les grains de terre et les grains de sels. Je suis reconnaissant à Messieurs Ahmed Souissi, Amor Mtimet et Salah Khalfallah et à Madame Wahida Naanaa, successivement Ex-Directeur, Directeur et Ex-Sous Directeurs. Je n'oublierai jamais toutes les personnes qui ont aidé depuis les laborantins, Madame Charade en particulier, et techniciens, 'Si Trabelsi' entre autres, jusqu'aux chauffeurs et chaouchs.

- L'Institut National pour la Recherche en Génie Rural, Eaux et Forêts qui m'a accueilli récemment pour me permettre d'achever ma thèse et de développer mes travaux dans l'avenir sur les grains de terre et les grains de sels. Que Monsieur Néjib Rejeb, Directeur de l'INRGREF et mes collègues trouvent l'expression de ma gratitude et de ma sympathie.

- L'ORSTOM, et la mission ORSTOM de Tunis en la personne de ces chefs successifs, Monsieur Bernard Delmayrac et M. Jacques Claude et aussi les chercheurs Jacques Vieillefon, Feu Jean Susini, Roger Pontanier, Jean Olivier Job et Erik Braudeau qui m'ont soutenu au cours de ces années de recherches. Je tiens à leur exprimer ma sincère reconnaissance.

- Le Laboratoire de physique du sol de l'ENSA/INRA Rennes m'a ouvert ses portes un jour de novembre 1992. Mes séjours ont été rendu agréable par des conditions de travail et de logement satisfaisantes. Je remercie à la fois les chercheurs, les techniciens, les doctorants que j'ai rencontrés, que les secrétaires et le corps administratif de l'ENSAR qui se sont préoccupés de mes grains de terre et de mes grains de sels..

- La Fondation Internationale pour la Science (IFS) a soutenu financièrement une partie de mes recherches. C'est le plus qui m'a permis d'évoluer dans mes études sur les grains de terre et de sels. A tous son personnel, un très vif remerciement.

Enfin, je remercie tous mes parents, amis et collègues pour leur soutien sous ses différentes formes.

الخلاصة

يتوجّه اهتمام الباحثين في كثير من الأحيان، في ميدان الأراضي المالحة، إلى عوامل و مخاطر التملّح منه إلى نقص الخصوبة الكيميائية و الفيزيائية المنجّرة عنها مع أنّ العديد من عمليّات استصلاح الأراضي الملحية و الصوديّة قد كلّلت بالنجاح في عديد البقاع من العالم. لكن تميل المجموعة العلميّة أكثر إلى إبراز عوامل التملّح منها إلى التّركيز على عوامل إزالة الأملاح بالرغم أنّها لا تقلّ عنها منافع علميّة و اقتصاديّة.

تتعرّض هذه الدراسة بالتّحليل إلى مثالين لتهيئة أراض مالحة في الوسط الشبه الجاف التونسي يقعان بالتّحديد على الشريط الساحلي أسفل وادي مجردة و يكوّنان نموذجين لاستصلاح أراض ماحيّة و هما الهضبة الطّينية بالمبطوحة و المنطقة السّقيويّة بقلعة الأندلس حيث أنّ أراضيها الشّديدة الملوحة و الصوديّة في البداية، تطوّرت في ظروف و سرعة مختلفة أدت إلى أثّرية قابلة للزّراعة. و قد وقع الاستصلاح في الحالة الأولى تحت الظروف الطّبيعيّة لكنّ استصلاح هذه الأراضي في الحالة الثّانية، استوجب تغيير حميّيّتها المائيّة. يخصّص الجزء الأول من هذه الدراسة إلى نموذج التّطوّر الطّبيعي للهضبة الطّينية و ذلك من خلال درس و تحديد خصائصها الفيزيائيّة و الجيوكيميائيّة و التّنظيم الجديد للمادّة الأوليّة المتأثّية عبر الرّياح، و كذلك عبر فحص الخصائص الحاليّة لقاطع التربة. من أجل هذا، أشرّكنا إلى جانب الأدوات المعتادة للتّحليل، المشاهدات الميكرومورفولوجيّة. و قد خصّص الجزء الثّاني إلى إزالة الأملاح بالأراضي الملحية للمنطقة السّقيويّة بقلعة الأندلس من خلال صرفها و ريّها. و قد تمّ درس تنظيم أراضي مرصد القلعة و كذلك حركيّتها و تطوّرها على مستوى المنطقة السّقيويّة و على مستوى القطعة المرويّة.

أظهرت النّتائج أنّ نشأة أراضي الهضبة الطّينية و المنطقة السّقيويّة تندرج ضمن التّاريخ الهيدرولوجي لواد مجردة و ديناميّة دلتاه. و قد ابتدأت إزالة الأملاح بالمرتفعات إثر تكوينها منذ حوالي 2000 عام لكنّ هذا لم يحدث في جهة القلعة إلّا إثر التّحكم في مستوى المائدة الأرضيّة. و رغم اختلاف طبيعتهما الأوليّة و سبيل تطوّر هذه التّكوّنات، فإنّهما تلتقيان في تنظيمهما الميكرو و الماكرومورفولوجي الحالي إلّا جانب تشابههما في الغسيل العميق للأملاح في السّطح و إزالة محدودة للصوديوم، و أخيرا في إعادة تنظيم للمادّة على شكل منشوري. و يظلّ عنصر الاختلاف منحصرا في وجود مائدة أرضيّة سطحيّة مالحة بالقلعة. و قد مكّنت التّغيّرات الهامّة الّتي حدثت لهذه التّكوّنات من استغلالها فلاحيا و تكثيفه. لكنّ نجاح تهيئة المنطقة السّقيويّة الذي حصل على المدى القصير لا يجب أن يحجب عنّا أخطار تملّحها من جديد على المدى البعيد خاصّة إذا نظرنا إليه في إطار المنظومة الهيدرولوجيّة الكبرى لمجردة. و بالإضافة إلى النّتائج القابلة للتّثمين آنيا على عين المكان من أجل إدارة أحسن للأراضي و المياه و المزروعات و المنطقة السّقيويّة في مجملها، يمكن استخلاص عديد الدروس الخاصّة باستصلاح الأراضي الملحيّة و المناخج الّتي يجب اعتمادها في المستقبل لفهم و تجنب تملّح المناطق المرويّة. و تبدو منهجيّة المنظومة أكدر على التّعبير عن مخاطر تملّح هذه المناطق الّتي تشهد حركيّتها تغيّرات أكثر فأكثر اسطناعيّة و انغلاقا و يستحسن توسيع هذه المنهجيّة الّتي طبّقت في هذه الدراسة في متابعة الملوحة على المنظومات الهيدرولوجيّة الأخرى للبلاد التّونسيّة.

الكلمات المفتاحيّة: تونس، أراضي ملحيّة، هضبة طينية، منطقة سقيويّة، استصلاح، تملّح، ري، تنظيم التربة، حركيّة و تطوّر التربة، منهجيّة المنظومة.

RESUME

Dans le domaine des sols affectés par les sels, l'accent est plus fréquemment mis sur les processus et les risques de la salinisation des sols que sur la perte de fertilité chimique et physique qui en découle. Pourtant, nombreuses sont les actions de récupération de sols salins et sodiques qui ont été menées avec succès dans différentes régions du monde. Mais la communauté scientifique a plus tendance à mettre en évidence les processus de salinisation et de sodisation que les processus de désalinisation qui ne manquent pourtant pas d'intérêts scientifiques et économiques.

Dans cette étude, deux exemples de mise en valeur de sols salés en milieu semi-aride tunisien sont analysés. Situés dans la partie littorale de la Basse Vallée de la Mejerda, ils constituent deux modèles de récupération de sols salins. Il s'agit de la lunette d'El Mabtouha et du périmètre de Kalaât Landelous dont les sols, initialement très salins et très sodiques, ont évolué dans des conditions et à des vitesses différentes pour aboutir à des terres cultivables. Dans le premier cas, la récupération s'est produite sous conditions naturelles, alors que dans le second cas, c'est l'artificialisation du régime hydrique qui a rendu possible la mise en valeur de ces sols.

Dans une première partie, le modèle d'évolution naturelle de la lunette, est étudié à travers sa caractérisation physique et géochimique, la réorganisation de son matériau originel éolien, et l'examen des caractéristiques actuelles du profil du sol. Pour cela, nous avons associé aux outils habituels d'analyse, les observations micromorphologiques. Quant à la seconde partie, elle est consacrée à la désalinisation des sols salés du périmètre irrigué de Kalaât Landelous par drainage et irrigation. Le périmètre de Kalaât est étudié au niveau de l'organisation de ses sols, de leur fonctionnement et de leur évolution à la fois à l'échelle du périmètre et de la parcelle.

Les résultats montrent que la genèse des sols de la lunette et du périmètre s'intègrent dans l'histoire hydrologique de l'Oued Mejerda et de la dynamique de son delta. La désalinisation s'est mise en route dès l'édification des bourrelets il y a environ 2000 ans, mais n'a pu avoir lieu dans la région de Kalaât qu'après maîtrise du régime de la nappe phréatique. En dépit de natures initiales et des itinéraires différents de ces formations, leur organisation micro et macromorphologiques actuelles sont très comparables. La désalinisation poussée en surface, la désodisation très réduite et enfin, la restructuration des matériaux en polyèdres subanguleux et en prismes sont des aspects de ressemblance. L'élément qui les différencie réside dans la présence d'une nappe superficielle salée. Les modifications suffisamment importantes qu'ont subi les deux formations, ont permis leur exploitation agricole et son intensification. Cependant, la réussite constatée dans le court terme, de la mise en valeur du périmètre étudié ne doit pas occulter les risques de sa resalinisation à long terme, quand il est placé dans l'évolution du grand système hydro-pédologique de la Mejerda. En plus des résultats valorisables immédiatement sur place pour une meilleure gestion des sols, des eaux, des cultures et du périmètre dans son ensemble, de nombreux enseignements relatifs à la mise en valeur des sols salés et aux approches à concevoir dans le futur pour appréhender et prévenir la salinisation des milieux irrigués sont tirés. L'approche systémique paraît la plus apte à traduire les risques de salinisation des milieux irrigués dont le fonctionnement est de plus en plus artificialisé et endoréique. L'application de cette approche au suivi de la salinité initiée dans cette étude, mérite d'être étendue aux autres systèmes hydro-pédologiques de la Tunisie.

Mots clés: Tunisie, sols salés, bonification, lunette, périmètre irrigué, mise en valeur, salinisation, irrigation, organisation du sol, fonctionnement et évolution du sol, approche systémique.

ABSTRACT

In the field of salt-affected soils, more attention is usually paid to processes and risks of soil salinization compared to losses of chemical and physical fertility induced by soil salinization. However, there are many several successful operations of saline and sodic soils reclamation that took place in different parts of the world. But the scientific community generally focuses more on salinization and alkalization processes rather than on desalinization ones which are quite interesting from a scientific and economic point of view.

In this study, reclamation of saline soils in two semi-arid Tunisian areas are analysed. Located on the coastal part of the Lower Mejerda Valley, they constitute two models of reclamation of saline soils. The first one is the lunet of El Mabtouha and the second one is Kalaât Landelous irrigated perimeter. The soils, originally highly saline and sodic evolved in different conditions and time scale toward agricultural soils. In the first case, reclamation took place in natural conditions, when, in the second case, it is the change of water regime that made soils development possible.

In the first part of the thesis, the natural evolution of the lunet was studied through the physical and geochemical characterization of the lunet, the new organization of its original aeolian material and the actual characteristics of soil profile. For that purpose, micromorphological observations were associated to the normal analytical tools. The second and more detailed part of the study is devoted to the desalinization processes, through irrigation and drainage of the saline soils of Kalaât Landelous irrigated perimeter. The Kalaât observatory was studied at the perimeter and plot scale from the point of view of its soils organization, behavior and evolution.

Results show that soils genesis of the lunet and perimeter are an integral part of the hydrological history of Oued Mejerda and the dynamic of its delta. Desalinization started just after the hills establishment, about 2000 years ago, but in the case of Kalaât, it was with the control of shallow groundwater level. In spite of their different original material and evolutions, their actual soil micro and macromorphological organizations are quite similar. The common aspects in both locations where the important soil desalinization that took place on the top of the soil profile, the limited desalkalization, and finally the new structuration of the material in subangular polyhedrals and prisms. The major difference between the areas is the presence of a shallow and saline aquifer at Kalaât. The important evolutions to which were submitted the two units allowed their agricultural use and intensification. Nevertheless, the successful soil reclamation that happened in a rather short period of time should not hide the risks of soil salinization on the long run when the perimeter is considered within the large hydro-pedological system of the Mejerda. Besides the immediately applicable results for a better soils, water, and crops management over all the perimeter, there are several lessons related to the development of saline soils and the approaches to develop in the future in the field of salinization that can be drawn. The systemic approach seems to be the most suitable one to approach salinization risks of the irrigated areas which are becoming more and more artificial and without any outlet. It should be used for the salinity survey of others hydro-pedological systems of Tunisia.

Key words: Tunisia, saline soils, reclamation, lunet, irrigated perimeter, reclamation, salinization, irrigation, soil organization, soil behavior and evolution, systemic approach.

SOMMAIRE

	Pages
INTRODUCTION GENERALE	1
PRESENTATION DU MILIEU ET DES OBJECTIFS	3
I. Les ressources en eau et en sols en Tunisie: Enjeux et défis	3
II. Les facteurs de salinisation et les actions de désalinisation des sols salés	10
CONCLUSION	16
MATERIELS ET METHODES	18
III. Le système de la Mejerda et son delta	18
IV. Le modèle de la lunette d'El Mabtouha	24
V. La plaine de Kalaât Landelous	29
CONCLUSION	32
RESULTATS	
Première Partie: ORGANISATION, FONCTIONNEMENT ET EVOLUTION NATURELLE DES SOLS DE LA LUNETTE D'EL MABTOUHA	
CHAPITRE I: L'ORGANISATION ET LE FONCTIONNEMENT PHYSICO-CHIMIQUE DES SOLS DE LA LUNETTE	
I. APPROCHE D'ETUDE DES SOLS DE LA LUNETTE	33
II. LA MORPHOLOGIE DE LA ZONE DE LA LUNETTE	34
III. ETUDE DES CONSTITUANTS DES SOLS	46
IV. CARACTERISTIQUES PHYSICO-HYDRIQUES	52
CHAPITRE II: CARACTERISATION ET EVOLUTION GEOCHIMIQUE DES SOLS DE LA LUNETTE	
I. CARACTERISATION GEOCHIMIQUE	57
II. EVOLUTION GEOCHIMIQUE	60
DISCUSSION ET CONCLUSION	63
Deuxième Partie: ORGANISATION, FONCTIONNEMENT ET EVOLUTION DES SOLS DU PERIMETRE IRRIGUE DE KALAAAT LANDELOUS	
CHAPITRE I: L'ORGANISATION DES SOLS DU PERIMETRE IRRIGUE	
I. METHODE D'ETUDE DES SOLS	65
II. CARACTERISATION MORPHOLOGIQUE DES SOLS	68
III. CARACTERISATION DE LA SALURE DES SOLS	99
IV. MORPHOLOGIE DES SOLS STRATIFIES DANS LE PERIMETRE - CONSEQUENCES SUR LA DISTRIBUTION DES SELS	103
V. CONCLUSION	112
CHAPITRE II: LE FONCTIONNEMENT DES SOLS DU PERIMETRE IRRIGUE	
I. METHODES	113
II. LE FONCTIONNEMENT DU SYSTEME NAPPE-SOL	115
III. LE FONCTIONNEMENT DU SYSTEME SOL-PLUIE	141
IV. CONCLUSION	153
CHAPITRE III: L'EVOLUTION DES SOLS A L'ECHELLE DE LA PARCELLE	
I. METHODES	154
II. L'EVOLUTION DU SOL	158
III. L'EVOLUTION DU SOL DANS UN SYSTEME SOL-NAPPE-EAU D'IRRIGATION-ITINERAIRE AGRONOMIQUE	171
IV. INCIDENCES SUR LES CULTURES ET EFFICIENCE DE L'UTILISATION DE L'EAU	186
V. CONCLUSION	191
CONCLUSION ET DISCUSSION	192
DISCUSSIONS ET CONCLUSION GENERALE	196
BIBLIOGRAPHIE	200
ANNEXES	207

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Dans le domaine des sols affectés par les sels, l'accent est fréquemment mis sur la salinisation des sols et leur engorgement, et sur la perte de fertilité chimique et physique qui en découle (Szabolcs, 1979). Pourtant, de par le monde, nombreuses sont les actions de récupération de sols salins et sodiques et de mise en valeur de sols marginaux de bordure de sebkhas et de marais littoraux qui ont été menées avec succès (Tunisie, Inde, Pakistan, France, Arménie, Egypte, France, etc...). Mais la communauté scientifique a plus tendance à mettre en évidence les échecs (processus de salinisation et de sodisation) que les réussites (mise en valeur et processus de désalinisation et de désodisation) qui ne manquent pourtant pas d'intérêts scientifiques et économiques.

Par ailleurs, dans les analyses diagnostiques de la salinisation secondaire et de l'estimation des risques, l'approche agronomique (dynamique des sels dans la couche arable) l'a emporté sur l'approche « système » (dynamique des sels dans le système paysage-sol-nappe). Les risques liés à l'utilisation d'eaux salées en irrigation ou à la remontée d'une nappe salée ont souvent été mis en exergue, alors qu'on a négligé le rôle régulateur du fonctionnement des sols et des milieux arides et semi-arides, de certains événements climatiques, en l'occurrence les pluies importantes. En survenant d'une manière périodique, annuellement ou moins fréquemment, elles réduisent le stock résiduel des sels accumulés à la fin du cycle d'irrigation estival et ramènent la salinité à son niveau initial. Plusieurs exemples de cette dynamique (moyenne ou rapide) des sels ont été signalés en Tunisie (CRUESI, 1970; Bahri, 1982; Hachicha, 1990; Job, 1992) et probablement ailleurs dans le monde (FAO, 1985). Il en résulte que les cas où la salinisation est restée modérée sont aussi fréquents que les cas de salinisation grave. Ils sont alors cités par certains planificateurs comme contre-exemples face à l'attitude alarmiste de certains pour justifier des projets de mise en valeur des sols à faible vocation agricole et à l'utilisation en irrigation des eaux de qualité moyenne à médiocre.

Le problème de la salinisation des sols est particulièrement important en Tunisie. Le développement de l'agriculture s'y trouve confronté dans l'ensemble du pays. La mise en valeur des sols salés et l'utilisation des eaux salées ont connu un développement rapide durant la dernière décennie. Plusieurs plaines ont été assainies et les surfaces équipées pour l'irrigation se chiffrent actuellement à environ 340.000 ha. Les ressources en eau et en sol de la Vallée de la Mejerda (principale plaine située au nord de la Tunisie), sont de loin les plus importantes pour l'agriculture irriguée en Tunisie. Sur des ressources totales en eau de surface estimées à 2000 millions de m³/an pour toute la Tunisie, l'Oued Mejerda en apporte la moitié. Une partie de ces eaux, celles qui sont les plus chargées en sels, est utilisée pour irriguer des sols argilo-limoneux situés dans des zones basses ou littorales. Les risques de salinisation des sols sont alors importants dans les zones caractérisées par une faible pluviométrie et une forte évaporation, une eau d'irrigation salée, une nappe phréatique peu profonde et salée elle aussi, et une texture fine. Mais les recherches menées en Tunisie dans le domaine de l'utilisation des eaux salées ont montré qu'il est possible d'irriguer avec des

eaux moyennement salines, sans gros risque, en respectant certaines règles de gestion des eaux et des sols (CRUESI, 1970). Il n'en demeure pas moins que ces règles ne sont pas toujours observées par les agriculteurs, d'où les cas de salinisation qui sont relevés ici ou là.

Dans cette étude, deux exemples de bonification de sols salés en milieu semi-aride tunisien sont analysés. Dans le premier, les lunettes d'El Mabtouha, la récupération s'est produite sous conditions naturelles. Dans le second, le périmètre de Kalaât Landelous, la bonification des sols est due à tout un aménagement hydro-agricole. Les sols de la lunette d'El Mabtouha, comme ceux du périmètre de Kalaât Landelous, sont initialement très salins et très sodiques. Ils ont évolué dans des conditions différentes. Ils sont relativement jeunes, d'âges voisins, environ 2000 ans pour la lunette (Jauzein, 1971) et environ 500 ans pour le périmètre. Ils sont situés dans la partie littorale de la Basse Vallée de la Mejerda, séparés d'une dizaine de kilomètres seulement. De ce fait, ils constituent deux modèles de mise en valeur de sols salins et sodiques. Dans la lunette, la désalinisation a été lente et s'est produite à l'échelle du millier d'années. Dans le périmètre, elle était rapide, de l'ordre de quelques années, et liée à l'action de l'homme. Elle était coûteuse et répondait à des besoins pressants de production agricole.

Dans l'étude des sols salés et de la salinisation, on se heurte très vite aux questions d'échelles d'espace et de temps: quelles mesures, quelles observations faire ? et pour cela, quel prélèvement effectuer et à quelle période le faire?. Dans cette étude, nous avons associé aux techniques classiques de mesure, des outils pertinents plus récents comme la géostatistique pour aborder des aspects fondamentaux de la dynamique des sels dans les sols: la variabilité spatiale et temporelle (Boivin, 1992).

La démarche et les outils employés sont assez semblables pour l'étude de la lunette et du périmètre irrigué. Chaque entité est appréhendée depuis ses limites naturelles jusqu'à ses constituants minéralogiques, en abordant leurs organisation et morphologie, leurs comportement hydrique et fonctionnement, et enfin leur évolution. Les moyens d'approche sont, à côté des prélèvements d'eau et de sol, les observations macro et micromorphologiques et les analyses minéralogiques. Pour l'étude du périmètre, nous faisons appel au suivi piézométrique de la nappe phréatique et agronomique de cultures hivernales et estivales.

Dans une première partie, consacrée à l'étude de la lunette, l'évolution sous conditions naturelles de cette formation initialement très salée, est abordée au travers de sa caractérisation physique et géochimique, de la réorganisation de son matériau originel éolien et de l'étude micromorphologique du profil du sol.

La seconde partie est consacrée à la mise en valeur de sols salés sous conditions artificielles de drainage et d'irrigation. L'observatoire de Kalaât Landelous est étudié au niveau de l'organisation de ses sols, de leur fonctionnement et de leur évolution à la fois à l'échelle du périmètre et de la parcelle. En effet, la gestion de l'eau au niveau de la parcelle est à la base de toutes mesures cherchant à optimiser l'utilisation de l'eau. D'elle dépendent la salinisation des sols et la rentabilité des cultures irriguées. La connaissance des apports en eau et la détermination du stock des sels accumulés et reportés à la saison suivante permet d'évaluer la bonne marche des systèmes d'irrigation..

PRESENTATION DU MILIEU ET DES OBJECTIFS

Dans cette partie « Présentation du milieu et des objectifs », nous donnons un aperçu sur les ressources en eau et en sol de la Tunisie, sur la problématique de l'irrigation et des phénomènes de salinisation qui sont observés dans la Basse Vallée de la Mejerda, ainsi que les mesures prises dans cette région pour la mise en valeur des sols salés.

I. Les ressources en eau et en sol en Tunisie: enjeux et défis

I.1. Les sols: caractéristiques et distribution

Sur une superficie de 16,400 millions d'hectares, la Tunisie ne dispose que d'environ 5 millions d'hectares de surface agricole utile. Les sols ont des niveaux de productivité très différents en fonction de leurs propriétés et du climat, avec une pluviométrie variant de 1500 mm au nord à seulement 50 mm au sud. La Tunisie aride et semi-aride reçoit entre 150 et 450 mm/an. Le caractère méditerranéen du climat est très marqué et l'irrégularité des précipitations est la règle.

Les sols de la Tunisie sont sensibles aux différentes formes d'érosion hydrique et éolienne, auxquelles s'ajoutent la pollution chimique générée par l'utilisation des eaux saumâtres (salinisation), l'emploi des engrais et la perte de terres arables par l'urbanisation. Les sols les plus fréquents sont les sols peu évolués d'apport alluvial situés dans les plaines et vallées, les sols halomorphes dans les dépressions et les plaines littorales, les sols calcimorphes à encroûtement calcaire sur les glacis et piémonts du Centre du pays, les sols isohumiques dans la Basse Steppe, et enfin les sols à encroûtement gypseux dans le Sud.

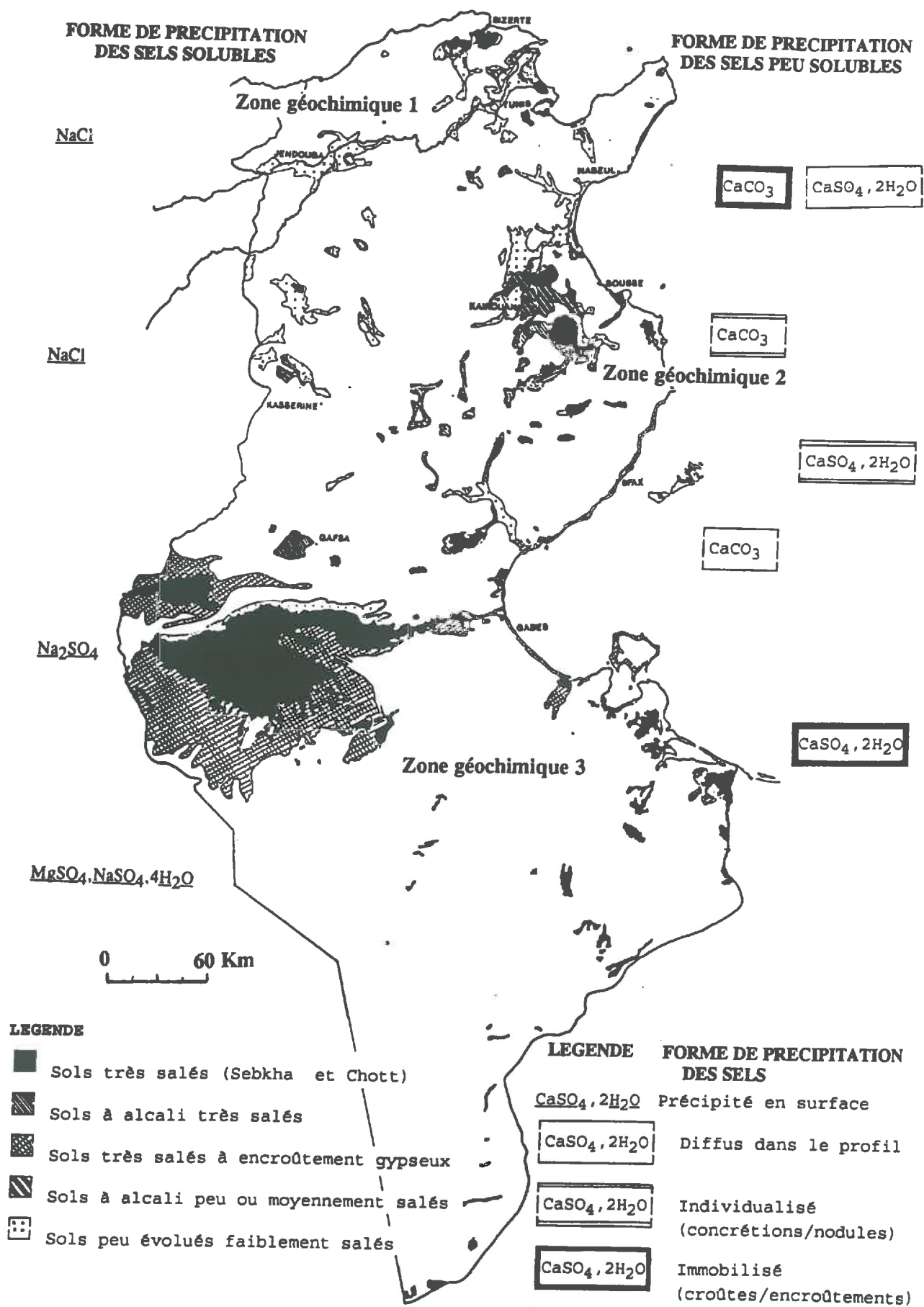
De façon schématique, on distingue les sols argilo-limoneux peu perméables dans le Nord, limono-sableux perméables dans le Centre et sablo-gypseux très filtrants dans le Sud. Sur le plan géochimique, le chlorure de sodium que l'on retrouve dans tous les sols salés de Tunisie, sert de sel de référence. On trouve aussi des composés beaucoup moins solubles comme le carbonate de calcium et le gypse. On peut distinguer trois zones géochimiques dans ce pays (Hachicha et Job, 1994a; Figure 1):

- une zone géochimique 1 correspondant aux sols à lessivage partiel de NaCl et à dynamique lente du calcaire qui débouche sur des accumulations qui peuvent prendre la forme de croûtes et d'encroûtements.

- dans la zone 2, aux dynamiques observées dans la zone 1, se rajoute la précipitation de gypse. Le calcaire s'accumule dans le profil sous forme de nodules. De grands bassins versants se terminent en sebkhas. Les sols salés y sont souvent hydromorphes.

- enfin, dans la zone 3 apparaissent en surface des sels très solubles (sulfates de magnésium et de sodium) et les encroûtements gypseux se généralisent.

La zonation géochimique s'accompagne d'une différenciation des sols salés suivant leur position géomorphologique dans le paysage. On trouve généralement la séquence suivante de sols: les sols peu évolués d'apport colluvial qui constituent l'inféro-flux, les sols salins non hydromorphes et enfin les sols salins hydromorphes de bas de pente, présents dans les bassins versants endoréïques lorsque la nappe phréatique est à moins de deux mètres de profondeur. Cette séquence de sols présente des variantes suivant la zone géochimique concernée.



I.2. Les ressources en eau: quantité et qualité

La Tunisie dispose d'environ 4,3 milliards de m³ d'eau/an dont environ 2 milliards de m³ proviennent des précipitations annuelles essentiellement dans le Nord; environ 1 milliard de m³ se trouvant dans les nappes phréatiques, essentiellement dans le Centre, les plaines et les régions côtières, et enfin environ 1,3 milliard de m³ dans les nappes profondes, essentiellement dans le Sud (DG/R.E., 1990). Au cours de la période 1960-1980, l'effort a essentiellement porté sur la mobilisation de l'eau de surface. Une vingtaine de barrages ont été construits en majorité sur l'Oued Mejerda et ses affluents, mais aussi dans le kairouanais. Grâce à une gestion intégrée, ces retenues peuvent satisfaire les besoins de la Tunisie sur une séquence de trois années successives de sécheresse avec un ratio par capita de l'ordre de 600 m³/an. Au delà, la situation devient critique. La mobilisation des eaux superficielles atteint actuellement 80% du potentiel évalué. La quantité qui reste est difficilement mobilisable. Quant aux nappes phréatiques, elles sont, dans certains cas, surexploitées. Des problèmes de salinisation et d'intrusion marine menacent actuellement les régions côtières. Les aquifères profonds du sud du pays exploités depuis les années 80, sont des ressources fossiles qu'on essaie de gérer rationnellement. La Tunisie est menacée de pénurie d'eau aux environs des années 2020. La population actuelle d'environ 9 millions serait vers l'an 2010 d'environ 13 millions. De ce fait, une politique de gestion optimale de l'eau a été mise en oeuvre depuis déjà une décennie. Elle se base sur:

- la mobilisation des eaux au niveau des petits versants par la construction de lacs collinaires dont un des objectifs est de protéger les grands barrages. Ils sont actuellement d'environ 340;
- des travaux de conservation des eaux et des sols pour atténuer les pertes en sols et en eau en amont;
- une stratégie d'économie d'eau par la diminution des pertes au niveau du réseau de distribution, l'encouragement des agriculteurs à se doter des techniques économisatrices d'eau d'irrigation, de l'équipement hydraulique adapté et une tarification de l'eau en faveur des cultures stratégiques;
- un traitement des eaux usées et leur réutilisation en irrigation ou par la recharge de certaines nappes surexploitées.

Concernant la qualité des eaux: 30% ont plus de 3 g/l. Les eaux de moins de 1,5 g/l sont réservées à l'alimentation en eau potable. En agriculture irriguée, les eaux de 2 à 3,5 g/l sont les plus employées. Les eaux de 3,5 à 4,5 g/l viennent en second lieu. Mais certains puits de plus de 7 g/l sont également utilisés (Ennabli, 1995). A l'image des sols, les eaux ont un faciès géochimique chloruré-sodique au Nord, chloruré-sulfaté-sodique au Centre et sulfaté-chloruré-sodique au Sud. Mais des dégradations de la qualité qui se traduisent par des faciès chloruré-sodiques plus marqués ont été observées surtout près des côtes (Hachicha et Job, 1994).

Les eaux proviennent essentiellement des barrages dans le Nord et exclusivement des forages dans le Sud. Les puits de surface prédominent dans le Centre. L'irrigation de surface (raie ou planche) reste le système d'irrigation le plus employé. L'aspersion et l'irrigation localisée se développent (DG/G.R., 1994). Toutefois, si la gestion de l'eau au niveau du périmètre est contrôlée par la connaissance du volume global, du débit et des

surfaces cultivées, les apports au niveau de la parcelle, c'est à dire les doses et les fréquences d'irrigation ne sont pratiquement pas connues. Il est donc impossible de faire un bilan de la gestion de l'eau et des sols par parcelle, comme cela a été soigneusement fait dans les expérimentations du CRUESI (1964-1969). La conséquence est grave, tant du point de vue de la recherche sur les mécanismes et modalités de désalinisation des sols, que de celui plus pragmatique de la gestion des zones irriguées.

I.3. Le croisement des ressources en sol et en eau: les périmètres irrigués en Tunisie

En 1960, les périmètres irrigués en Tunisie n'étaient que d'environ 60.000 ha localisés essentiellement dans les Oasis et le Sahel (DG/G.R., 1994). Actuellement, ils couvrent environ 340.000 ha (Figure 2) dont environ 90.000 ha dans la Vallée de la Mejerda. Ils sont irrigués à partir des eaux de barrage et sont parmi les plus productifs du pays. Ils produisent diverses cultures maraîchères et arboricoles ainsi que des cultures fourragères et céréalières. Dans le Sud, 25.000 ha d'oasis produisent des dattes (oasis continentales) et des cultures industrielles et divers fruits, grenadier en particulier (oasis littorales). Dans le Centre, 100.000 ha sont occupés par diverses cultures maraîchères et arboricoles pour les grandes villes. Au Cap Bon, environ 13.000 ha sont occupés par des agrumes. Le reste est réparti dans la région du Sahel essentiellement. Ils produisent des légumes verts et beaucoup de primeurs. Les périmètres irrigués aux eaux usées traitées ne couvrent actuellement que 6.500 ha et l'objectif à atteindre serait de 20-30.000 ha.

Le secteur irrigué fournit actuellement 30% de la production agricole. Pour atténuer les aléas climatiques, l'objectif est d'atteindre 50% de cette production. Les grandes parcelles ne s'observent que dans les périmètres publics. Le morcellement atteint son maximum dans les oasis traditionnelles. L'intensification est plus élevée chez les irrigants qui disposent d'une surface réduite. Cependant, elle reste tributaire de la disponibilité en eau et de son accessibilité. Le maraîchage occupe environ la moitié de la surface totale irriguée, l'arboriculture 20%, les céréales et les fourrages 25% et les cultures industrielles 10% (Hassainya, 1991).

Compte tenu de la rareté de l'eau et de sa qualité médiocre, du caractère endoréïque du réseau hydrographique de la Tunisie, de l'aridité du climat, mais aussi et dans plusieurs cas d'une gestion inadaptée de l'eau d'irrigation, les problèmes liés à la salinisation des terres et à l'engorgement des sols sont assez fréquents. Sur l'ensemble des périmètres irrigués, 50% en sont affectés dont environ 10% sévèrement. Mais tous les périmètres sont à risque moyen à élevé de salinisation. Ce risque provient pour certains de l'utilisation d'une eau saumâtre et pour d'autres de la présence d'une nappe phréatique salée à moins de 2 m de profondeur. L'engorgement affecte environ 30% des périmètres irrigués, essentiellement dans la Vallée de la Mejerda et dans les oasis (Hachicha et Gharbi, 1996a). La salinisation et l'engorgement restent des phénomènes très sérieux mais réversibles. Les pluies moins fréquentes mais importantes, rétablissent généralement le bilan des sels. Une certaine maîtrise de la salinité commence à apparaître à la fois chez l'agriculteur et le technicien.

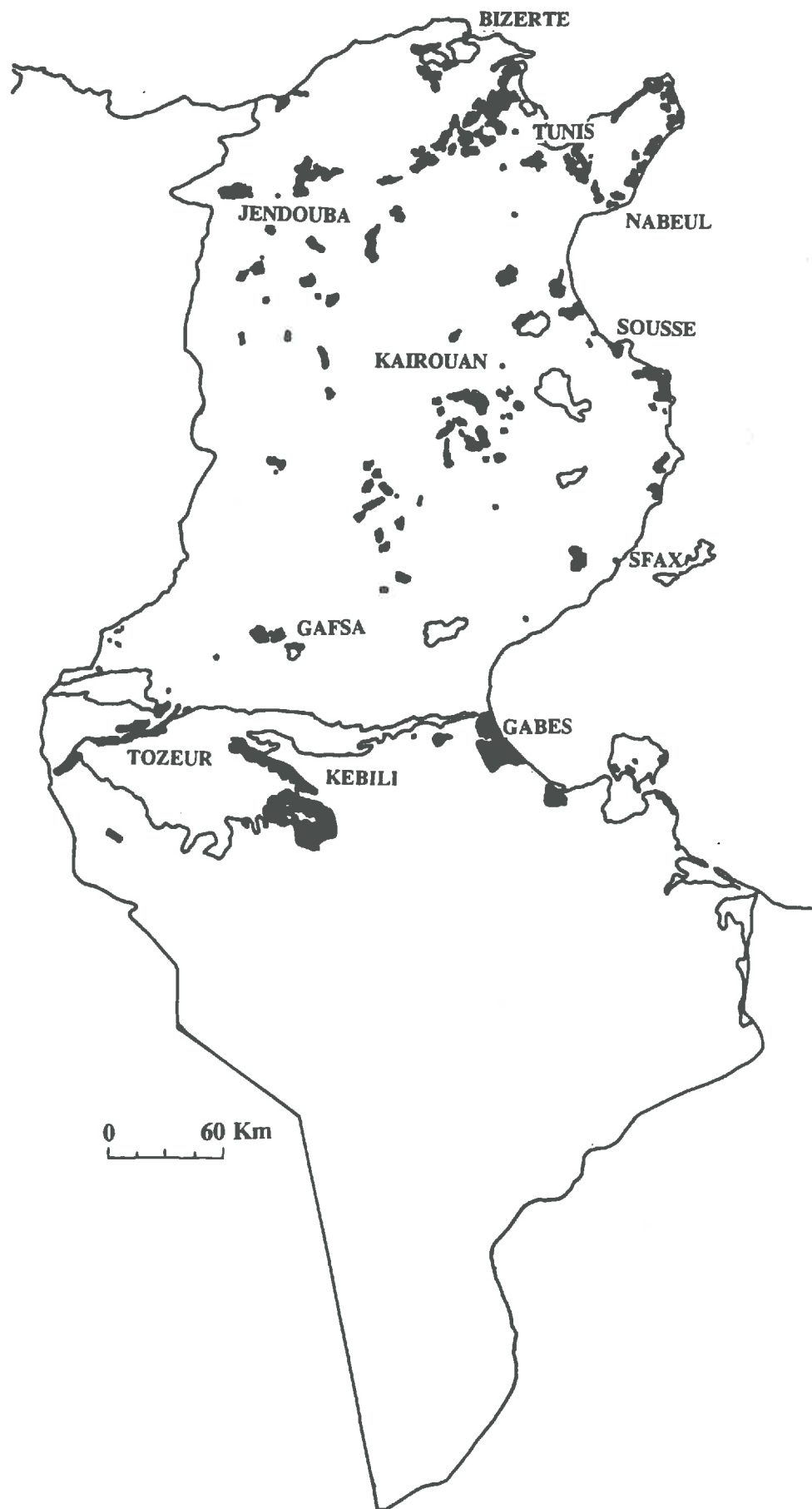


Figure 2. Les périmètres irrigués de Tunisie.

I.4. La mise en valeur des sols salés et la salinisation en Tunisie

I.4.1. La distribution des sols salés

Plusieurs formations géologiques dont celles du Mio-pliocène et du Trias, constituent des sources de sels solubles. Les eaux de ruissellement et de drainage enrichies en éléments solubles, s'écoulent vers les parties basses des bassins-versants. A partir de là deux cas de figure se présentent: le bassin versant possède un exutoire et les sels migrent alors plus bas, c'est le cas de la Vallée de la Mejerda; soit le bassin versant est endoréïque et une sebkha se forme dans la partie la plus basse. Ces phénomènes se produisent toute l'année dans la partie aride de la Tunisie et pendant la saison sèche dans la partie méditerranéenne. Ils sont soit naturels soit provoqués par l'irrigation. Le fait essentiel est que dans la situation globalement endoréïque, qui est celle de la Tunisie, la quantité totale de sels en mouvement dans le paysage, augmente constamment avec le temps. Il s'ensuit que dans les zones irriguées, à défaut de pouvoir éliminer les sels, il faut chercher à les stabiliser dans le paysage (Hachicha et al., 1994b).

I.4.2. La salinisation des sols

Dans la Vallée de la Mejerda, l'eau d'irrigation provenant des barrages présente une charge en sels de 1,5 à 3 g/l. La quantité d'eau mise à la disposition de l'agriculteur est généralement suffisante. La faible perméabilité des sols, la remontée de la nappe et le mauvais drainage externe sont à l'origine de l'engorgement des sols et de leur salinisation. Au Cap Bon, l'agriculture irriguée est très développée avec en particulier les agrumes. La surexploitation de la nappe est le principal facteur de salinisation. Au Sahel, à côté de l'irrigation à partir des puits, on a entamé depuis 1970 l'emploi des eaux du barrage de Nebhana dont la charge en sels varie entre 1 et 1,8 g/l, mais aussi l'eau de sondages profonds de qualité médiocre (4 g/l). La salinisation est alors engendrée soit par l'utilisation d'eau de qualité médiocre, soit par des doses et des fréquences d'irrigation insuffisantes. Dans les régions du Centre, complètement endoréïques, l'eau d'irrigation provient de trois grands barrages dont le résidu sec varie entre 2 et 4 g/l; cependant, la plupart des terres sont irriguées par des eaux de puits de surface (résidu sec de 1,5 à 3,5 g/l), de sondages et d'épandage des crues de l'Oued Fekka. Les sels contenus dans les eaux constituent la principale source de salinisation. Enfin dans les oasis, l'alimentation en eau se fait à partir de forages profonds qui puisent dans le Continental Intercalaire et le Complexe Terminal ou encore dans le Djefara. Ce sont souvent des eaux de 2,5 à 3,5 g/l. La salinisation résulte d'un engorgement produit par une nappe salée proche de la surface du sol dans les parties basses (Hachicha et al., 1994b).

I.4.3. La mise en valeur des sols salés

Afin de satisfaire les besoins en produits agricoles, les sols salés ont été bonifiés surtout dans les régions sub-humides et semi-arides. Sur 1,5 millions d'hectares de sols salés que compte la Tunisie, plusieurs milliers d'hectares peuvent être récupérés. Les autres sont constitués des sols très salés des chotts et des sebkhas. Dans Garaât Oued Melah près de Monastir, cette bonification est entreprise par un assainissement qui prend en considération le régime hydrologique du milieu. Les pluies contribuent au lessivage des

sels. Les sols sont d'abord labourés et cultivés en orge. Dans une étape ultérieure, des plantes fourragères tolérantes aux sels sont introduites (Hachicha et al., 1995c). Des centaines d'hectares peuvent ainsi être récupérés sur les bordures des sebkhas avec un investissement modéré (Sebkha Kelbia, SERAH, 1994). L'amélioration des propriétés physiques et chimiques des sols est manifeste. Ils servent comme parcours améliorés et constituent des réserves pour alimenter le cheptel durant les années de sécheresse.

A côté de cette bonification sous conditions pluviales, certains milieux salés de la Vallée de la Mejerda ont été drainés et irrigués. Ils constituent une superficie d'environ 30.000 ha. La désalinisation est manifeste surtout avec le concours des pluies (> 400 mm) mais des problèmes liés à leur faible pente et à la qualité médiocre des eaux d'irrigation sont apparus dans certains périmètres et sont à craindre dans d'autres.

I.4.4. Bilan des études des sols salés

La salinisation des sols en Tunisie est un problème qui a suscité l'intérêt des chercheurs depuis plus de 50 années. La première démarche d'ampleur, celle du CRUESI (1970), s'est appuyée sur l'étude détaillée de six stations expérimentales couvrant des situations bioclimatiques différentes. Le comportement de dix cultures irriguées y a été analysé en détail ainsi que la salure des sols et l'optimisation des pratiques d'irrigation. De nombreuses autres études existent menées par des organismes divers. Elles sont souvent très localisées et focalisées sur des aspects restreints. Aujourd'hui, les sols salés sont bien identifiés sur tout le territoire, leur fonctionnement sous irrigation a été abondamment suivi en stations expérimentales. L'intensification agricole cherche à mobiliser ce qui reste des ressources en eau disponible pour l'irrigation. Certes, les recherches faites en Tunisie dans ce domaine (CRUESI-CRGR, Direction des Sols, INAT, INRAT, ORSTOM etc...), ont montré qu'il est possible d'utiliser des eaux moyennement salines en irrigation sans gros risque, en respectant certaines règles de gestion des eaux et du sol. Il n'en demeure pas moins que ces règles ne sont pas toujours respectées par les agriculteurs, d'où la salinisation progressive, parfois lente et pernicieuse, mais toujours grave à long terme dans certains périmètres.

Dans la littérature tunisienne, on considère qu'un sol est salé à partir d'une conductivité électrique de 4 dS/m pour un sol de texture fine, et de 7 dS/m pour un sol de texture grossière. Pour l'agriculteur, un sol est salé dès que les rendements baissent. Ce sont les sols irrigués qui ont fait l'objet du plus grand nombre d'études. Les sols très salés de sebkhas et de chotts, ont été moins traités, mais leur étude fait appel à une méthodologie qui sert également dans le cas de sols peu salés, tant il est vrai que la salure des sols est avant tout un phénomène continu dans le temps et dans l'espace.

Un programme a été monté pour diagnostiquer l'évolution de la salure des sols irrigués de la Tunisie (Hachicha et Job, 1994a). Après enquête et mesures préliminaires, un réseau d'observatoires de la salinisation a été retenu basé sur la zonation géochimique. Dans chaque zone, des périmètres représentatifs des systèmes de culture et des types de gestion sol-eau ont été choisis. Dans chaque périmètre, une ou plusieurs parcelles ont fait l'objet d'un suivi de la salure globale par conductivimétrie électromagnétique associée à des méthodes plus conventionnelles (Hachicha et Job, 1994a; Job et al., 1996). Au delà de la

caractérisation des sols, leur fonctionnement a été étudié dans des situations où l'apport de l'eau est contrôlé. Cette démarche a été appliquée à treize périmètres dont celui d'El Guettar (Job, 1992) et celui de Kalaât Landelous objet de ce travail.

II. Les facteurs de salinisation et les actions de désalinisation des sols salés

Ce paragraphe est consacré à un aperçu bibliographique sur les facteurs de salinisation et sur les techniques de mise en valeur des sols salés du périmètre de Kalaât Landelous (Le périmètre sera présenté plus loin). Nous y évoquons l'effet de la nappe et celui de la stratification des matériaux alluvionnaires sur la dynamique de l'eau, les caractéristiques et le comportement des sols salés et des sols sodiques, les techniques de mise en valeur de ces sols, et enfin le rôle des organisations pelliculaires de surface sur l'efficacité d'infiltration et de lixiviation des eaux pluviales.

II.1. L'effet d'une nappe phréatique superficielle et salée

Les problèmes de salinisation des sols observés dans les périmètres irrigués de la Basse Vallée de la Mejerda sont généralement associés à un manque de maîtrise d'une nappe salée peu profonde. Hamdane et Memi (1976) ont essayé de définir la profondeur critique de la nappe. La salinisation de la surface du sol s'effectue par le transfert des sels per ascensum depuis la nappe (Servant, 1975). Gardner (1958) en dérivant l'expression du flux maximum d'évaporation en régime permanent en fonction des paramètres caractérisant le sol et le niveau de la nappe, établit la relation suivante:

$$q_m = (A*a)/(d^n)$$

avec q_m : le flux maximum d'évaporation; d : la profondeur de la nappe et A , a et n : des constantes spécifiques à chaque sol et qui sont en relation avec la conductivité hydraulique.

En effet, le taux d'évaporation à partir de la surface libre d'une nappe décroît quand le niveau phréatique descend. Kovda et Szabolcs. (1979) considèrent que la profondeur critique d'une nappe phréatique saumâtre se situe entre 2,5 et 3 m dans les régions arides et semi-arides. Dans la haute plaine du Rhône et sur un sol sablo-limoneux, Mermoud et Musy (1991) suggèrent d'abaisser la nappe à plus de 3 m pour limiter les remontées capillaires à moins de 1 mm/j. Le flux que le sol peut transmettre de la nappe vers la zone d'évaporation est fonction de la nature des matériaux du sol au dessus de la nappe. Ainsi, le processus de salinisation affecte une tranche de sol plus épaisse dans le cas des limons que dans celui des sables. D'après Vandenberg (1964), la remontée capillaire est maximale dans les sols limono-sableux même quand la nappe est située à 1,5 m. Selon Mermoud et Morel-Seytoux (1989), le système sol-nappe est caractérisé par un potentiel de succion de l'eau d'autant plus élevé que le matériau est plus conducteur et que la nappe est plus proche de la surface.

Compte tenu des propriétés du sol et de la relation entre la profondeur de la nappe et le flux limite que le sol peut transmettre, il apparaît qu'aussi longtemps que la nappe sera au-dessus d'un niveau critique, elle peut satisfaire intégralement la demande évaporatoire. Pour des profondeurs supérieures, le sol s'assèche en surface. Ce ne sont plus alors les

conditions climatiques qui régissent la valeur des flux ascendants, mais l'aptitude du sol à transmettre l'eau vers la surface. Cette aptitude dépend de la texture, de son homogénéité verticale et surtout de l'état structural de l'horizon de surface travaillé ou non (Mermoud et Musy, 1991). Compte tenu du fort pouvoir évaporant sous climat aride et semi-aride pendant les mois d'été, le processus d'accumulation saline superficielle ne peut rester fonctionnel que dans les situations où la nappe demeure proche de la surface du sol.

II.2. L'effet de la stratification du sol

Comme il a été signalé dans le paragraphe précédent, l'effet de la nappe dépend de la superposition des matériaux. Plusieurs chercheurs ont analysé l'effet de la stratification du profil du sol et ses conséquences sur la dynamique de l'eau. En ce qui concerne l'étude de la stratification sur l'infiltration, certains auteurs ont utilisé une technique numérique d'analyse de l'équation d'écoulement, d'autres ont recherché expérimentalement l'effet des couches fines de sol insérées dans des profils par ailleurs uniformes (Hillel, 1988). Pour permettre l'écoulement, un sol doit présenter une continuité de la nature du support et de la charge hydraulique dans toute son épaisseur, indépendamment de la séquence de stratification. Cependant, les valeurs de la teneur en eau et de la conductivité peuvent présenter des discontinuités brutales aux limites d'une couche de sol à l'autre.

Lorsqu'une couche de texture grossière de conductivité hydraulique saturée élevée repose sur une couche à texture plus fine, le régime d'infiltration est contrôlé dans une première phase par la couche à texture grossière. Quand le front d'humidification atteint et pénètre la couche à texture plus fine, le régime d'infiltration diminue et tend vers celui de cette dernière. A la longue, c'est la couche qui a la conductivité la plus faible qui contrôle le processus. Si l'infiltration continue longtemps, des charges de pression positive (nappe phréatique suspendue) peuvent se développer dans le sol à texture grossière juste au-dessus de la limite de la couche restrictive de texture plus fine. Dans le cas où une couche à texture fine repose sur une couche à texture grossière, le régime d'infiltration est contrôlé par la couche supérieure. L'avancement du front d'humidification s'arrête pendant un moment jusqu'à ce que la charge de pression à l'interface soit suffisante pour que l'eau pénètre dans le matériau grossier. Une couche de sable ou de gravier dans un sol à texture moyenne ou fine, loin de favoriser le mouvement de l'eau dans le profil, peut le freiner. La couche inférieure ne peut en aucun cas devenir saturée puisque le régime d'écoulement de la couche supérieure moins perméable ne permet pas d'assurer l'écoulement de la couche grossière sous jacente à la conductivité hydraulique saturée. Dans la remontée capillaire, Massoumi (1968) a constaté que la superposition du sable sur du limon joue un rôle modérateur alors que la superposition du limon sur du sable joue un rôle accélérateur.

II.3. Les sols salés et la salinisation secondaire des sols

Les sols salins (sols dont la conductivité électrique est supérieure à 4 dS/m; USSL, 1954) ont retenu plus l'attention des chercheurs que les sols sodiques. La définition de ces derniers est assez discutée (Sumner, 1993). Au milieu des années 60, le terme sol à alcali a été remplacé par le terme sodique. La valeur critique de ESP (exchangeable sodium percentage), soit 15, à partir de laquelle on distinguait les sols sodiques, a été corrigée selon la texture et la teneur en matière organique. L'établissement d'un ESP critique est très

arbitraire et a causé une considérable confusion. La valeur de $ESP > 15\%$ proposée par l'équipe américaine (USSL, 1954) provenait de mesures de la conductivité hydraulique où l'eau utilisée avait un TEC (total electrolyte concentration) de 3 à 10 méq/l alors que l'équipe australienne qui proposait la valeur 6, a utilisé une eau dont le TEC est plus bas, soit 0,7 méq/l.

Pour déterminer le risque de salinisation et de sodisation du sol que peut présenter l'utilisation d'une eau d'irrigation d'une qualité donnée, on était amené à utiliser le diagramme de classification des eaux établi par l'USSL (1954). Cependant, cette classification ne tient pas compte de l'évolution de la composition chimique des eaux lors de leur concentration dans le sol. Afin de tenir compte de cette évolution, on a eu recours à la notion d'alcalinité d'une solution qui correspond à tous les anions d'acides faibles susceptibles de réagir avec l'ion H^+ lors d'une titration. Ce concept a été élargi par Al Droubi (1976) à celle d'alcalinité résiduelle. Connaissant la valeur de l'alcalinité résiduelle, il permet de prévoir le sens d'évolution des solutions dès que la saturation avec le minéral considéré est atteinte et par conséquent de préjuger de l'évolution des sols irrigués avec une eau de composition connue.

Dans les sols à texture fine irrigués, l'effet des sels sur le fonctionnement physique précède chronologiquement celui des sels sur les processus biologiques (Cheverry et Robert, 1993). Cependant, quand on applique l'eau par aspersion (mode d'irrigation adoptée à Kalaât Landelous), l'effet des sels sur les cultures peut précéder l'impact de l'énergie cinétique des gouttes qui est la principale force provoquant la destruction des agrégats du sol. Ce phénomène est à l'origine de la formation d'une couche compacte réduisant l'infiltration de l'eau. Après quelques années d'irrigation, on peut provoquer une sodisation des sols irrigués. Des problèmes d'imperméabilisation du sol peuvent apparaître durant les périodes pluvieuses. La réduction du TEC engendre la dispersion des argiles ce qui cause un blocage des pores et la diminution de la conductivité hydraulique. Ceci peut engendrer un engorgement temporaire et le développement d'une anaérobiose conduisant jusqu'à la réduction des sulfates (Mhiri, 1978).

Les propriétés physiques d'un sol donné sont fonction de la saturation en Na et de la conductivité électrique. Cette fonction est modulée par la nature et la teneur en argiles, la texture du sol et sa teneur en matière organique. L'infiltration est très affectée dans les sols argileux sodiques. Dans ces sols, les structures fragmentaires facilement visibles à l'état sec voient leurs limites s'estomper lors de leur humidification (Henin et al., 1969; Monnier et Stengel, 1982).

Dans ce processus de sodisation, l'effet du sodium interfère avec certains éléments comme le Mg et le K échangeable, la richesse en calcaire ou en gypse et la teneur en matière organique (Sumner, 1993). La convention est de traiter le Ca et le Mg comme étant chimiquement des ions flocculants similaires malgré le fait que le Mg soit souvent impliqué dans la détérioration de la structure des sols. Plusieurs expériences et observations de terrain ont montré le rôle de Mg dans la réduction de la conductivité hydraulique. Quant au K échangeable, il a été reconnu qu'il avait, à la fois, des effets positifs et négatifs sur la conductivité hydraulique (Daoud et Robert, 1992). Mais en général, l'effet négatif semble dominer, mais plus faiblement que les niveaux équivalents en Na (Sumner, 1993).

Les sols riches en calcaire ou en gypse peuvent fournir des quantités appréciables d'ions de calcium ou de magnésium. Ces ions maintiennent un état structural floculé et des niveaux élevés de conductivité électrique ce qui limite les risques de dispersion des argiles. Néanmoins, ces minéraux altérables sont lents à fournir d'électrolytes pour empêcher la formation de croûtes imperméables.

Pour Sumner (1993), on doit distinguer les sols qui se dispersent spontanément et ceux qui nécessitent une énergie mécanique pour l'être. Il propose le **potentiel dispersif** (P_{dis}), paramètre qui combine les effets du SAR et de la conductivité électrique pour un pH donné. Ce paramètre permet d'estimer la tendance des sols à se disperser naturellement:

$$P_{dis} = P_{tec} - P_{sol}$$

avec P_{tec} : pression osmotique nécessaire pour floculer les particules et P_{sol} : pression osmotique de la phase liquide du sol. Plus la valeur du potentiel dispersif est élevée, plus le système est apte à la dispersion.

Comme le comportement physique des sols sodiques dépend du Na échangeable qui dépend du TEC, aucun niveau de ESP ne peut être retenu pour tous les cas de figure. Il faut concevoir un critère basé sur la dispersion des argiles et qui sera utilisé dans la caractérisation et le diagnostic des comportements des sols en vue de leur gestion.

II.4. La désalinisation des sols salés et sodiques

En présence d'une nappe superficielle, la mise en valeur des sols salsodiques nécessite l'installation d'un réseau de drainage. Celui-ci sert à rabattre le niveau de la nappe à une profondeur compatible avec la profondeur utile nécessitée par les cultures envisagées et la limitation des effets de cette nappe salée sur la remontée capillaire des sels.

En Tunisie, l'irrigation avec des eaux chargées (3,5 g/l) n'a pas fait apparaître de réels dangers de salinisation dans les conditions d'un bon drainage (CRUESI, 1970). Dans certains cas d'aménagements hydro-agricoles, le drainage des terres salées est accompagné de l'irrigation par des eaux moyennement salées comme c'est le cas de la Basse Vallée de la Mejerda. L'effet de l'irrigation aux eaux salées dépend de la dose, de la fréquence et de la technique d'irrigation. Les expérimentations menées en Tunisie ont fait apparaître l'influence de la dose d'irrigation sur la salinité du sol (CRUESI, 1970). En absence d'une fraction de lessivage, l'utilisation de l'eau de la Mejerda peut entraîner à la longue la salinisation du sol. Quant à la fréquence d'irrigation, plusieurs chercheurs conseillent d'écourter les intervalles d'irrigation lorsque l'eau employée est salée. Pour les techniques d'application de l'eau, l'irrigation par billon favorise l'accumulation des sels en surface sur certaines parties des sillons (Durand, 1983; FAO, 1985). L'irrigation par submersion requiert plus d'eau que l'irrigation par aspersion pour réduire la salinité du sol au même niveau. Selon Ahmed (1984) dans le cas de la submersion et pour un sol argileux, une plus grande partie de l'eau s'infiltre dans les crevasses alors qu'en aspersion, l'eau s'écoule à travers les mottes et les micropores ce qui améliore l'efficacité du lessivage. L'aspersion aux eaux saumâtres provoque des brûlures du feuillage et la défoliation par l'absorption foliaire des sels, surtout le sodium et le chlore. L'irrigation par "goutte à goutte" permet d'éviter ceci par la création d'une zone de lessivage au-dessous des

goutteurs où les racines tendent à se concentrer (Shainberg et al., 1981). Néanmoins, cette technique engendre l'accumulation des sels à l'interface du bulbe saturé et du sol sec environnant.

Pour maintenir la salinité du sol à un seuil tolérable par les cultures, le lessivage des sels s'impose. Il n'est pas encore établi s'il vaut mieux pratiquer un lessivage permanent avec chaque arrosage ou seulement lorsque l'accumulation des sels dans le sol devient excessive. Plusieurs auteurs (Bernstein et al., 1975; François, 1981) soutiennent que le lessivage intermittent aboutit au même degré de salinisation, mais avec une consommation inférieure en eau. D'après CRUESI (1970) et Bahri (1982), les niveaux de salinité atteints sur les périmètres de Kairouan ne justifient pas un lessivage permanent mais saisonnier, à la fin de la saison estivale. Dieleman (1970) a montré que le lessivage périodique de sols salés en Irak a nécessité 11.250 m³/ha d'eau contre environ 20.000 m³/ha pour le lessivage permanent. Dans le nord tunisien, si la salure atteint des taux parfois élevés en fin de période d'irrigation, au cours de l'hiver suivant, le lessivage par les pluies ramène souvent ce taux à un seuil tolérable par la culture suivante (Cointepas, 1965).

Dans les sols sodiques, l'amendement calcique peut être pratiqué pour réduire la dispersion des argiles. Il consiste à diminuer le taux de Na échangeable et à augmenter la concentration électrolytique de la solution du sol. Ceci est réalisé par l'addition d'ions bénéfiques, comme le Ca, pour remplacer Na. L'amendement gypseux est souvent préconisé. A cet effet, les sels solubles de calcium sont utilisés. Selon Ollat et al. (1969), le lessivage réussi à Utique n'était pas possible sans la présence de gypse dans les sols. En ajoutant 10 t/ha de gypse à des sols salsodiques, McIntyre et al. (1982) ont amélioré leur infiltrabilité de 0,8 à 4,2 mm/j. L'augmentation de Na/T n'est pas un processus irréversible pour les sols de la Basse Vallée de la Mejerda. Les sols sont suffisamment pourvus en gypse pour maintenir une concentration suffisante en électrolytes et éviter le processus de sodisation (Gallali, 1980). Cependant, Bahri (1993) a montré qu'à long terme, les sols de Cherfech irrigués depuis 30 ans manifestent une désaturation par rapport au gypse. L'apport de gypse reste très controversé dans les sols salsodiques carbonatés. La saturation de la solution du sol en ions Ca²⁺ ne justifie pas cet apport. Cependant, Rhoades (1968) constate que la solubilité du carbonate de calcium dans les sols salsodiques est très faible (<5 méq/l).

Manukyan (1976) suggère l'apport d'acide sulfurique qui réagit sur la calcite pour former le sulfate de calcium plus soluble que le carbonate de calcium. Loveday (1984) recommande l'emploi du soufre qui, par oxydation microbienne, peut aboutir, dans certaines conditions, à la formation de l'acide sulfurique. Somani (1981) a constaté que l'apport de soufre sur des sols calco-sodiques donne de résultats meilleurs qu'avec le gypse; mais cela reste conditionné par l'activité microbienne du sol.

Depuis le XII^{ème} siècle, le célèbre agronome arabo-andalous Ibn Al Awam (traduit de l'arabe par Clément Mullet, 1977) suggère d'épandre de la paille broyée et de répandre une quantité de bouse de vache pour lutter contre la salure des sols. Huit siècles plus tard, Fireman et Wadleigh (1952) montrent que les sols riches en fumier possèdent de bonnes propriétés physiques en dépit d'une quantité appréciable de sodium échangeable. Les sols

riches en matière organique labile sont mieux structurés et moins aptes à la dispersion. Mais la baisse de la fraction labile peut les rendre plus sensibles à la dégradation.

Cointepas (1965) préconise avant l'utilisation des eaux à risque d'alcalinité, un épandage massif de matière organique. D'après Bower et al. (1951), l'apport de 12,5 t/ha de fumier sur des sols alcalins augmente leur degré d'agrégation et triple leur perméabilité. La stabilité structurale du sol croît suite à des apports organiques (Mhiri, 1981). D'après Mallouhi (1982), la diminution du pH dans certains sols salsodiques est due aux acides organiques. Elle est également attribuée à la diminution du ESP provoquée par l'apport de matière organique. En leur fournissant l'énergie nécessaire, la matière organique active la microfaune et la microflore qui accélèrent l'agrégation des particules du sol (Bower et al., 1951).

Dans la mise en valeur des sols salés, les techniques culturales sont un élément de réussite de l'opération. Il s'agit essentiellement du labour qui engendre une augmentation de l'infiltration de l'eau. Cette infiltration a été septuplée sous l'effet du labour de sols argilo-limoneux salsodiques dans la Haute Vallée de la Mejerda (AGRAR, 1978). Dans la station de Cherfech, les niveaux de salure atteints sur les parcelles recevant un labour profond sont inférieurs à ceux obtenus avec un travail superficiel (Bahri, 1982). L'effet fréquence d'arrosage est plus marquant lorsque le sol est labouré (CRUESI, 1970). A Utique, le lessivage des sels n'a eu lieu que lorsque le sol avait été labouré. Le travail du sol améliore ses propriétés physiques et active sa microflore. A l'opposé du labour, les sols laissés en jachère favorisent la salinisation par l'augmentation de la remontée capillaire (Dieleman, 1970).

L'efficacité du lessivage des sels par les pluies est fonction de l'état de surface du sol. Le rôle de la pluie dans la désalinisation des sols peut être mis en évidence par l'étude des profils salins après les événements pluvieux (CRUESI, 1970; Durand, 1983; Hachicha, 1990). Plusieurs facteurs interviennent pour améliorer l'efficacité du lessivage (Job, 1992) dont l'état de la surface des sols et l'intensité des pluies. La caractérisation morphologique et analytique des profils pédologiques peut permettre de mettre en avant quelques indices explicatifs du comportement du sol vis-à-vis de l'eau. Mais cette approche n'est pas du tout suffisante dans les milieux pour lesquels les organisations superficielles jouent un rôle déterminant dans le régime hydrique des sols. En Tunisie, la battance des sols est un aspect fréquemment observé dans les sols limoneux irrigués. Floret et al. (1976) et Roose et Sarraailh (1990) constatent que les sols vertiques mal drainés sont sujets à la battance. Elle est déterminante sur l'efficacité tant de l'infiltration, du ruissellement et de l'évaporation que celle du lessivage des sels. Valentin (1985) définit des niveaux d'organisation des pellicules superficielles (O.P.S) à la fois par leur structure lamellaire et leur cohésion. Ces O.P.S correspondent à des différenciations morphologiques. Elles présentent également des comportements mécaniques vis-à-vis de la dynamique de l'eau différents de ceux des matériaux sous-jacents. Les O.P.S possèdent de faibles conductivités hydrauliques qui peuvent être plusieurs fois inférieures à celles du sol sous-jacent (Riou, 1966). Elles agissent comme une barrière hydraulique (Hillel, 1988).

Ainsi, la mise en valeur d'une plaine formée de sols salés et sodiques passe par la maîtrise de la nappe salée superficielle. Cette maîtrise devient plus complexe en présence de

sols stratifiés. Deux processus de dégradation peuvent émerger, la salinisation et la sodisation. Ces phénomènes font intervenir la qualité de l'eau d'irrigation, l'eau pluviale, la concentration électrolytique de la solution du sol, la matière organique, les matériaux altérables et certains cations. Le potentiel dispersif semble être un bon indicateur de la sodicité du sol. Dans la bonification des sols salés et sodiques, plusieurs procédures supplémentaires sont souvent nécessaires. D'abord le drainage des terres qu'on associe souvent à l'irrigation. Celle-ci doit permettre le lessivage des sels en jouant sur la dose et la fréquence des irrigations ou par lessivage saisonnier. Ces deux opérations sont rendues plus efficaces par des amendements chimiques ou organiques et par un travail approprié du sol et un état de surface plus favorable à l'infiltration des eaux pluviales.

CONCLUSION

En Tunisie, les ressources en eau et en sols sont limitées et souvent de qualité moyenne. Le développement de l'agriculture irriguée et la mise en valeur des sols salés sont des solutions pour pallier la contrainte naturelle.

Jusqu'à présent, la plupart des études sur les sols salés ont été faites surtout pour satisfaire les besoins d'inventaire et de planification de l'affectation des ressources. Les expérimentations à la parcelle ne permettent pas actuellement d'extrapoler les résultats obtenus au périmètre entier, ni à fortiori d'un périmètre à un autre. On ne peut donc pas prévoir l'évolution des systèmes irrigués en termes quantitatifs. C'est pourtant en ces termes que se pose le problème de la gestion combinée de la qualité des sols et des eaux sur tout le territoire, sous irrigation comme sous cultures pluviales. Cela pose le problème de la gestion de l'eau; chaque périmètre irrigué ayant une gestion de l'eau et de sols spécifique. Concernant les disciplines, les sols salés ont intéressé à la fois la pédologie et l'hydrologie, l'agronomie et la physiologie mais aussi la géochimie et la phytosociologie. L'intérêt pour les sols salés n'a guère faibli. On peut faire quelques remarques sur la nature des études:

- *sur la dynamique de sels dans les sols*: le phénomène de capillarité a été négligé alors que c'est un processus majeur de transformation des paysages en Tunisie. De même, les mécanismes de migration et d'accumulation des sels restent mal connus.

- *sur la mise en valeur des sols salés et les modalités de l'aménagement*: les besoins en eau des cultures n'ont pas fait l'objet d'assez d'études. Il en est de même pour le drainage des terres et l'évapotranspiration des cultures. Cette faiblesse interdit de faire des bilans hydriques et salins qui permettraient de modéliser le fonctionnement des sols salés au niveau des périmètres irrigués et des bassins-versant. C'est pourtant à cette échelle que le paysage est concerné par la dynamique des sels. C'est aussi à l'échelle des périmètres que l'on doit prévoir l'aménagement et la récupération des sols. Cela suppose que l'on connaisse la quantité de sels qui est apportée, celle qui reste dans les sols et celle qui est évacuée par la nappe (termes du bilan salin). Or les études sur la méthodologie permettant d'y aboutir ne sont pas très développées. Il en découle que le nombre de références concernant l'utilisation des sols salés est faible eu égard aux nombreuses extensions sur des sols salés mis en culture. En règle générale, on remarque qu'il y a un certain classicisme dans l'approche du phénomène de la salure des sols. Il n'est pas fait suffisamment appel aux

techniques d'appréhension de la salure au niveau global d'un petit bassin versant (télédétection, transfert d'échelle, bilans..).

Ainsi, on peut très clairement distinguer trois niveaux de manifestation de la salure dans le paysage tunisien:

- Le niveau le plus perceptible est celui des petits périmètres. Le problème se pose sur de toutes petites surfaces et dans un laps de temps court. C'est un problème de gestion à la parcelle (CRUESI, 1970; Hachicha et Ben Hassine, 1992a; Job, 1992). 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 qui sont menées concernent les besoins en eau des cultures et leur résistance à la salure en fonction de la qualité des sols et des pratiques culturales.

- Le deuxième niveau est celui des grands périmètres irrigués. A peu d'exceptions près, tous ont au moins un secteur dont les sols se salent (Job, 1992; Mtimet et Hachicha, 1995). Ce n'est pas toujours la partie la plus aval, quelquefois l'absence de nivellement en est la cause (Hachicha et al., 1992b). La salure peut également provenir d'une mauvaise gestion de l'eau. Le problème peut être étudié à moyen terme. De simples bilans hydriques peuvent permettre de situer le niveau des économies d'eau à faire. Les recherches à mener sont celles relatives à la distribution des sels dans l'espace.

- Le troisième niveau est celui des régions qui constituent des ensembles hydro-pédologiques cohérents (Mhiri et al., 1996; Hachicha et al., 1996b). 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 et sur les quantités de sels qui migrent et se déposent dans les parties basses. Il s'agit de recherches à caractère novateur rarement entreprises à l'échelle de régions entières.

Ainsi, l'étude de la mise en valeur des sols salés par leur désalinisation, dans les conditions actuelles des ressources eau et sol et la recherche de nouvelles techniques et méthodes d'appréhension des processus qui conditionnent le succès de cette entreprise sont pleinement justifiées et nécessaires.

MATERIELS ET METHODES

Dans ce chapitre « Matériels et Méthodes », on présentera le cadre général, les deux grands sites étudiés et un premier aperçu des méthodes utilisées. Le détail de ces méthodes sera présenté au moment de la présentation des résultats eux-mêmes.

III. Le système de la Mejerda et son Delta

III.1. Le système de la Mejerda

Le bassin versant de la Mejerda couvre une superficie de 23 700 km² (Rodier et al., 1981). Entre une altitude de 1712 m (en Algérie) et le niveau de la mer, l'Oued Mejerda parcourt 465 km (Figure 3). Avec un apport de 1 milliard de m³, la Mejerda est de loin le plus important cours d'eau en Tunisie. La hauteur des précipitations moyennes annuelles sur le bassin est de 480 mm. Ce bassin versant est constitué de six unités hydrologiques dont le sous-bassin versant le plus aval est celui de la Basse Vallée de la Mejerda. La carte hydrographique révèle une extrême ramification des oueds qui, dans les régions ouest et sud-est, attaquent des terrains composés de marnes et de calcaires relativement tendres. C'est la source principale des transports solides qui ont comblé en partie la plaine maritime de la Mejerda.

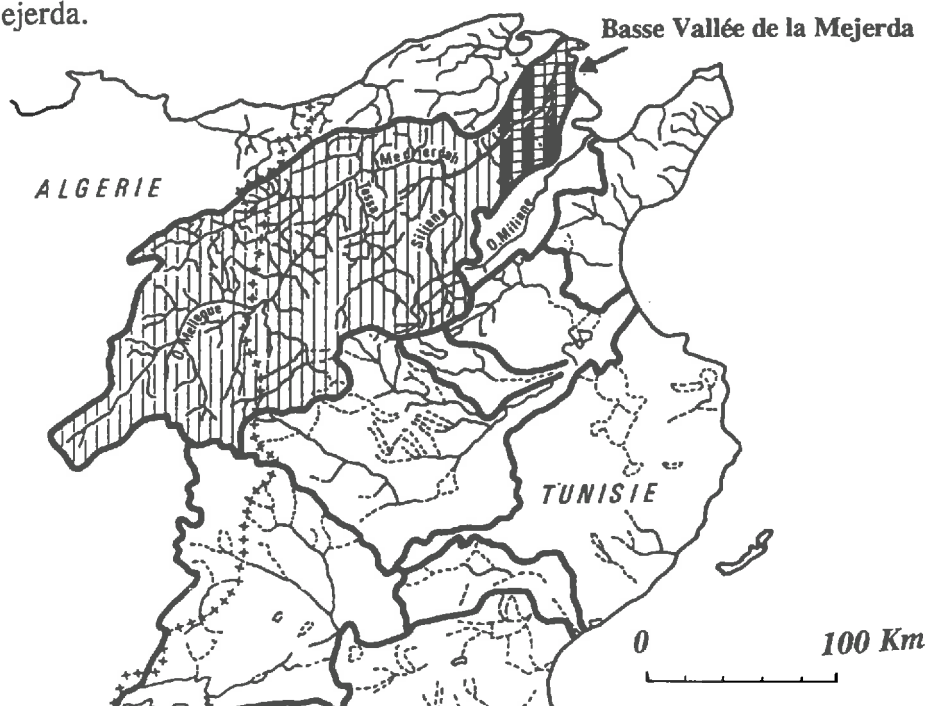


Figure 3. Le bassin versant de l'Oued Mejerda.

Les sels proviennent de quatre grands groupes de roches: les complexes salifères du Trias, les roches sédimentaires d'origine marine, les formations détritiques marines et laguno-continentales de l'Oligocène et du Néogène. Le bassin versant de la Mejerda est caractérisé par un faible recouvrement forestier, tandis que les zones nues, salées ou "cultivées" représentent 70% de l'ensemble. Ce pourcentage important de terres mal protégées a facilité le ruissellement et l'érosion sur les versants, tandis que dans les vallées, un mauvais écoulement a favorisé le développement des méandres et entraîné la formation de zones mal drainées et salées. La complexité des situations, où les différents types de sols sont juxtaposés, conduit à définir des unités pédologiques complexes. Sous les conditions

climatiques peu agressives du bassin versant de la Mejerda, les phénomènes de désagrégation des roches l'emportent sur les phénomènes d'altération; les phénomènes de migration à l'intérieur des sols sont limités. La lithologie du bassin versant est caractérisée par l'absence de roches cristallines et la présence de roches uniquement sédimentaires dont dépend étroitement la répartition des sols. Elle comprend des roches dures calcaires ou gréseuses à ciment calcaire et des roches tendres nettement plus abondantes: argiles calcaires et surtout marnes et marno-calcaires. La végétation a été tellement influencée par la pression de l'homme depuis l'époque romaine que ce dernier apparaît maintenant le facteur d'évolution régressive le plus marquant actuellement. Les formes de relief très imbriquées sur l'ensemble du bassin influencent la circulation des eaux, sur et dans les sols. On distingue des sols d'érosion et des sols d'accumulation qui comprennent les sols peu évolués d'apport sur alluvions, localement salés, hydromorphes ou vertiques, très répandus.

Pendant ses crues, la Mejerda charrie d'importantes quantités d'alluvions dont une partie, qui n'atteint pas la mer, contribue à l'alimentation des vasières en amont du cordon littoral, alors que l'autre partie est rejetée directement en mer. Les éléments fins de cet apport sont entraînés à de grandes distances dans la baie. Les éléments grossiers, en faible pourcentage, sont repris par l'action de la houle pour modeler les formes de la côte. La construction de barrages sur la Mejerda a modifié considérablement l'évolution de la vallée en supprimant la plupart des crues importantes et leurs apports solides.

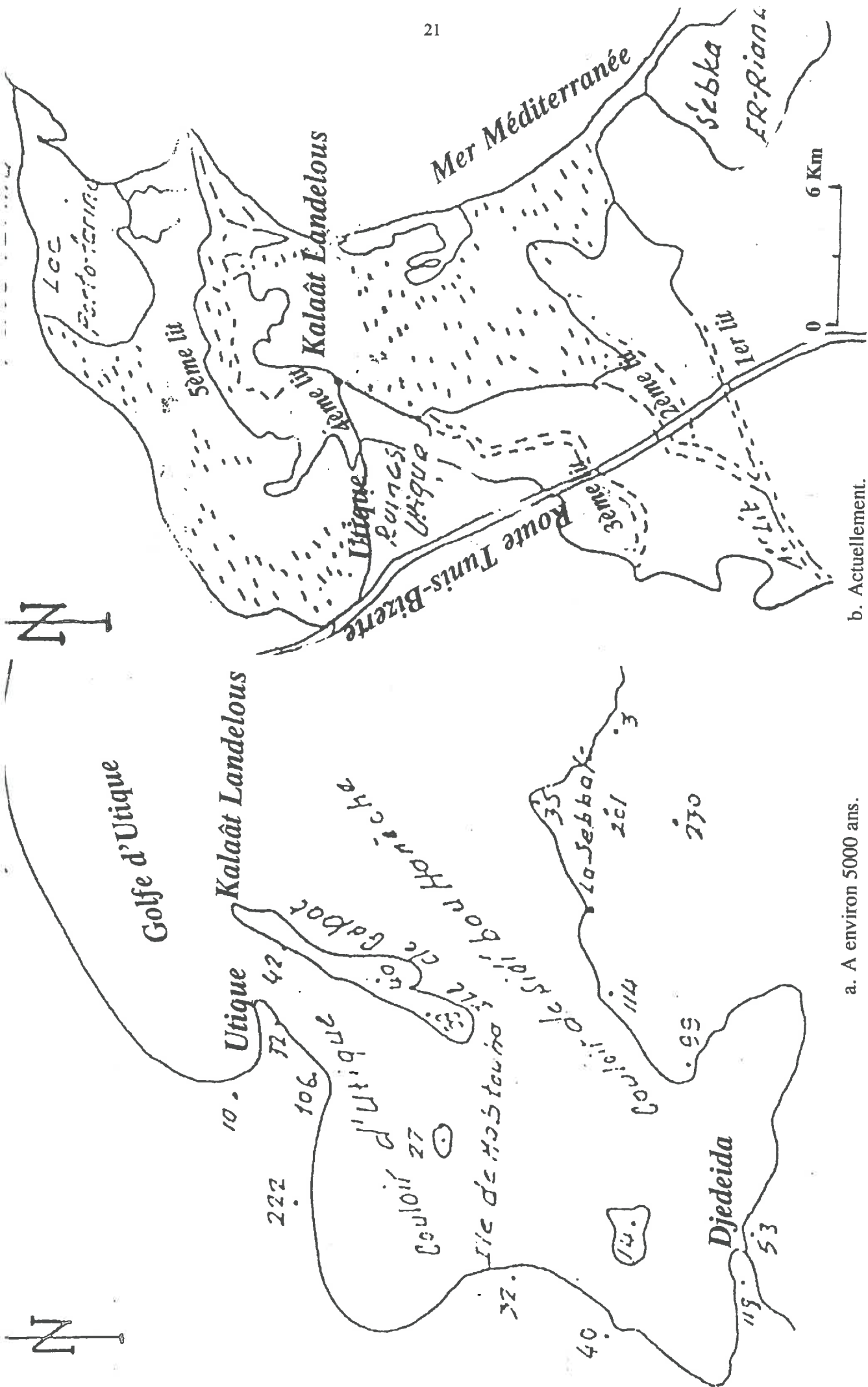
La Mejerda possède un régime hydrologique d'oued. Son débit d'étiage est de l'ordre de $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ alors que son débit de crue atteint $3500 \text{ m}^3/\text{s}$. Ses eaux peuvent contenir 10 à 20% de matières solides. Une crue moyenne de la Mejerda qui représente un apport de 200 millions de m^3 d'eau fournit un apport de 16 à 20 millions de m^3 d'alluvions. Claude et al. (1976) ont analysé les alluvions déposées par l'Oued Mejerda lors des crues exceptionnelles de mars 1973 au cours de laquelle la superficie inondée était d'environ 470 km^2 . L'épaisseur des dépôts alluviaux ne présentait aucune relation avec la hauteur de la lame d'eau écoulée mais était liée à la micro-topographie de la plaine et aux aménagements agricoles. La gamme d'épaisseur la plus fréquemment relevée était de l'ordre de 10 à 15 cm. Le volume déposé est estimé à environ 46.10^6 m^3 . Le poids des alluvions déposées est d'environ 75.10^6 tonnes, soit 1700 T/ha environ. Ce qui représente une couche nivelée de l'ordre de 10 cm sur les 470 km^2 inondés. Le poids de sels déposés est en moyenne 3176 kg/ha dont 1548 de CaSO_4 et 525 de NaCl . La période de récurrence d'une telle crue est estimée entre 200 et 300 ans.

L'analyse qualitative des alluvions montre une texture calcaro-limono-argileuse. La fraction sableuse est surtout constituée de sables fins, les sables grossiers représentent moins de 3% en moyenne. La densité apparente est d'environ 1,74 soit une porosité de 34,8%. Le taux de calcaire total est élevé (38,4% en moyenne). Le calcaire actif, 13,5% en moyenne, représente 35% du calcaire total. La teneur moyenne en gypse est de 0,4%. Le pH de la suspension eau 1/2,5 est de 8,3. La conductivité électrique est de $2,66 \text{ dS/m}$ avec un coefficient de variation de 84,8%. La teneur en matière organique est de l'ordre de 1,14%. Les alluvions présentent une grande similitude dans leur composition minéralogique. La montmorillonite est toujours dominante, représentant 50% environ des argiles et toujours bien cristallisée, caractéristique retrouvée généralement dans ce type de dépôts alluviaux. La kaolinite vient proportionnellement en second lieu. L'illite représente 5

à 10% et la chlorite 5 à 10%. Cette composition reflète bien la nature des matériaux des bassins versants de la Mejerda. Le complexe absorbant est saturé avec nette dominance du calcaire et du magnésium sur les ions alcalins. Le taux de sodium fixé sur le complexe est faible, 3% en moyenne, et dépassant rarement 6%. L'analyse différentielle des sédiments montre que les séquences latérales dans la plaine présentent une dominance d'éléments grossiers près du lit de l'Oued qui s'atténue en s'y éloignant. Longitudinalement, le gradient est moins net, les variations latérales et verticales masquant le gradient longitudinal. Verticalement, la tendance est vers une concentration des éléments fins dans les couches superficielles (0-3 cm) et une concentration des éléments les plus grossiers ($> 20 \mu\text{m}$) dans les couches profondes (10-50 cm). Une certaine proportion des éléments grossiers déposés est constituée par des particules calcaires (débris coquilliers ou nodules). De l'amont vers l'aval et de la profondeur vers la surface, la granulométrie du calcaire s'affine. Verticalement, les couches de surface sont plus salées et plus sodiques que les couches de profondeur.

III.2. Le Delta de la Mejerda

La Basse Vallée est limitée au sud par Jebel Maïana, Jebel Ammar et Jebel Nahli, et au nord par la chaîne de Kechabta. Le littoral était jusqu'à une époque relativement récente, caractérisé par une pénétration de la mer jusqu'à Jedeïda (Jauzein, 1967). Par ses changements de lit et d'embouchure et l'épandage des eaux de crues, la Mejerda a comblé au bout d'une trentaine de siècles, la partie du Golfe d'Utique et a gagné sur la mer une superficie d'environ 300 km^2 constituant actuellement la Basse Vallée de la Mejerda (Planche 1). Le Golfe s'étendait il y a 4 ou 5000 ans de Tebourba à la côte actuelle. La Mejerda à la côte +27 m à Tebourba doit parcourir 30 km dans une plaine alluviale, extrêmement plate, gagnée sur la mer (Jauzein, 1971). Au niveau de la Méditerranée et au droit de l'embouchure principale, la Mejerda avance en pleine mer et forme une avancée alluvionnaire témoignant d'un apport de matériau important. La pente faible de son lit et son élargissement dans la Basse Vallée et sa capacité de transit limitée à $800 \text{ m}^3/\text{s}$ en constituent des facteurs favorables au débordement de ses eaux. Le débit solide avait atteint en 1973 700 millions de m^3 (Claude et al., 1976), ce qui provoquait une avancée moyenne de l'embouchure de 3 km et un remblayage au-dessus de la mer de 15 à 20 km^2 par siècle (Jauzein, 1971). Les sables formant les cordons littoraux proviennent essentiellement des sols et des sédiments du continent. L'apport sédimentaire de la Mejerda a été estimé à 10 à 17 millions de tonnes/an. Les sédiments fins, limons et vases constituent la plus importante proportion des sédiments apportés, par contre les éléments sableux ne constituent que 10% du volume total. Ces sables participent à l'édification du Delta. L'embouchure de la Mejerda a migré du sud au nord pour emprunter successivement cinq lits. Une dernière tentative pour en tracer un sixième lit a été constatée lors des crues de 1932. Au VII^{ème} Siècle après J.C., le port d'Utique s'était colmaté progressivement. Au X^{ème} siècle, la Mejerda continuait à migrer vers le Nord et traversait la lunette de Protville pour atteindre la limite sud de la lagune de Ghar El Melh (Figure 4 a et b). Du point de vue substratum, le Delta de la Mejerda est constitué de sédiments apportés par un réseau fluvial. Ce Delta est le lieu d'un système dynamique cyclique d'avancée et de retrait. Il s'agit d'un système constitué par le bassin versant, la zone de dépôt et les régimes hydrologiques et hydrodynamiques qui régissent les interactions entre eaux et sédiments en fonction du temps.



a. A environ 5000 ans.

b. Actuellement.

Figure 4. Le Golfe d'Utique (Jauzein, 1971).

Le bassin d'Utique est marqué par l'intervention de l'homme. Utique, ancien port punique puis romain se trouve actuellement à 12 km de la mer sous 5 m d'alluvions. Les aménagements qui ont touché la Basse Vallée ont eu pour objectif de lutter contre les inondations et d'irriguer. Les principaux aménagements entrepris sont la réalisation de barrages pour l'amortissement des crues (Mellègue en 1954 et Sidi Salem en 1982), l'alimentation des villes en eau potable et l'irrigation, l'assèchement des plaines et de dépressions, la création des émissaires et la suppression de méandres, la modification des vieux ouvrages, l'assainissement et le drainage de milliers d'hectares et enfin la défense et la restauration des sols aussi bien de la plaine que de l'impluvium. Ces travaux ont permis de limiter les effets des crues. Ainsi, Claude et al. (1976) observent que la crue de 1973 a eu un bien moindre débordement que celle de 1931 malgré un débit plus élevé ($3180 \text{ m}^3/\text{s}$ pour 1973 contre $2060 \text{ m}^3/\text{s}$ pour 1931; Figures 5 et 6).

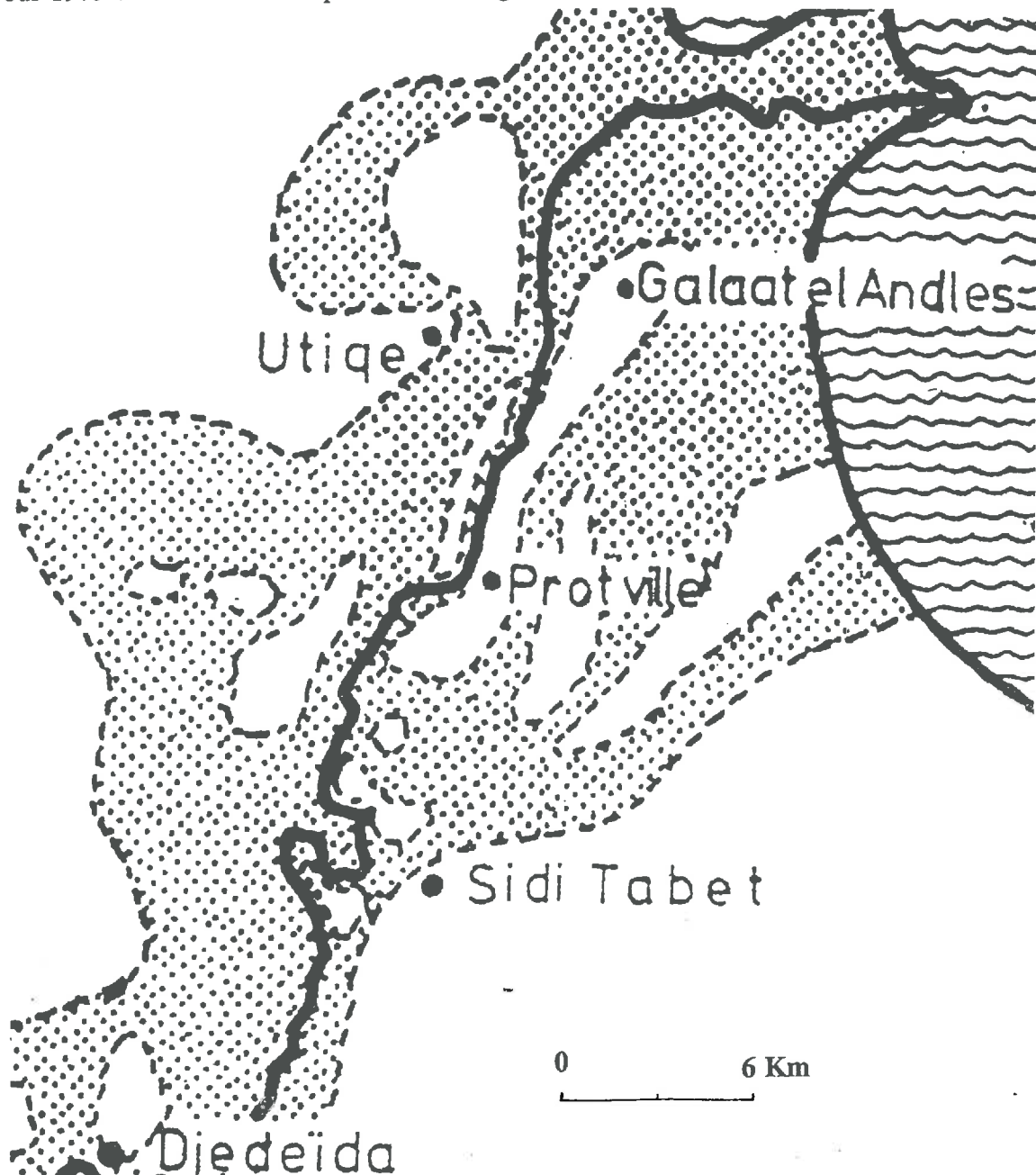


Figure 5. Extension de la crue de 1931 dans la Basse Mejerda (Claude et al., 1976).

Planche 1. Localisation du périmètre de Kalaât Landelous et de la lunette de la Koudiat El Mabtouha (Photo Landsat 2, U.S. Geological Survey, 1983).

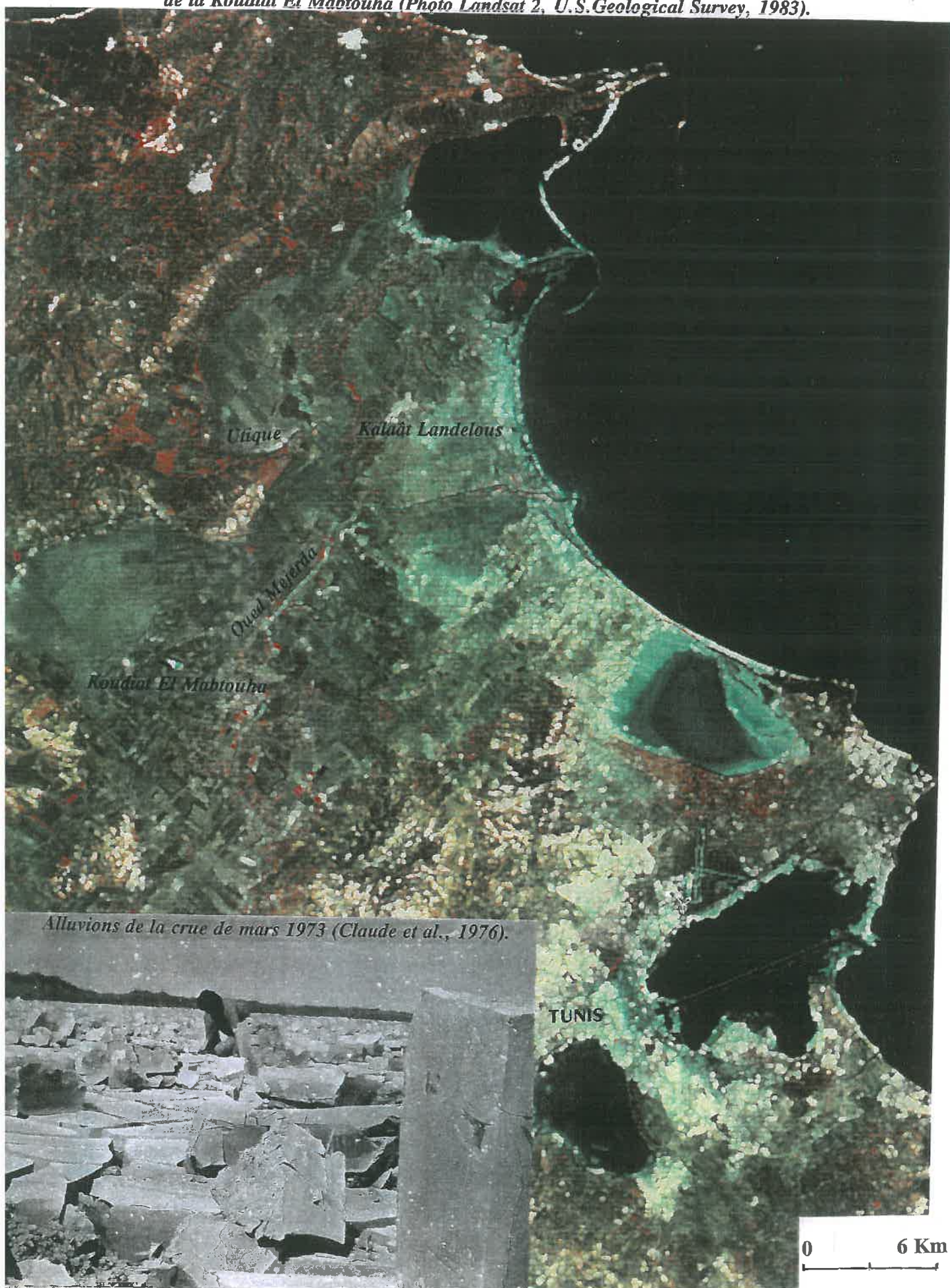




Figure 6. Extension de la crue de 1973 dans la Basse Mejerda (Claude et al., 1976).

IV. Le modèle de la lunette d'El Mabrouha

IV.1. Le site d'étude

IV.1.1. Répartition des lunettes tunisiennes

Aux auteurs australiens revient le mérite d'avoir expliqué depuis 1839 les collines généralement argilo-limoneuses édifiées sur les rives opposées aux vents actifs de certaines dépressions fermées. Proposé par Hills (1940 in Jauzein, 1967), le terme anglais de 'lunet' désignant un ouvrage fortifié en forme de croissant. C'est un pédologue travaillant en Oranie (Algérie) qui identifiera la première lunette nord-africaine (Boulaine, 1954). Par la suite de nombreuses lunettes furent reconnues en Tunisie. Elles se répartissent en trois grands ensembles (Coque, 1979; Figure 6).

- 1- KOUDIAT TOUBA
et EL MABTOUHA
- 2- SEBKHA ES SEDJOURMI
- 3- SEBKHA EL KOURZIA
- 4- GARAAT EL HAMADA
- 5- SEBKHA TEG DIMANE
- 6- SEBKHA KELBIA
- 7- SEBKHA SIDI EL HANI
- 8- SEBKHA CHERITA
- 9- SEBKHA M'TA MOKNINE
- 10- SEBKHA EN-NOUAL
- 11- CHOTT EL GUETTAR
- 12- SEBKHA SIDI MANSOUR
- 13- SEBKHA EL MELAH.

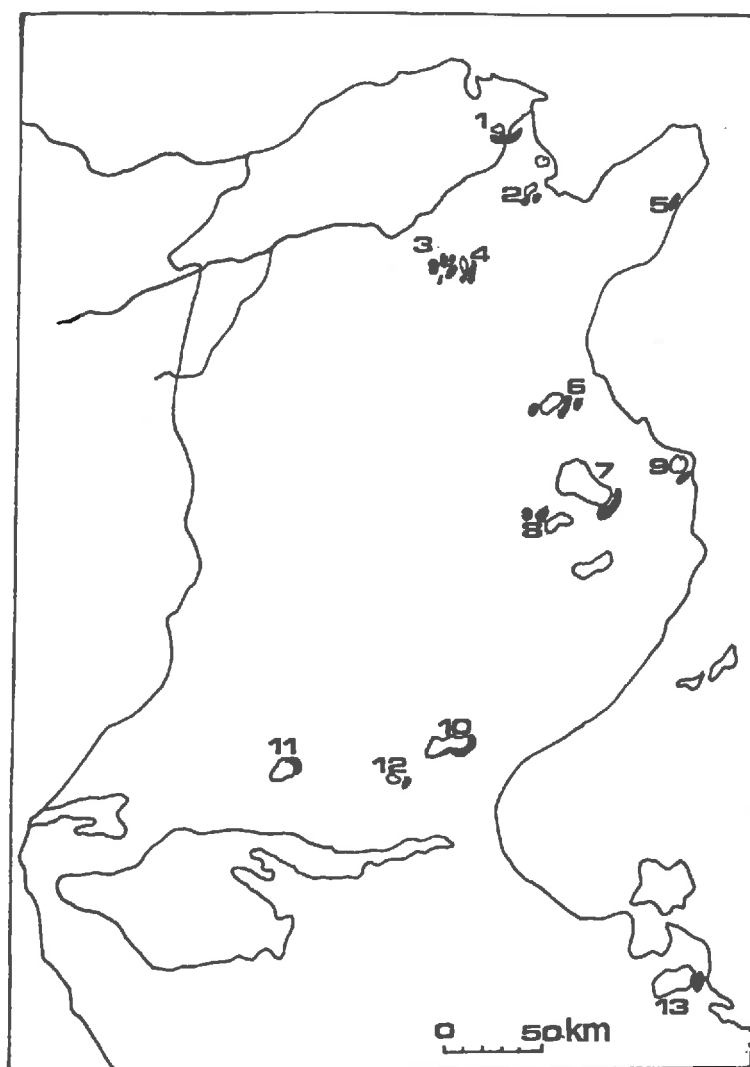


Figure 7. Localisation des lunettes tunisiennes (Coque, 1979).

La région tunisoise offre une remarquable collection de lunettes (Jauzein, 1967; Perthuisot et Jauzein, 1975). Au nord de Tunis, les Koudiat Touba et El Mabtouha correspondent à une importante lunette recoupée par la Mejerda depuis son édification sur les rives de la Garaât El Mabtouha. Un second ensemble d'imposantes lunettes caractérise les steppes du Centre-Est. Les lunettes disparaissent ou deviennent insignifiantes avec l'approche du Sahara (Sassi, 1969). Plus au Sud, mais le long du littoral de la Djeffara, des collines de sables fins, gris, signalent un bourrelet éolien construit sur le bord oriental de la Sebkhah El Melah (Perthuisot et al., 1972).

IV.1.2. Les collines de Protville et d'El Mabtouha

Sur la platitude quasi-parfaite de milliers d'hectares de la Basse Vallée de la Mejerda, un complexe de collines apparaissent comme posées (Jauzein, 1971). La Koudiat Touba dessine une vaste courbe de 8 km sur la rive droite de la Mejerda (Figure 8).

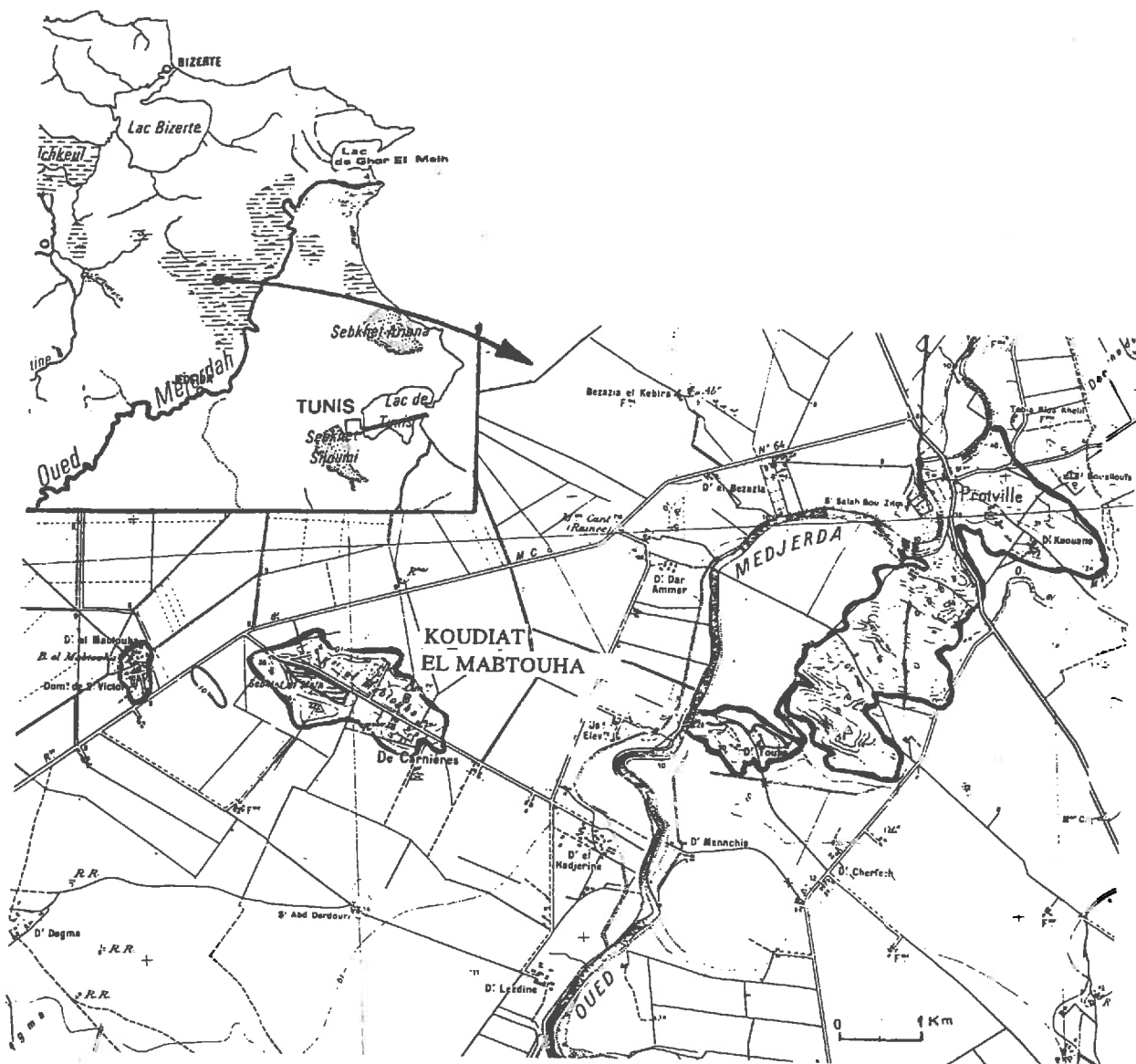


Figure 8. Localisation de la lunette de Protville et d'El Mabtouha.

Après une interruption de 2 km correspondant au passage du lit actuel, deux témoins poursuivent cette courbe en une corne de direction Ouest 30° Nord-Est 30° Sud: ce sont la Koudiat et la butte du domaine de Saint-Victor. Ces collines résultent de la juxtaposition de crêtes élémentaires séparées par des couloirs, parallèles les uns aux autres et de direction Ouest 30° Nord-Est 30° Sud signalée plus haut. Ces collines appartiennent au paysage du delta de la Mejerda, c'est à dire à une région d'évolution très récente. D'après Jauzein (1967), la Koudiat Touba est formée d'une roche limoneuse, grenue, beige. La structure est

en long prismes verticaux. Aucune trace de stratification ne peut être décelée. La teinte devient localement plus foncée vers le haut. Les organismes qu'il décèle à l'examen sont de deux sortes: *Cardium* édule correspondant à des coquilles irrégulières et épaisses abondantes au nord-est de Protville et la Sebkha El Melah, ainsi que des escargots. La présence du seul genre *Cardium* apparenté à la seule variété *Lamarcki* Reeve laisserait supposer sa provenance d'une lagune saumâtre. Quant aux Hélix, ils permettent d'affirmer que les collines ne correspondent pas à des alluvions marines. Les coquilles de *Cardium* épaisses ne se rencontrent qu'en fragments de plus en plus petits vers le haut. Les escargots se retrouvent au contraire dans toute l'épaisseur des couches, et souvent sous forme de coquilles entières.

IV.1.3. Epoque d'édification et complexe morphologique des lunettes

C'est Coque (1979) qui aborde le problème de l'âge des lunettes tunisiennes. La période d'édification de la lunette de Protville a pu être précisée par son appartenance à la plaine Deltaïque contrôlée par la Mejerda, et jalonnée par de nombreux vestiges archéologiques (Jauzein, 1971). Le colmatage du vaste golfe débuta en liaison avec un tracé méridional de l'oued. Depuis la fondation d'Utique par les phéniciens, vers 1100 avant notre ère, il aboutit à la constitution d'une lagune littorale, en communication avec la mer. Le bourrelet éolien s'édifiant déjà, sans doute, au rythme de la déflation estivale sur la lagune asséchée, entre des invasions d'eau marines lors des tempêtes, et surtout par les remontées saisonnières de la nappe salée. Dès les premiers siècles de l'ère chrétienne, à la suite de la progression du Delta, la lagune isolée se transformait en marécages formant la Garaât El Mabtouha. La fixation du cours actuel de la Mejerda à travers la lunette, au II-III siècles, définit le terme de sa genèse. Certes, on ne saurait impunément adopter ces cadres chronologiques pour l'ensemble des lunettes tunisiennes. En fait, celle de Protville est liée à une évolution des grandes lunettes kairouanaïses dans un laps de temps aussi court. Ces édifices semblent avoir été élaborés dans un contexte bioclimatique proche de l'actuel, le climat aurait été similaire mais les phénomènes plus intenses (Belkhodja, 1966).

Le mécanisme de la formation d'un bourrelet éolien lié à une zone inondable est bien connu grâce à de nombreux travaux d'auteurs australiens et américains (Jauzein, 1967). Les sédiments de la sebkha sont fragmentés en micropolyèdres par la dessiccation. Ces micropolyèdres sont mobilisés par le vent et déposés à la bordure sous le vent du bassin en un système dunaire. L'orientation de la dune est tributaire de la résultante dynamique des vents de vitesse supérieure à 3 m/s suffisamment forts pour mobiliser les particules. Le lessivage du matériel déposé en assure la fixation et il en résulte une dune d'argile, un bourrelet éolien; qu'on peut qualifier de "lunette". Les micropolyèdres apparaissent en été par une sorte de fragmentation foisonnante de la partie supérieure du sédiment sur une profondeur de quelques centimètres. D'après Perthuisot et Jauzein (1975), les micropolyèdres sont des agrégats de 0,2 mm à 1 mm de diamètre, constitués de matériel détritique, cimenté par des sels, de taille peu homogène. Du point de vue minéralogique, ils contiennent du quartz, de la calcite et des minéraux phylliteux, peu de gypse, mais de la halite en abondance qui semble être le principal agent de l'agglomération des autres particules cristallines.

Le mécanisme de la formation de ce pseudosable ne paraît pas définitivement établi. D'après Novikoff (1961), la composition granulométrique du pseudosable est assez particulière. Le tamisage à sec montre qu'il y a 70% de "sables grossiers" et 28% de "sables fins". Or, une étude de ce même échantillon par les méthodes classiques de séparation granulométrique, montre que 60% de l'échantillon sont constitués par des particules dont le diamètre moyen est inférieur à 50 microns. Ainsi, la texture grossière n'est qu'apparente, les analyses par dispersion montrant que la texture réelle est fine.

IV.1.4. Evolution actuelle des sols des lunettes: désalinisation-désodisation

Les matériaux salés déposés sont exposés à une nouvelle pédogenèse et les sols qui en résultent traduisent les nuances du climat actuel et passé. L'action de l'eau se manifeste par le remaniement des sels solubles, du gypse, des bases échangeables, la destruction du pseudosable et une nouvelle organisation du matériau. Les sols constitués sur les formes anciennes ont subi soit une lixiviation verticale des sels solubles à faible profondeur, soit du fait de leur position en pente, une lixiviation oblique avec retour des sels vers la sebkha. La désalinisation est d'autant plus accentuée que le bourrelet se trouve dans une zone climatique plus humide et qu'il est plus ancien. L'eau a joué également en tant que facteur d'érosion intense sur ce matériau fragile (Belkhodja, 1966).

Gharbi (1975) étudiant les sols des lunettes de Protville, a constaté que le sol apparaît à l'état sec, très compact et que les horizons sont très peu différenciés. La structure est polyédrique mal développée à la surface, prismatique en profondeur avec un caractère vertical peu développé. La conductivité électrique manifeste un gradient croissant avec la profondeur résultant d'une lixiviation des sels pendant la saison humide. Le complexe absorbant est saturé surtout en calcium; le taux de ce dernier chute rapidement dans l'horizon profond (1 m-1,5 m). Le sodium échangeable croît par contre en profondeur. Le rapport Na/T est très faible en surface, il augmente fortement en profondeur traduisant une sodisation qui est à l'origine de la structure diffuse. Il classe ces sols parmi les sols peu évolués d'apport éolien et par endroits en vertisols peu accentués.

IV.2. Méthodes

La lunette choisie pour cette étude se situe sur la Koudiat El Mabtouha constituée de six collines au milieu desquelles s'étend une petite sebkha. Les profils étudiés sont situés sur un transect qui traverse une colline de part en part.

L'organisation des sols de la lunette est abordée par l'examen de la morphologie de la zone, par la description de ses constituants, de ses organisations verticale, latérale et micromorphologique et par l'identification de la relation entre les données micro et macro morphologiques.

Une série de caractéristiques physico-hydriques a également été prise en compte pour interpréter les données morphologiques et leur évolution en termes de genèse et de fonctionnement actuel.

V. La plaine de Kalaât Landelous

V.1. Le site étudié

V.1.1. Le milieu évolutif

La plaine de Kalaât Landelous d'une superficie d'environ 7500 ha environ, est située à 35 km au nord de Tunis. Elle est limitée à l'est par la mer Méditerranée, à l'ouest et au nord par le lit de la Mejerda et au sud par l'émissaire de Henchir Tobias. L'ensemble de la plaine aménagée se situe entre 0 et 5 m d'altitude. En bordure de la mer, des sebkhas sont en communication plus ou moins continue avec la mer.

La région se trouve dans un bioclimat méditerranéen semi-aride supérieur. Le régime thermique se caractérise par un hiver doux et tempéré et un été chaud et sec. Les vents les plus nocifs soufflent du Nord-Ouest en hiver et du Sud-Est en été. Les moyennes mensuelles sont d'environ 2 m/s. Ces vents violents constituent une contrainte pour la pratique de l'irrigation par aspersion. La pluviométrie moyenne annuelle est de 470 mm avec de fortes irrégularités intra et inter-annuelles. Le déficit hydrique climatique annuel est d'environ 900 mm, il s'étend du mois de mars jusqu'à octobre, avec un maximum de -204 mm au mois de juillet.

V.1.2. La genèse des sols

Cette plaine fait partie du Delta de la Mejerda. Un anticlinal de grès et d'argiles sableuses affleure au niveau du village de Kalaât Landelous (Jauzein, 1971). Le réseau hydrographique est constitué de l'Oued Mejerda et de ses anciens lits. Avant la mise en valeur de ces sols, deux oueds drainaient le périmètre: Oued El Gdim qui ne constitue actuellement qu'un grand réservoir tampon pour les eaux de ruissellement et de drainage, et l'émissaire de Tobias, canal construit en 1939 pour dévier les eaux de la Mejerda. L'ancien lit de la Mejerda qui limite le périmètre au Nord et à l'Ouest est endigué et colmaté par les dépôts et les alluvions. Les terres de la région sont constituées de sols peu évolués argilo-limoneux formés par des alluvions fines déposées par la Mejerda (DRES, 1981). L'étude agro-pédologique fait ressortir (Mori, 1968):

- des sols peu évolués d'apport fluviatile constituant les meilleures terres agricoles de la plaine, ils se situent le long du lit de la Mejerda et de ses affluents.
- des sols halomorphes hydromorphes à nappe ou à engorgement situés dans la partie médiane de la plaine.
- des sols hydromorphes à submersion totale ou presque.

Les sols sont à dominance de montmorillonite: à Cherfech (10 Km de Kalaât Landelous), 70% de l'ensemble des minéraux phylliteux sont constitués de montmorillonite, 20% de kaolinite, 5% d'illite et 5% de chlorite. Le quartz existe à l'état de traces (Gallali, 1982).

La plaine de Kalaât Landelous est une zone mal drainée naturellement en raison de la faible altitude par rapport au niveau de la mer. Elle présente non seulement des possibilités

d'écoulement très limitées, mais également un risque d'intrusion marine. La profondeur de la nappe oscillait entre 0,7 m et 2 m avec une conductivité électrique qui variait entre 20 et 50 dS/m. Dans la zone aval, la nappe est très influencée par la mer. L'apport d'eau pluviale en hiver entraînait d'une part la submersion temporaire du terrain, et d'autre part la formation de lentilles d'eau discontinues fluctuantes selon les saisons. De par sa genèse, l'héritage marin confère à la zone son caractère halomorphe. Cet héritage salin contenu dans les sédiments d'origine laguno-marine et dans les eaux souterraines, provoque la contamination des matériaux apportés au fil des années par l'Oued Mejerda. Il y a une redistribution de l'héritage salin selon des processus spécifiquement pédologiques impliquant le transfert et le stockage des sels. Ils sont fortement influencés par les facteurs du milieu naturel réglant la circulation et l'accumulation des sels dans le sol.

V.1.3. L'aménagement de la plaine

L'aménagement du périmètre a été entrepris en 1986. La pratique de l'irrigation dans la plaine de Kalaât Landelous était très localisée sur les deux rives de l'Oued Kedim ou sur la rive droite de l'ancienne Mejerda. C'était une irrigation sans drainage artificiel avec une rotation des parcelles. Les terres étaient cultivées en céréales et maraîchages irriguées par les eaux de l'Oued Mejerda. Pour la mise en valeur de ce périmètre, un réseau d'irrigation et de drainage a été installé. Le réseau d'assainissement et de drainage comprend un réseau tertiaire, un réseau secondaire, un réseau principal et enfin une station de pompage des eaux de drainage vers la mer. Les drains tertiaires enterrés sont en P.V.C, de 80 mm de diamètre. Ils sont longs de 250 m et posés à une pente de 0,10 % à 0,15 %. L'écartement des drains est de l'ordre de 40 m (SCET Tunisie, 1981). Les collecteurs secondaires sont à ciel ouvert, de forme trapézoïdale. Leur profondeur varie de 1,60 à 1,90 m avec un écartement de 360 m. Les collecteurs secondaires débouchent dans deux émissaires principaux E1 et E2 qui véhiculent les eaux de drainage vers la station de pompage P4 permettant le refoulement de ces eaux vers la mer. Le débit nominal de l'équipement est de 3000 l/s et la hauteur de refoulement de 4,55 m (AGRAR, 1992). Le périmètre de Kalaât est divisé en unités parcellaires de 5 hectares chacune desservies par une borne d'irrigation. Le pompage des eaux de la Mejerda est assuré par une station P0 qui envoie l'eau au bassin de Zhana et au barrage de Kharba fournissant ainsi la charge nécessaire pour une irrigation par aspersion. Pour alimenter le périmètre, ces eaux transitent par une station P2. Les cultures maraîchères et fourragères ont été retenues pour valoriser ces terres. Leurs besoins en eaux sont estimés à 6600 m³/ha, soit un débit fictif continu pendant le mois de pointe (Juillet) égal à 0,47 l/s/ha.

IV.2. Méthodes

Etude de la morphologie des sols à diverses échelles spatiales: La méthode adoptée comporte une caractérisation structurale et texturale des sols, une analyse de la variabilité des paramètres d'organisation et la caractérisation de la salure des sols et de leur variabilité. Ceci se termine par l'analyse de la morphologie de sols stratifiés dans le périmètre et la conséquence sur la distribution des sels (Figure 9).

Etude du fonctionnement des sols à l'échelle du périmètre et des secteurs: L'analyse fonctionnelle porte sur les relations nappe-sol et sol-pluie. Le comportement des

sols sous irrigation et drainage est traité à l'échelle du périmètre en se basant sur la salure des sols et les caractéristiques de la nappe à partir de mesures semestrielles.

Les caractéristiques des eaux de drainage sont appréciées par des mesures de la qualité et du débit des eaux de drainage dans les émissaires, dans certains collecteurs et dans quelques drains. Le bilan des sels est déduit du suivi des entrées et des sorties des sels (station de pompage de l'eau d'irrigation-station de pompage de l'eau de drainage).

Le comportement des sols sous pluie simulée est traité par des essais réalisés sur des parcelles irriguées selon différents modes d'irrigation.

Etude de l'évolution des sols à l'échelle de la parcelle: Elle concerne l'évolution des systèmes Sol-Eau d'irrigation-Nappe, Sol-Eau d'irrigation-Saisons et enfin Sol-Eau d'irrigation-Plante. L'essai a été entrepris dans une parcelle située dans la zone à haut risque de salinisation. Cet essai a comporté la gestion du sol, de l'eau d'irrigation et le suivi des propriétés du sol, des caractéristiques de la nappe et la croissance et la production des cultures entre juin 1992 et septembre 1994.

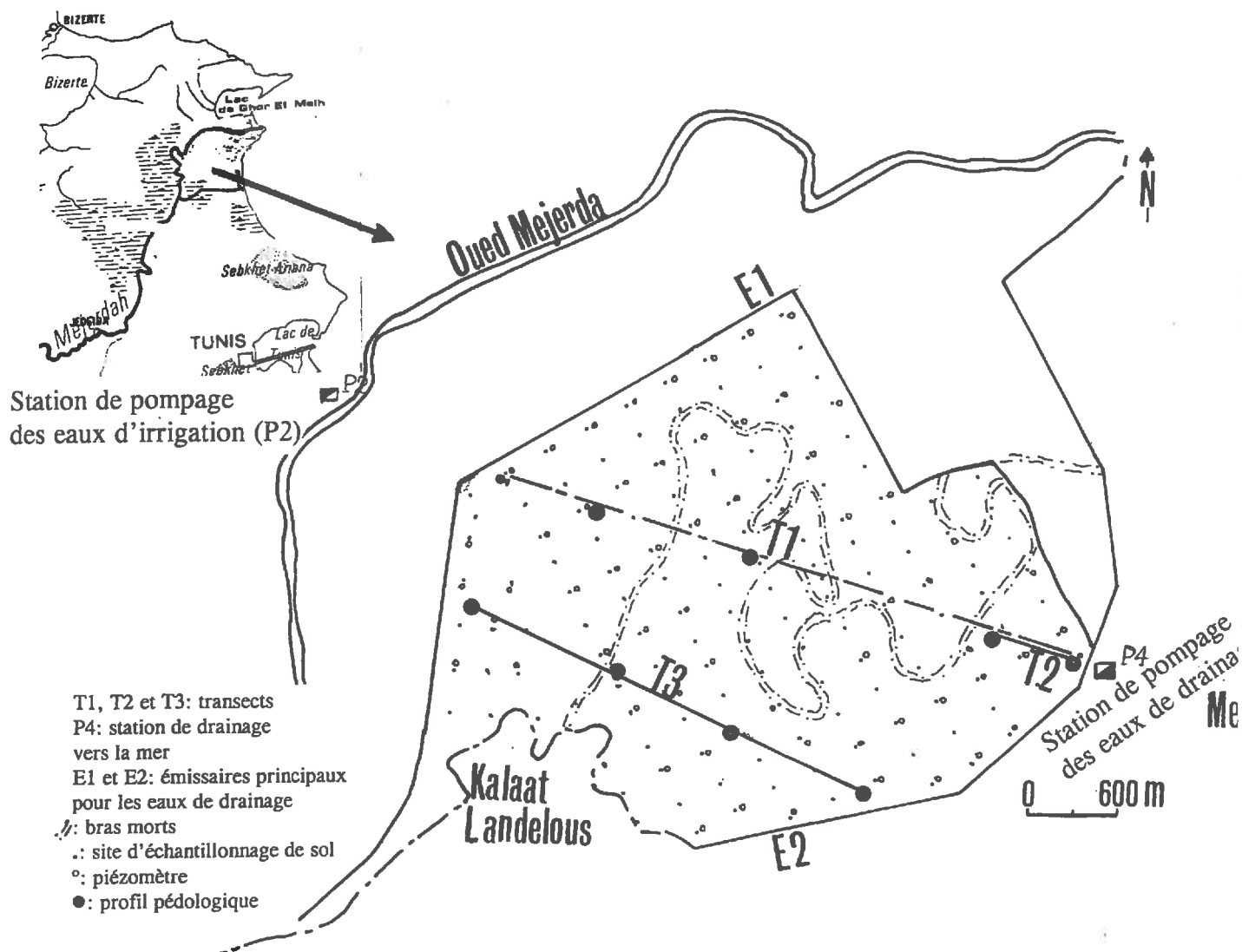


Figure 9. Sites étudiés dans le périmètre de Kalaât Landelous et lieux d'échantillonnage du sol et des eaux de la nappe.

CONCLUSION

La constitution et l'évolution des sols de la Basse Vallée de la Mejerda s'expliquent par la nature géologique des matériaux du bassin versant de l'Oued Mejerda et par l'activité hydrologique du réseau hydrographique de ce bassin. Entre des phases très actives de crues et des phases moins actives de tarissement, les alluvions sont soit emportées soit déposées et les sels soit solubilisés soit accumulés. Les premiers phénomènes surviennent en amont et les seconds en aval. C'est le cas du sous-bassin de la Basse Vallée dans lequel on retrouve les lunettes, formations recrées par les vents dans un système lagunaire saisonnièrement ouvert vers la mer, et le périmètre de Kalaât Landelous, plaine alluviale située dans le système deltaïque de l'Oued Mejerda et gagnée au fil des années sur la mer. D'où l'héritage marin conféré à ces deux formations.

La mise en valeur de ces deux milieux très salés et sodiques a débuté, pour les lunettes depuis la fin de leur mise en place, c'est-à-dire quand la lagune qui les sépare de la mer a disparu sous les alluvions des crues de la Mejerda. La bonification continue encore de nos jours. Pour la plaine de Kalaât, la mise en valeur est anthropique. Elle a commencé depuis la réalisation d'un ensemble d'aménagements régulateurs de l'écoulement de l'Oued Mejerda et d'opérations d'assainissement des plaines et de protection des terres situées sur le bassin versant. Elle s'est accélérée plus tard par l'assainissement et le drainage du périmètre lui-même et se poursuit actuellement par l'irrigation des terres et l'évacuation en continue des sels vers la mer.

Les méthodes employées pour l'étude de la mise en valeur des sols salés de la Basse Vallée de la Mejerda s'inscrivent dans une approche globale de l'étude des sols salés et de la salinisation en Tunisie. L'approche a été adaptée à la spécificité de chaque système et des objectifs.

Pour l'étude de la lunette, comme il s'agit d'une formation salée et sodique d'origine éolienne et comme la récupération est naturelle, à l'étude de l'organisation, du fonctionnement hydrique et de l'évolution physique et géochimique des sols, ont été intégrées les observations micromorphologiques et les analyses minéralogiques.

Pour l'étude des sols du périmètre de Kalaât Landelous, plaine alluviale salée et sodique bonifiée par un aménagement hydro-agricole basé sur le drainage des terres et leur irrigation, la méthode de travail a été basée sur une typologie des sols et une caractérisation des matériaux et d'une strate. Le fonctionnement est suivi à partir de l'analyse du système sol-nappe-drains et du système sol-pluie. Enfin l'évolution est examinée à l'échelle de la parcelle dans le système sol-nappe-eau d'irrigation-saison-culture.

RESULTATS

Première Partie

ORGANISATION, FONCTIONNEMENT

ET EVOLUTION DES SOLS

DE LA LUNETTE D'EL MABTOUHA

Chapitre I

L'ORGANISATION

ET LE FONCTIONNEMENT

PHYSICO-CHIMIQUE DES SOLS

DE LA LUNETTE

Nous abordons dans cette partie l'organisation et le fonctionnement des sols développés sur les lunettes. Nous procéderons dans une première phase, selon des transects choisis, à l'étude de la morphologie et de la micromorphologie des sols, puis nous considérerons les constituants organiques et minéraux, enfin nous terminerons par le fonctionnement de ces organisations vis-à-vis de la circulation de l'eau et des solutions. Mais au préalable, nous passons en revue les méthodes employées.

I. APPROCHE D'ETUDE DES SOLS DE LA LUNETTE

Les sols de lunette choisie pour cette étude se situent sur la Koudiat El Mabtouha constituée de six collines au milieu desquelles s'étend une petite sebkha. Les profils étudiés sont situés sur un transect long de 1200 m qui traverse une colline du sud-ouest au nord-est (Figure 10; Planche 2). Il s'agit de 5 profils (P.1 à P.5) situés sur des sols de lunettes et un profil (P.6) situé dans la plaine alluviale.

Compte tenu de la faible différenciation des horizons pédologiques, nous avons prélevé différents types d'échantillons de 20 en 20 cm dans le premier mètre et de 50 à 50 cm en profondeur. Les échantillons prélevés sont de deux natures:

- perturbés pour les analyses chimiques, mécaniques et minéralogiques;
- et non perturbés pour les observations micromorphologiques et pour l'estimation de la stabilité structurale. Les eaux de la Sebkha et de la nappe ont été prélevées et analysées.

Dans une première phase, tous les profils ont été caractérisés. Dans une deuxième phase, nous nous sommes intéressés à une étude localisée sur les profils 1, 2 et 3. L'organisation des sols de la lunette est abordée par l'examen de la morphologie de la zone, par la description de ses organisations verticale, latérale et micromorphologique et par l'identification de la relation entre les données micro et macromorphologiques.

Les constituants des sols ont été déterminés. Il s'agit de la composition granulométrique, des teneurs en matière organique, en calcaire et en gypse et de la nature minéralogique des argiles.

Dans l'étude des caractéristiques physico-hydriques, nous nous sommes intéressés à la densité apparente et à la porosité totale, aux caractéristiques hydriques, à la stabilité structurale, aux limites d'Atterberg et à l'extensibilité linéaire.

La caractérisation géochimique a porté sur le pH, les profils de salinité, les bases échangeables et la capacité d'échange cationique. Dans l'évolution géochimique, nous avons considéré les faciès géochimiques, les eaux de la nappe et de la Sebkha et l'état de saturation des solutions du sol.

Profil en long

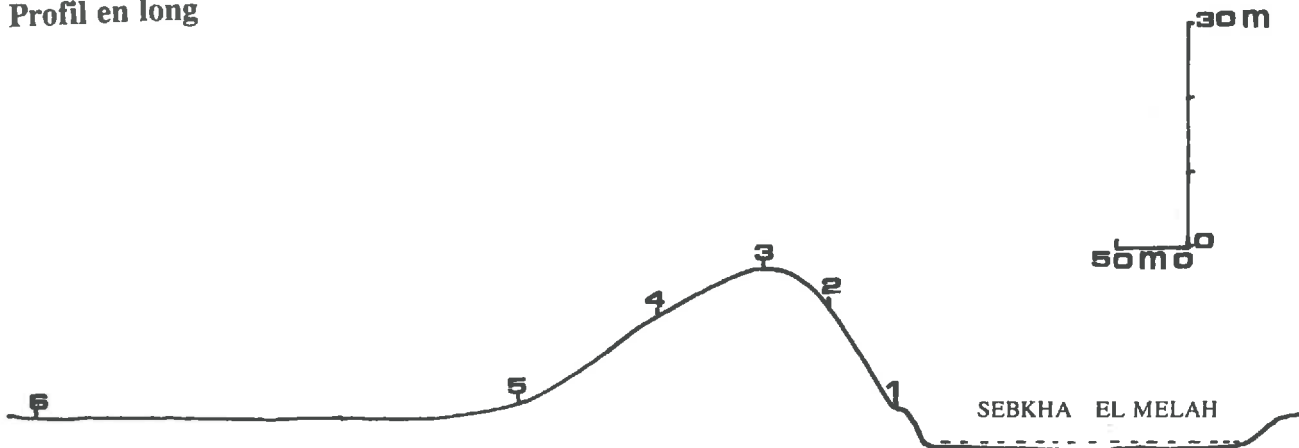


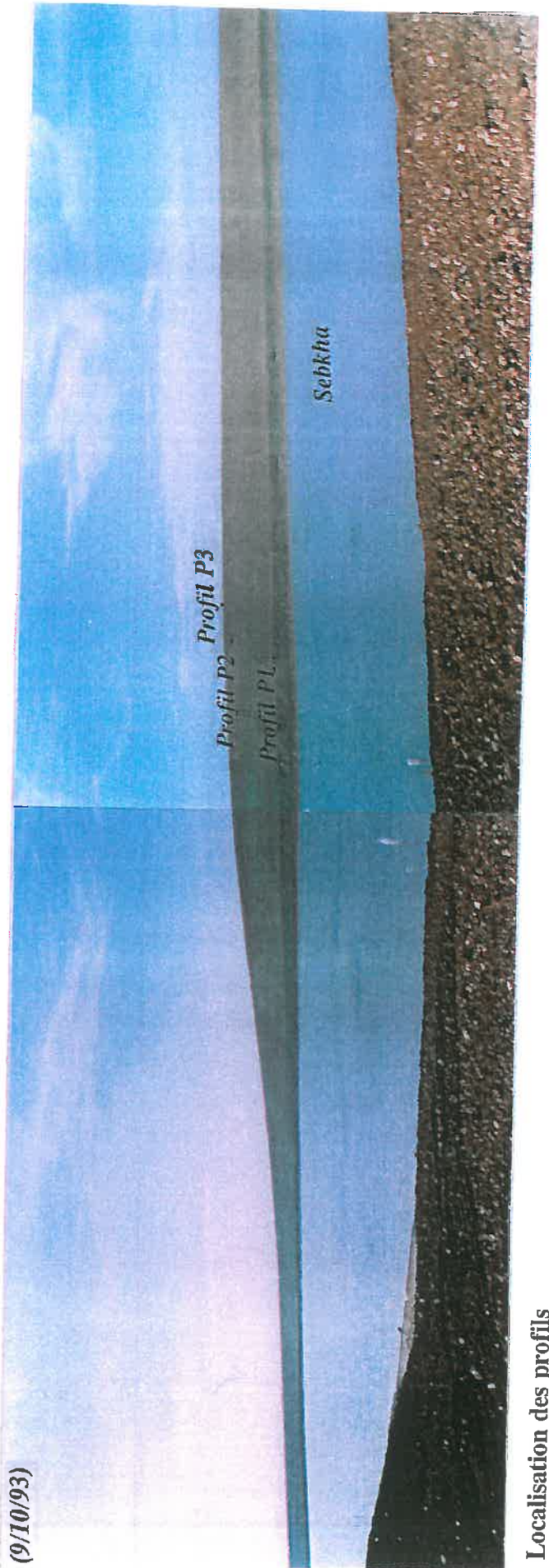
Figure 10. Localisation des profils sur photographie aérienne (Echelle: 1/12 500).

II. LA MORPHOLOGIE DE LA ZONE DE LA LUNETTE

II.1. L'organisation verticale

Des profils pédologiques ont été décrits sur des tronçons choisis. Le but est de pouvoir relier latéralement des observations faites sur les organisations verticales successives, en réduisant la part d'incertitude due aux interpolations d'une verticale à une autre (Boulet et al., 1982). L'étude de l'organisation des sols est basée sur l'étude de 6 profils situés sur un même transect.

Planche 2. La lunette de la Koudiat El Mabrouha.



Localisation des profils

Les descriptions détaillées de tous les profils observés sont figurées en Annexe 1. Ne sont présentés dans le texte que les commentaires qui se rapportent à ces observations de terrain. Nous considérerons dans l'ordre, les principaux caractères morphologiques à savoir la couleur, les arrangements et les traits pédologiques.

- La couleur:

Elle se situe dans les gammes: 2,5Y; 7,5YR; 10YR. Elle est beige jaunâtre, 2,5Y5/4 à 2,5Y4/3, en surface. Elle devient plus jaunâtre 2,5Y5/6 en profondeur.

- L'arrangement:

Sur la figure 11, nous avons porté les principaux types d'arrangements observés sur le terrain. Deux types d'arrangements sont présents systématiquement dans tous les profils observés. Il s'agit d'un niveau de surface où la structure est polyédrique moyenne à fine, peu nette. Ce niveau est d'épaisseur variable et atteint son maximum au sommet de la colline (profil-3: 50 cm). Le 2ème type d'arrangement qui atteint des épaisseurs nettement plus importantes, est plus limité au sommet de la colline (profil-3 et profil-2). Il repose à partir de 1,20 m de profondeur sur une structure massive développée sur quelques mètres de profondeur. Un quatrième arrangement qui est très localisé, a été observé à la surface des profils 1 et 6 sous forme de structure grumeleuse.

- Les traits pédologiques:

Ils sont de 2 sortes:

- Les accumulations calcaires: elles se présentent sous forme de taches et nodules de taille centimétrique. Elles sont présentes dans tous les profils sauf dans la partie de sol en plaine (profil-6). Elles sont généralement localisées et sont absentes des niveaux à structure massive.

- Les accumulations de gypse: sous forme de microrosettes très localisées dans le niveau à structure massive, à la profondeur de 2,80 m.

II.2. L'organisation latérale

Les descriptions faites au niveau des différents profils permettent, moyennant des interpolations d'une partie à une autre, d'établir la figure 11 qui schématise la répartition latérale des principaux arrangements et des traits pédologiques. Les variations latérales de l'épaisseur du niveau polyédrique de surface sont dues aux phénomènes d'érosion. Ce phénomène est nettement observable si l'on se déplace du profil-3 situé au sommet, au profil-1 situé en bas de pente; de même du profil-3 au profil-5.

Les répartitions latérales des accumulations de CaCO_3 et $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ constituent l'un des principaux traits de différenciation. En effet, le front inférieur des accumulations calcaires devient de plus en plus profond, lorsqu'on passe du profil-3 vers les profils 4 et 5 situés plus bas. Le profil-6, sol sur alluvions récentes, se développant donc sur un matériau plus jeune, mais assez riche en carbonates totaux, ne comporte pas d'éléments figurés calcaires. Dans les parties hautes (profil-3 et profil-2), le gypse, observable sous forme de microrosettes à une profondeur de 2,80 m disparaît à l'aval. Les profils les plus bas (1 et 5) développés sur les matériaux de lunettes, et le profil-6 développé sur des alluvions, subissent à leur base l'effet d'une nappe phréatique, effet particulièrement marqué dans les parties basses, où s'observe une hydromorphie temporaire (profils 1, 5 et 6).

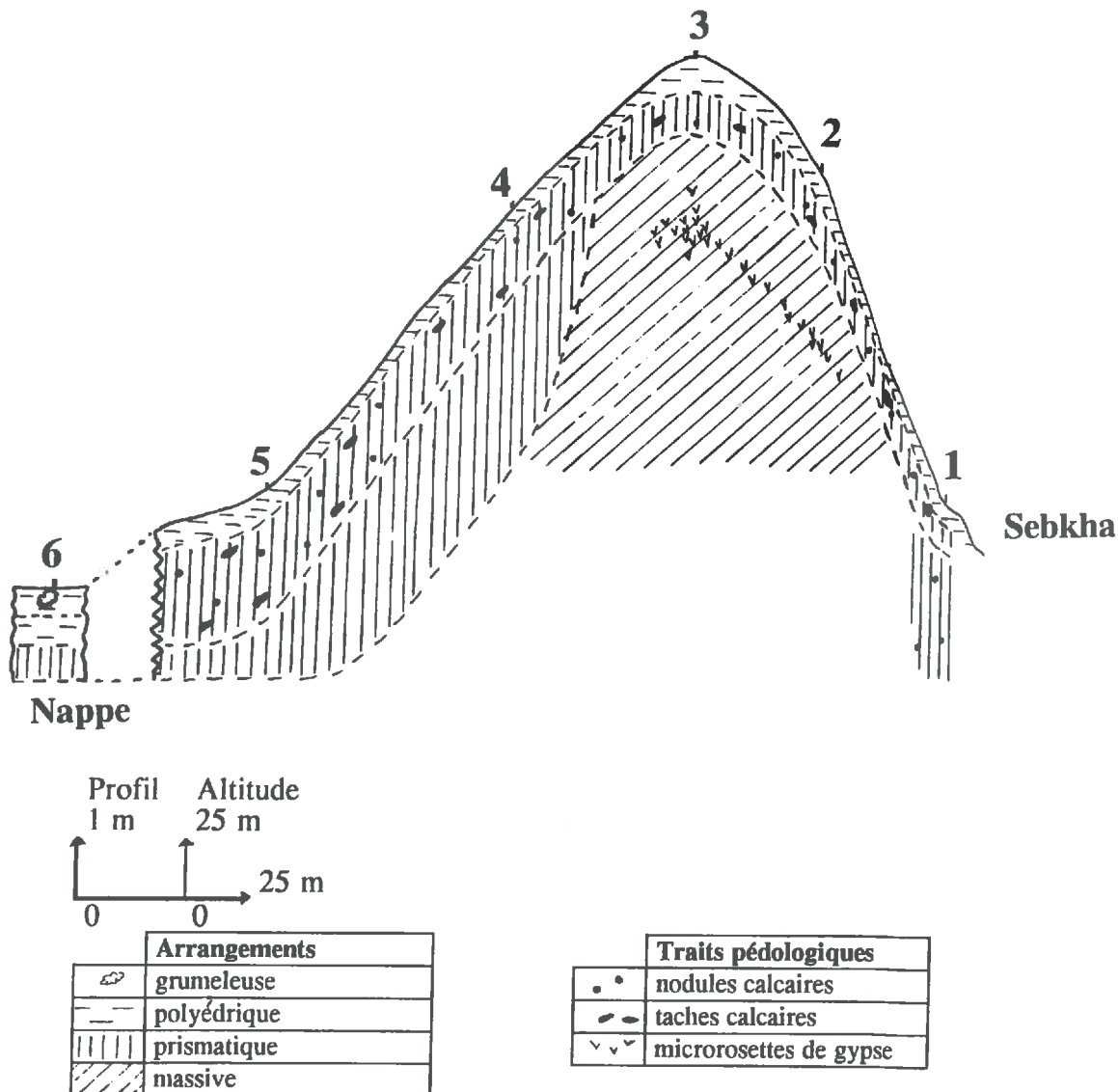


Figure 11. Répartition latérale des arrangements et des traits pédologiques (Hachicha, 1985).

II.3. Caractérisation et organisation micromorphologiques

Après la démarche macromorphologique de terrain, nous avons eu recours à l'observation à fort grossissement, l'objectif étant d'examiner l'unité fondamentale (basic unit, Brewer, 1964) pour mettre en évidence certains traits d'évolution du matériau originel. Nos prélèvements ont été effectués le long du transect orienté Sud Ouest-Nord Est (Profils 3, 2 et 1). Les observations ont porté sur des lames minces de 30 μm dont l'interprétation s'est basée sur le modèle établi par Bullock et al. (1985) qui distinguent les trois caractères suivants: la microstructure, la masse basale et les pédotraits. Les observations détaillées du profil-3 sont résumées au tableau 1 (Figure 12).

Tableau 1. Observations micromorphologiques - Profil-3.

Profondeur (m)		0-0,40	0,40-0,80	0,80-1,00	1,00-1,50	1,50-2,00	2,00-3,00	3,00-4,50
MICRO-STRUCTURE	TYPE	cavitaire+ fissures et chenaux (grumeleuse)	cavitaire+ fissures et chenaux	tubulaire+ cavités, fissures et chenaux	tubulaire, légèrement grenue+ Vides d'entassement	grenue peu nette+ fissures, cavités et vides d'entassement	grenue nette+ fissures, cavités et chenaux	grenue très nette+ fissures, cavités et chenaux
		fissures	+	+	peu commun	+	+	moins commun
		cavités	++	+	peu commun	+	+	moins commun
		chenaux	+	++	+	+	+	moins commun
MASSE BASALE	grains grossiers	quartz	s.f. très fréquent	s.f. fréquent	s.f. fréquent	s.f. commun	s.f. fréquent	s.f. très fréquent
		calcite	s.f. fréquent	s.f. très fréquent	s.f. fréquent	s.f. commun	s.f. commun	s.f. très fréquent
		débris de coquille	s.f. à s.m. commun	s.f. à s.m. commun	s.f. à s.m. commun	s.f. à s.m. commun	s.f. à s.m. commun	s.f. à s.m. commun
	micromasse		argile brune parsemée de points opaques+ calcite microcristalline- biréfringence: cristallomorphe					
	matière organique		+	moins commun	rare	rare	rare	rare
	distribution relative g/f		porphyrique simple+à double espacement	porphyrique à double espacement	porphyrique simple+à double espacement	porphyrique à double + ouvert	porphyrique simple+à double espacement	porphyrique simple
PEDO-TRAITS	zones de décalcification		occasionnels	commun	commun	rare	rare	plus rares
	taches-nodules calcite micro cristalline		s.f. commun	s.f. commun	occasionnels	occasionnels	occasionnels	occasionnels
	calcite de néo-formation		+	+	+	+	+	+
	amas de gypse		-	-	-	++	++	-

s.f.:sable fin s.m.:sable moyen

- La microstructure:

Le schéma simplifié des différentes microstructures observées au niveau du profil 3 a été porté sur la figure 12 (le profil-2 étant quasiment identique au profil-3). Dans chaque grand type d'arrangement, nous avons étudié les microarrangements susceptibles d'y être présents. Au niveau 0-0,20 m, à la structure polyédrique correspond une microstructure cavitaire avec des fissures et des chenaux communs. Au niveau 0,80 m-1 m à 1,5 m, à la structure prismatique correspond une microstructure tubulaire avec des fissures obliques à

la surface du sol et quelques cavités. Dans la structure massive, nous observons une organisation élémentaire constituée d'agrégats subarrondis avec des vides d'entassement, des cavités, des fissures et des chenaux assez fréquents; qui déterminent de ce fait une microstructure grenue. Localement en surface, on observe une microstructure grumeleuse peu développée.

- La masse basale:

- Les grains grossiers: ils sont constitués par des grains de quartz et de calcite de taille s.f.(sable fin: 20-50 μm) à s.m. (sable moyen: 50-500 μm) assez communs, de forme subangulaire. A côté des grains de quartz et de calcite, nous avons des débris de coquillages assez fréquents et rarement des grains de glauconie et de calcédoine. Ces grains grossiers sont constamment présents dans les profils.

- La micromasse: constituée d'argile brune parsemée de points opaques avec une calcite microcristalline. L'assemblage de biréfringence interne est cristallomorphe. Cette argile devient plus jaunâtre en profondeur. Dans les couches de microstructure grenue, cette micromasse se trouve sous forme d'agrégats subarrondis de taille très variable (0,01 à 0,5 mm), de couleur assez variable, plus brune pour certains agrégats.

- La matière organique: constituée de débris de végétaux, elle se localise dans les vides (fissures) et disparaît au-delà de 1 m de profondeur.

- La distribution relative g/f (grossiers/fins): elle est porphyrique simple en surface, et porphyrique à double espacement à la base des profils, voire par endroits porphyrique ouverte. Cela résulte entre autres de l'appauvrissement du premier mètre du sol en éléments fins.

- Les pédotraits:

Ils sont au nombre de quatre:

- Zones de décalcitisation: elles sont présentes dans l'ensemble des profils, bien que plus communes dans les couches du surface. Elles disparaissent avec l'apparition de la microstructure grenue. Ces zones sont souvent associées à un lit de grains de calcite formant un remplissage meuble discontinu sur un côté de fissure (Planche 3). De taille variable, ces zones peuvent atteindre 2 mm de longueur. Elles sont subarrondies ou allongées, de limite irrégulière, et d'assemblage de biréfringence interne en mosaïque et striée. Elles peuvent être obliques ou horizontales.

- Calcite de néoformation: elle se présente sous forme de grains subarrondis, de taille s.f. . Ces grains sont le plus souvent associés aux zones de décalcitisation.

- Taches et nodules calcaires: ils sont constitués d'une calcite microcristalline, de couleur brun foncée, de taille s.f. à s.m.; de forme subarrondie. Ces taches et nodules correspondent aux accumulations calcaires observables microscopiquement. Ils sont présents dans tous les profils, sauf dans les niveaux à structure massive et microstructure grenue.

0 0,1 mm

40

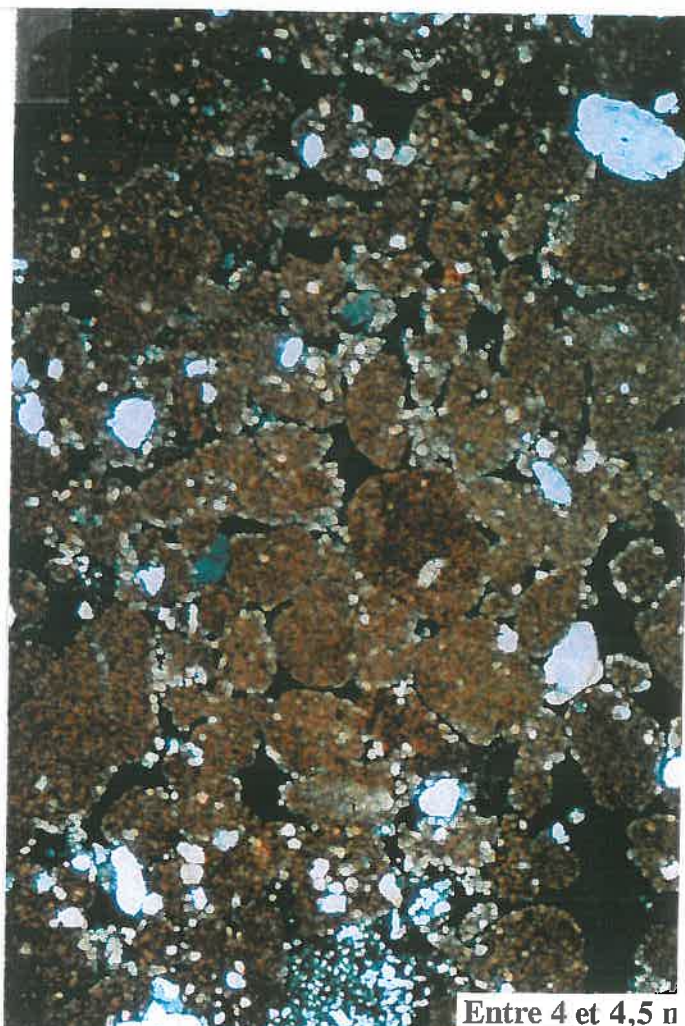
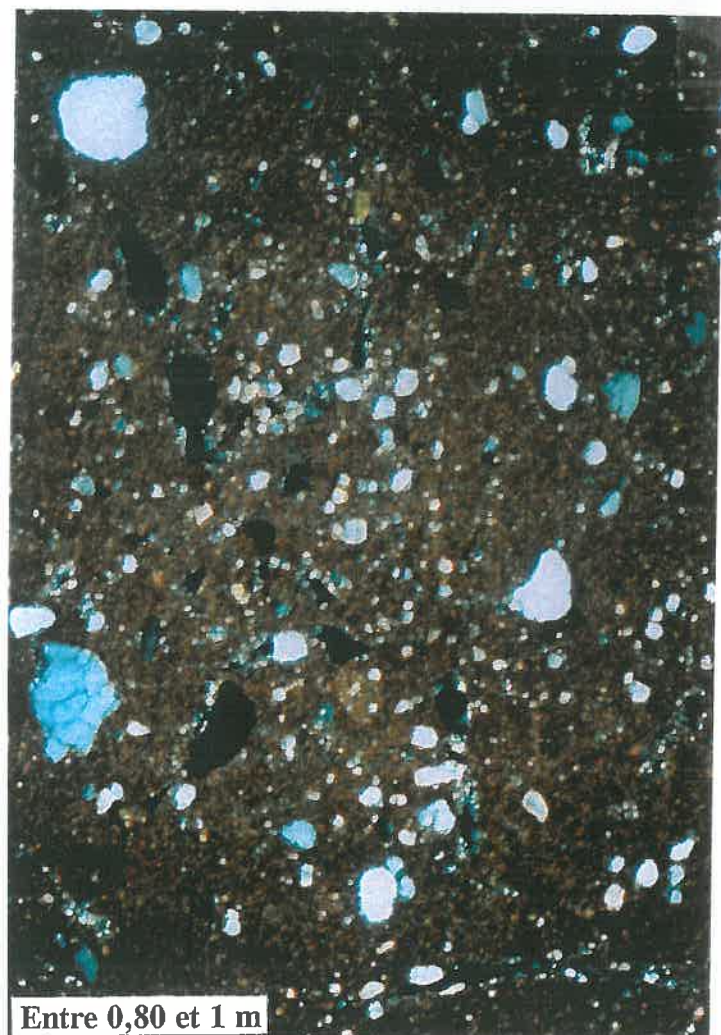
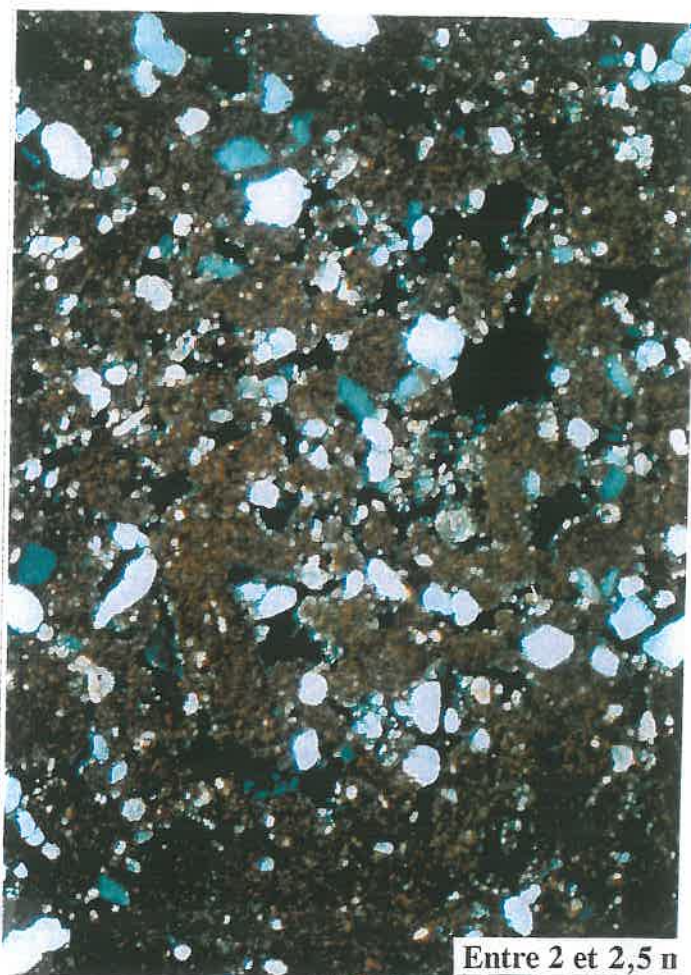
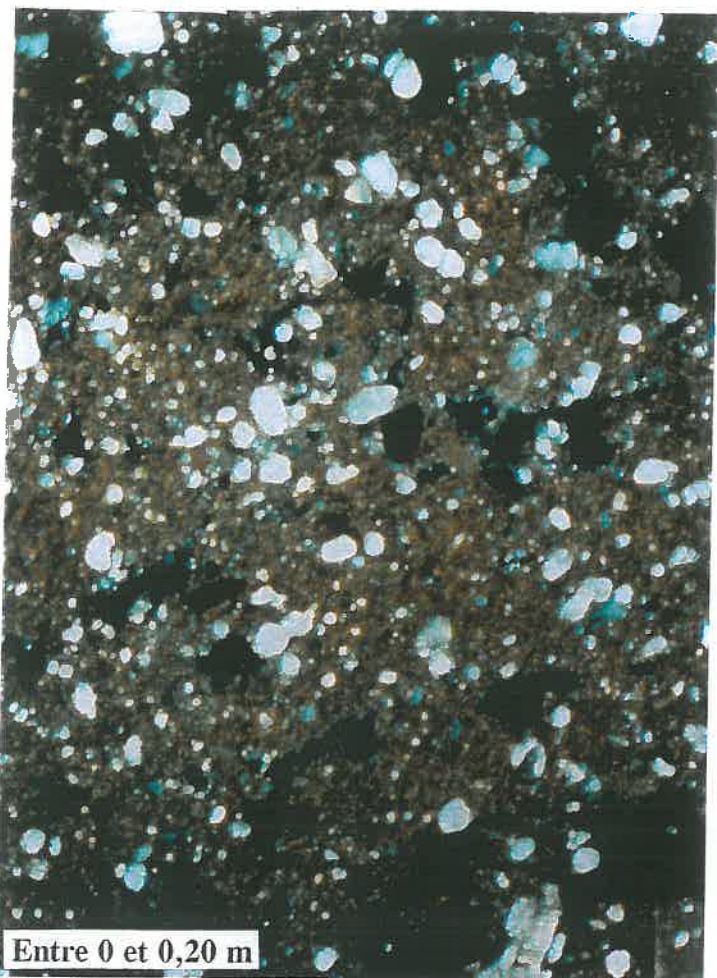


Figure 12. Evolution verticale de la microstructure dans le profil 3.

- Gypse: à partir de 2,5 m de profondeur, on observe dans le profil-3 seulement, des amas de lentilles de gypse (Planche 3). Ces amas se localisent dans les vides inter-agrégats. La taille de ces grains de gypse est variable (0,04 à 0,01 mm). Il existe des lentilles isolées entre 3 m et 3,5 m. En plus de cela, nous retrouvons du gypse grossier en amas (1 mm de taille).

I.4. Relation (filiation) entre structures micro et macromorphologiques

Nous avons schématisé, à partir des micro-organisations verticales la répartition latérale des différentes microstructures observées (Figure 13) et nous avons reporté sur ce même schéma les délimitations des 3 principaux macroarrangements: polyédrique (P), prismatique (R) et massif (M); l'idée étant d'analyser les correspondances quand elles existent entre micro et macromorphologie (Tableau 2) et de délimiter les zones de transition d'un macro-arrangement à un autre (Hachicha et al., 1987). Sur ce schéma (Figure 13), nous avons défini en fonction des caractères micromorphologiques, essentiellement microstructure et pédotraits, 6 niveaux différents:

- **Niveau 1:** La microstructure est cavitaire avec des fissures et des chenaux. On y observe des traces de matière organique. La distribution relative g/f est porphyrique simple. Comme pédotraits, on rencontre des taches et nodules calcaires, des zones de décalcitisation et de la calcite de néoformation. Ce niveau est plus épais au sommet (profil-3) et au piedmont (profil-1) du versant. Il correspond à peu près à l'horizon polyédrique.

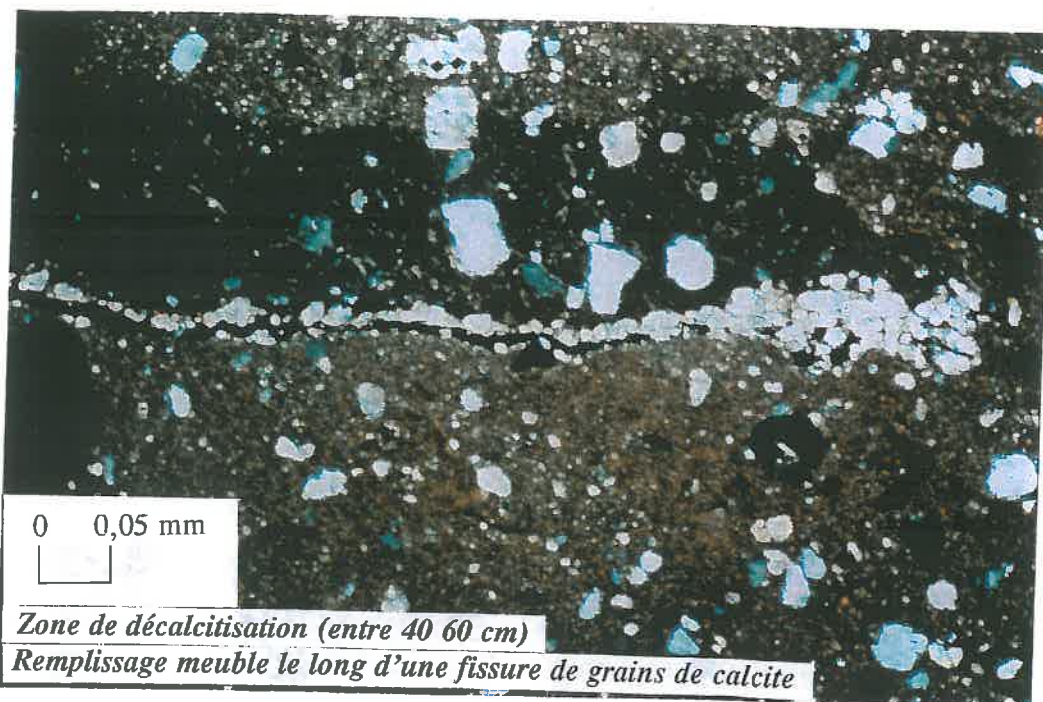
- **Niveau 2:** Il succède au premier vers le bas et il en est moins épais. La microstructure est cavitaire à tubulaire avec des fissures. La distribution relative g/f est porphyrique à double espacement à ouverte. On y rencontre les taches et nodules calcaires ainsi que les zones de décalcitisation et la calcite de néoformation. Ce niveau assez réduit, correspond au passage de l'horizon polyédrique à l'horizon prismatique.

- **Niveau 3:** Ce niveau est assez développé dans l'ensemble des profils. Il comporte une microstructure tubulaire avec des cavités et des fissures. On y rencontre les mêmes pédotraits que précédemment. Ce niveau peu poreux correspond à l'horizon prismatique proprement dit.

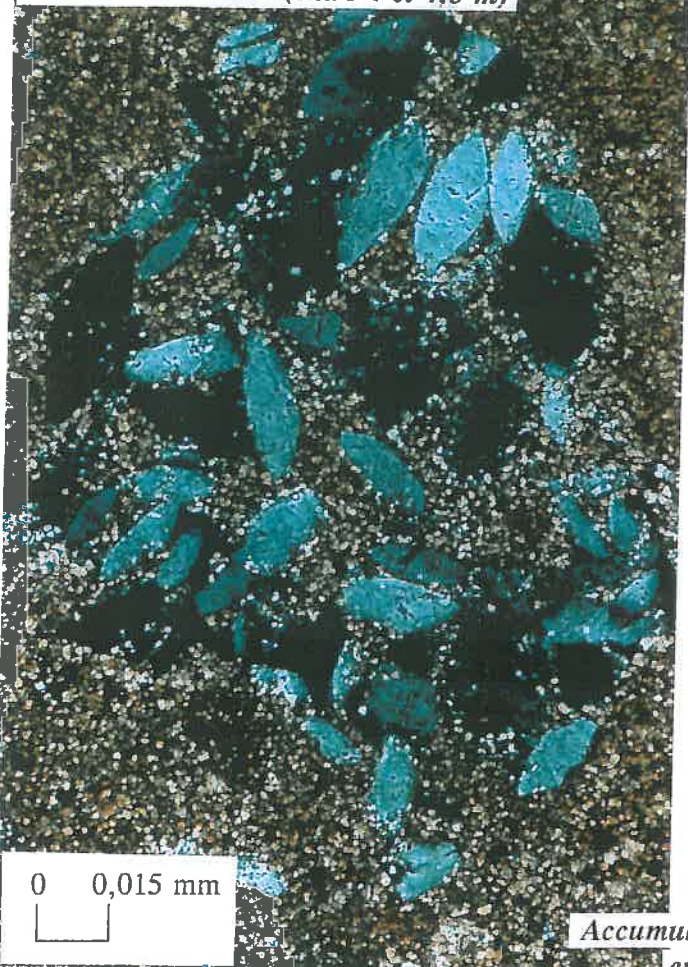
- **Niveau 4:** Ce niveau ne se rencontre que dans le profil-1, où il est assez important. La microstructure est fissurée avec des cavités et des chenaux. On a les mêmes pédotraits que précédemment.

- **Niveau 5:** Ce niveau ne se rencontre qu'au sommet de la formation. La microstructure est tubulaire, avec une amorce de la microstructure grenue, il constitue de ce fait une zone de transition entre les niveaux superficiels assez évolués et les niveaux profonds plus ou moins conservés. Il n'y a plus de zone de décalcitisation. La distribution relative g/f est porphyrique simple. C'est un milieu assez poreux: vides d'entassement, cavités, fissures et chenaux. Il correspond à la zone de passage d'une structure prismatique à une structure massive.

Planche 3. Pédotraits au niveau du profil P3.



Accumulation de gypse sous forme de lentilles dans la micromasse (entre 4 et 4,5 m)



Accumulation de gypse dans le vide inter-grains (pseudosables) en dessous d'un fragment de coquille (entre 4 et 4,5 m)

- **Niveau 6:** Situé à partir de 1,5 m dans les profils 2 et 3; profondeur correspondant à une structure massive à pseudosable; il comporte une microstructure grenue, nette, avec une distribution relative g/f porphyrique à double espacement. C'est un niveau moyennement poreux: vides d'entassement et chenaux uniquement. On observe des lentilles de gypse isolées ou en amas à partir de 2,5 m de profondeur dans le profil-3. D'ailleurs, le gypse est même observable macroscopiquement sous forme de microrosettes.

**Tableau 2. Correspondance entre les observations macro et microscopiques
Profil-3.**

MACROSCOPIE	Limites des horizons (cm)		MICROSCOPIE
-couleur beige jaunâtre. -vides nombreux. -structure polyédrique peu nette.	0		-microstructure cavitaire avec quelques fissures et peu de chenaux, localement grumeleuse. -taches et nodules: sables fins communs. - argile brune.
		20	
-même chose sauf structure polyédrique nette.	25		-même chose, sauf moins de cavités et de fissures.
-vides peu nombreux. -nodules calcaires (10%). - taches calcaires (5%). -structure prismatique très nette.	60		
		80	-microstructure tubulaire avec quelques fissures, chenaux et cavités. -taches et nodules occasionnels.
		100	-microstructure: même chose mais localement grenue.
-vides nombreux. -nombreux chenaux. -couleur plus jaunâtre -structure massive (pseudo-sables). -micro-rosette gypseuses vers 280 cm.	130	150	-microstructure grenue peu nette avec des fissures, des chenaux et des cavités. -vides d'entassement.
		200	-microstructure grenue nette. -taches et nodules calcaires: peu communs
		250	-microstructure grenue très nette. -cavités et fissures occasionnelles.
	450	450	-amas de gypse lenticulaire.

SW

NE

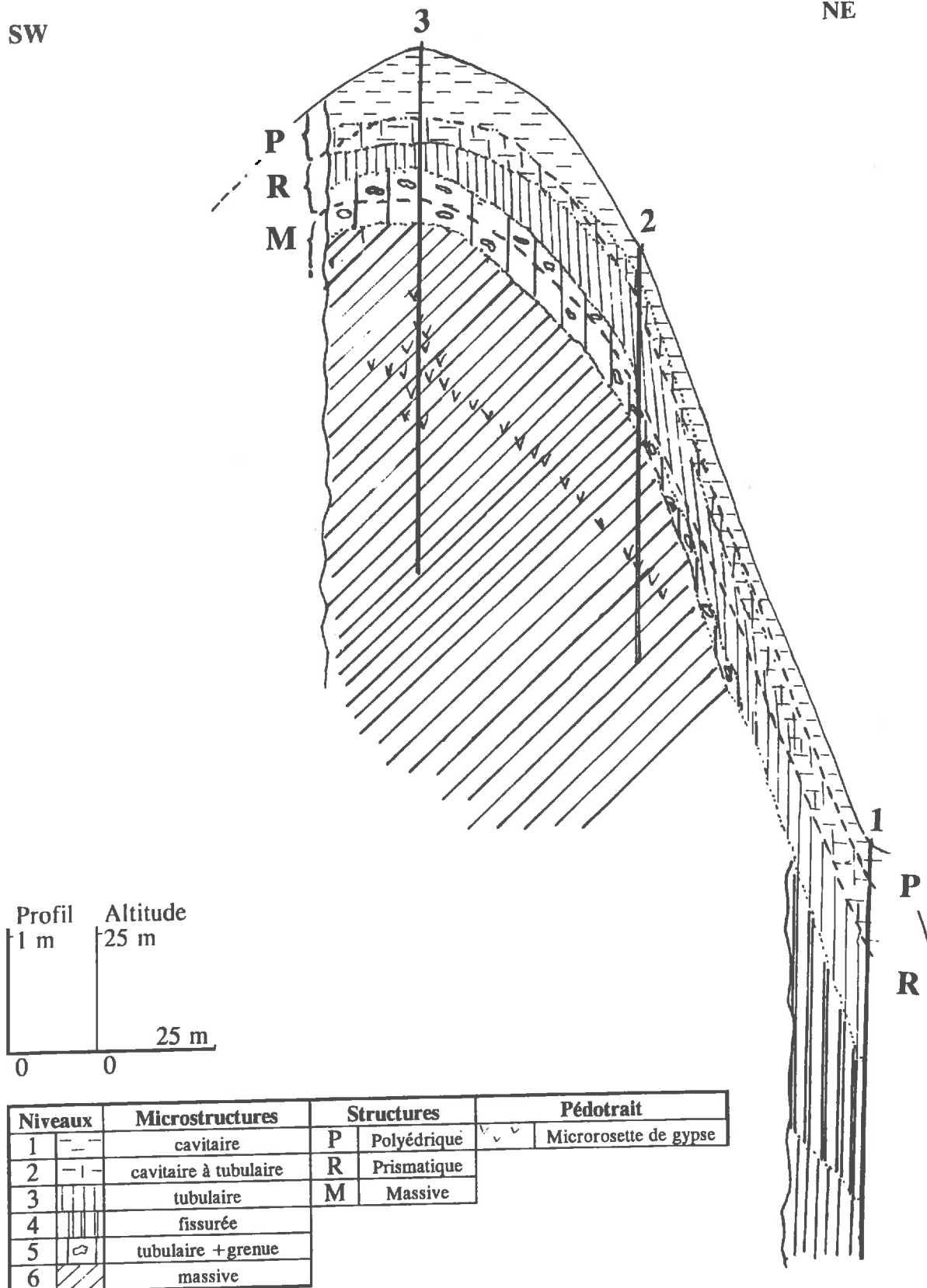


Figure 13. Niveaux micromorphologiques de la lunette.

II.5. Conclusion

La démarche morphologique appliquée aux différentes échelles, depuis les observations de lames minces jusqu'aux observations de macroarrangements sur le terrain, nous permet de faire deux remarques importantes (Hachicha et al, 1987):

- L'une d'ordre génétique concernant l'origine du matériau constituant l'assise du sol.
- l'autre d'ordre fonctionnel concernant l'organisation du système poral et son effet sur la circulation de l'eau et de solutés.

1) La couleur de la micromasse est plus brunâtre pour certains agrégats dans le niveau à microstructure grenue; ces agrégats de pseudosable appartiennent à la même fraction granulométrique. Par ailleurs des débris de coquillage de formes très diverses, mais généralement allongées, s'intercalent entre les agrégats et semblent garder leur position depuis leur dépôt.

2) Les vides inter-arrangements sont occupés par un système poral ainsi caractérisé:

- En surface, la porosité est assez importante et forme des cavités, fissures et chenaux. C'est le niveau le plus poreux de tout le profil, où la circulation des solutions est la plus favorisée.

- Ces cavités et fissures diminuent de fréquence vers 1m de profondeur, ce qui se traduit par un milieu assez tassé, peu poreux, qui limite de ce fait la circulation des solutions en profondeur. Toutefois l'existence de fentes de retrait assez larges (10 cm environ) et qui se prolongent jusqu'à 1,5 à 2m, permet la circulation des eaux, essentiellement celle des premières pluies d'automne.

- A ce niveau prismatique, peu poreux, succède vers le bas et au sommet de la formation un niveau à structure massive et à microstructure grenue.

La porosité dans le niveau à microstructure grenue peu nette est constituée de cavités, fissures, chenaux et également de vides d'entassement intergranulaires. Mais en profondeur, cette microstructure grenue devient très nette, la porosité du milieu se limite aux vides d'entassement et aux chenaux de diamètre important. Ce niveau est légèrement moins poreux que celui qui le précède.

III. ETUDE DES CONSTITUANTS DES SOLS

Nous allons d'abord déterminer la granulométrie, ensuite la teneur en matière organique et en calcaire, enfin les types d'argiles et leur distribution dans l'espace.

III.1. Caractérisation granulométrique

Les profils s'appauvrissent légèrement en argile le long du premier mètre par rapport au reste du profil (Figure 14; résultats des analyses dans l'Annexe 2 a et b).

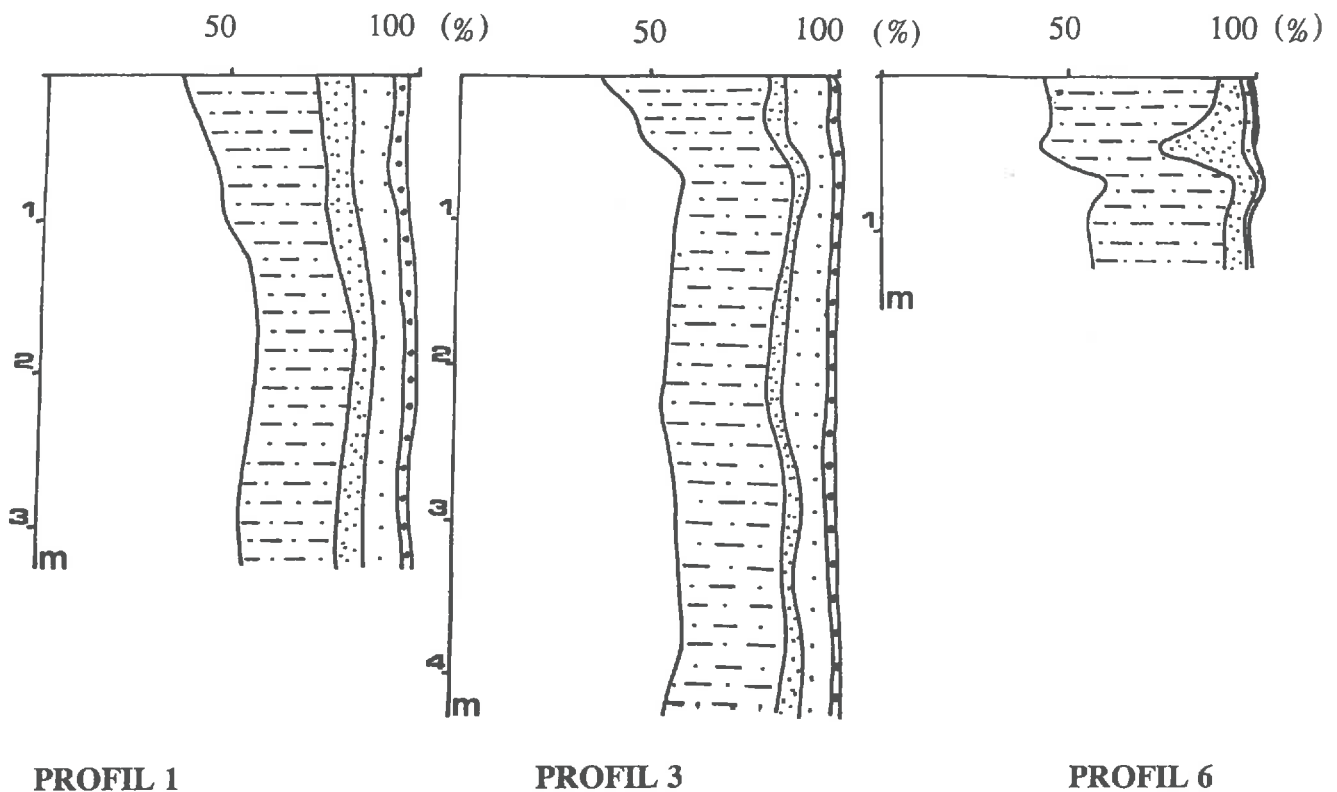


Figure 14. Composition granulométrique.

Le taux d'argile se stabilise plus ou moins au delà du premier mètre (Figure 15). Ce taux dépasse les 50 % dans les profils 1, 2, 3, 4 et 5. Dans le profil 6, il n'y a que peu de sable fin et très peu de sable grossier. Le matériau des profils est limono-argileux en surface et devient argileux en profondeur. Le premier mètre du sol a subi une légère variation dans sa

composition granulométrique par suite, probablement, d'un phénomène d'appauvrissement latéral. Cet appauvrissement est plus net dans les profils 1 et 2 situés sur le versant à pente raide ($>20\%$) que dans les profils 4 et 5 situés sur le versant à pente modérée d'environ 10% . Le profil-6 situé dans la plaine, a une composition granulométrique différente. La fraction sableuse est faiblement représentée en surface, et devient insignifiante en profondeur; il s'agit d'un matériau qui est exclusivement une argile limoneuse. Les courbes d'argile et de limon présentent des pics brusques. Ces variations traduisent l'origine alluvionnaire du sol. En résumé, le sol de cette colline a une texture limono-argileuse en surface et argileuse en profondeur ce qui correspond à la définition de Hills (1940 in Jauzein, 1967), "clay dune: dune argileuse". Et si l'horizon de surface semble avoir perdu une partie de ses éléments les plus fins, les couches profondes gardent leur composition originelle.

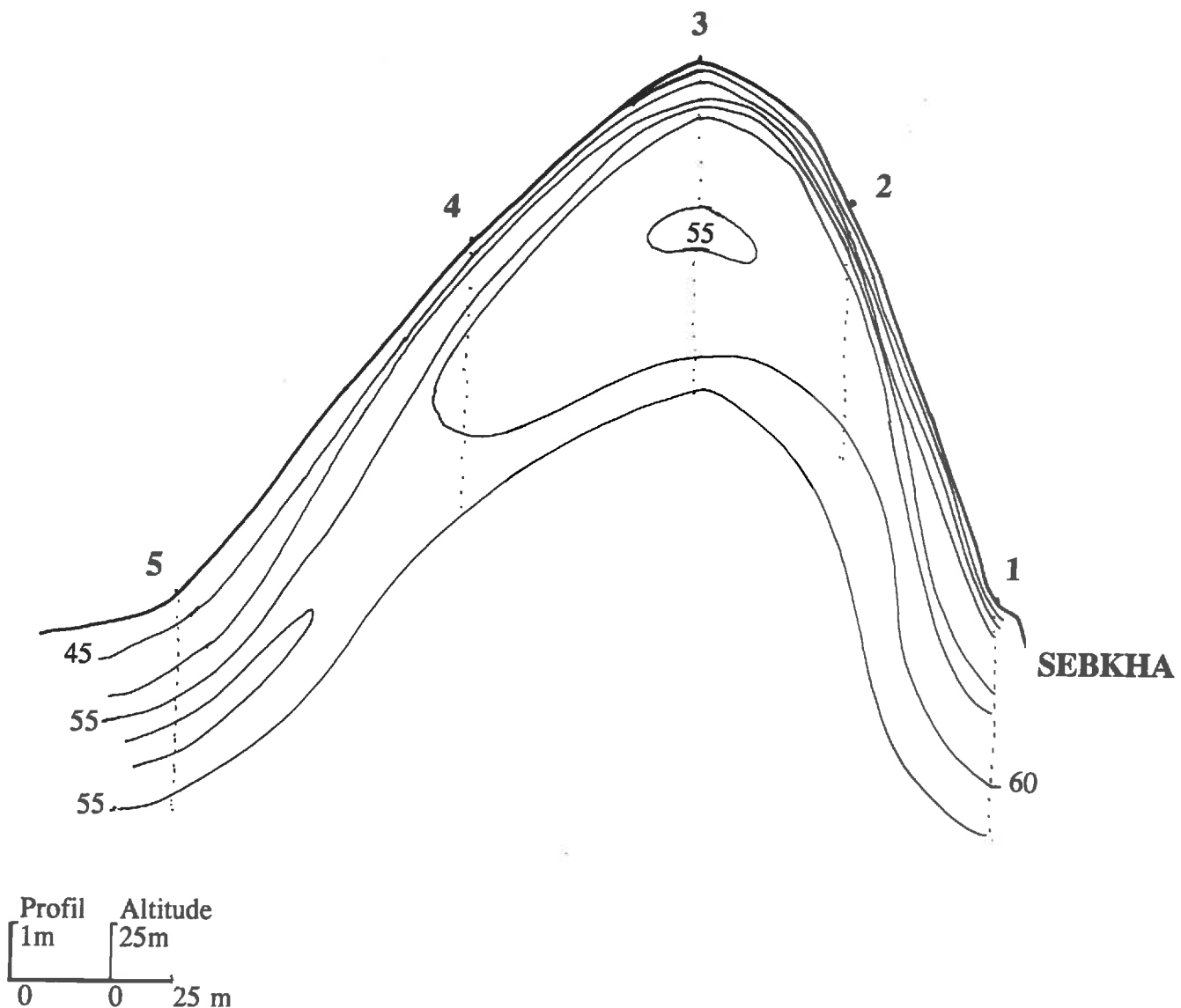


Figure 15. Courbes d'isovaleurs de la teneur en argile.

III.2. Matière organique, calcaire et gypse

La teneur en matière organique est voisine de 1 % en surface, 0,5 % à 80 cm et atteint une valeur très faible en profondeur ($< 0,1\%$).

Quant au calcaire total et actif, il faut noter tout d'abord la présence quasi-permanente des fragments de coquilles dans tous les profils. Les teneurs en calcaire total et actif sont assez constantes le long des profils des collines. Ces teneurs sont indépendantes des fractions granulométriques, et ne varient pas avec l'apparition à certaines profondeurs de taches et nodules calcaires. La teneur en calcaire total se situe aux environs de 30 %, alors que celle en calcaire actif est de 10 %.

Pour le gypse, il n'existe que sous forme de traces dans les profils 1 et 2. Cette teneur est de 0,3 % à 0,6 % dans les profils 4 et 5. C'est dans le profil-3 situé au sommet qu'on observe la plus nette variation de la teneur en gypse (Figure 16). Les observations de terrain permettent de voir le gypse sous forme de microrosettes très localisées dans les profils 2 et 3 à la profondeur de 2,80 m. L'apparition du gypse au sommet de la colline à une profondeur plus faible que latéralement proviendrait entre autres du décapage du sommet, des accumulations latérales et d'un bilan hydrique où l'infiltration est plus faible au sommet.

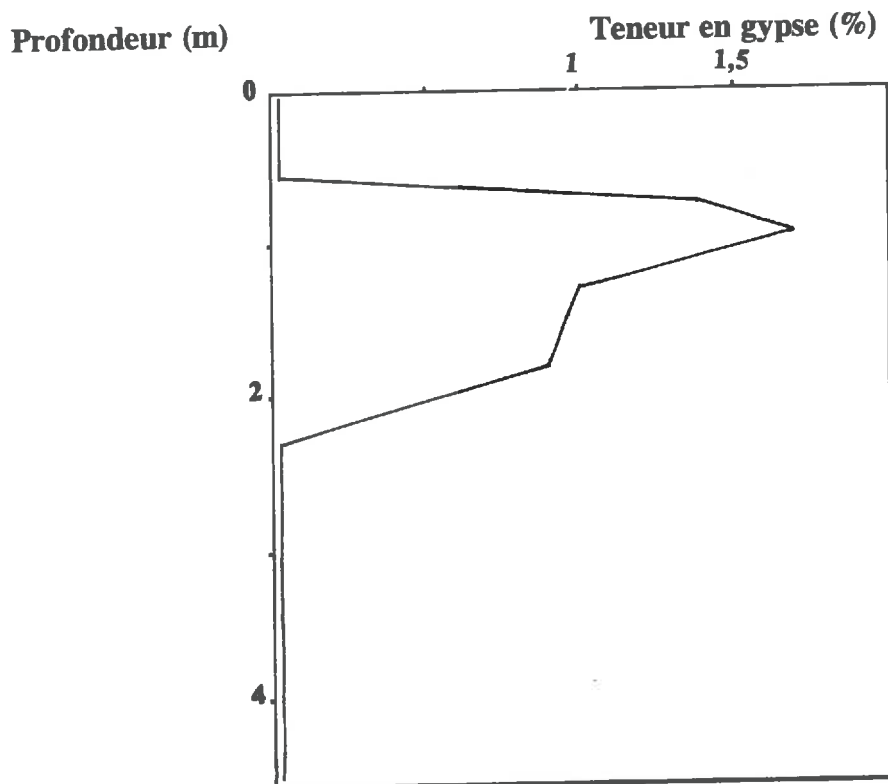


Figure 16. Variation de la teneur en gypse dans le Profil-3.

III.3. Caractérisation minéralogique

- Analyse par diffractométrie des rayons X:

Les analyses portent sur des échantillons répartis sur 3 profils. Les résultats obtenus sont consignés à la figure 17. Nous en tirons les conclusions suivantes:

- Profil-1 et Profil-3: Présence de kaolinite, illites-micas, chlorites et des interstratifiés irréguliers illites-smectites, smectites-vermiculites; nous observons les mêmes argiles en surface qu'en profondeur.

- Profil-6: Profil de la Basse Vallée; les argiles sont plutôt gonflantes: smectites, kaolinite, illites et chlorites.

D'après Claude et al.(1976), les alluvions déposées en 1973 sont constituées de montmorillonite (50 %), de kaolinite (30 à 40 %), d'illite (5 à 10 %) et de chlorite (5 à 10 %). Nous observons une grande similitude de nature des argiles dans les différents profils. On retrouve toujours de la kaolinite, les illites-micas, les chlorites et les interstratifiés irréguliers: illites-smectites, vermiculites-smectites.

La part importante tenue par les argiles gonflantes explique les caractères vertiques de ces sols.

- Les analyses thermiques (A.T.D. = Analyse thermique différentielle et A.T.G.= Analyse thermopondérale ou thermogravimétrie).

- A.T.D.:

Dans nos sols, nous avons toujours un premier pic endothermique à 102°C environ, qui correspond à la désorption de l'eau. Ce pic est plus net pour l'échantillon 3.1 (profil-3, entre 0 et 0,20 m) que pour les autres (Figure 18). On observe ensuite un deuxième pic endothermique, peu net à 307°C environ, puis un troisième pic endothermique assez net à 550°C environ, qui correspond à la déhydroxydation. La faible différence observée entre les courbes permet déjà de constater qu'il s'agit des mêmes argiles dans tous les profils. La courbe du profil-6 se détache légèrement des trois autres, bien que les pics soient moins exprimés que pour les autres profils. Nous pouvons noter une éventuelle différence, assez légère, entre les argiles du profil-6 et celles des autres profils (1, et 3). Quant à la nature de ces argiles, nous pouvons soupçonner la présence de la kaolinite, des chlorites, des illites-micas et des interstratifiés smectites-illites et smectites-vermiculites.

TRAITEMENTS

Mg^{++}

Mg^{++} + Ethyl-Glycol

K^{+}

350°C

550°C

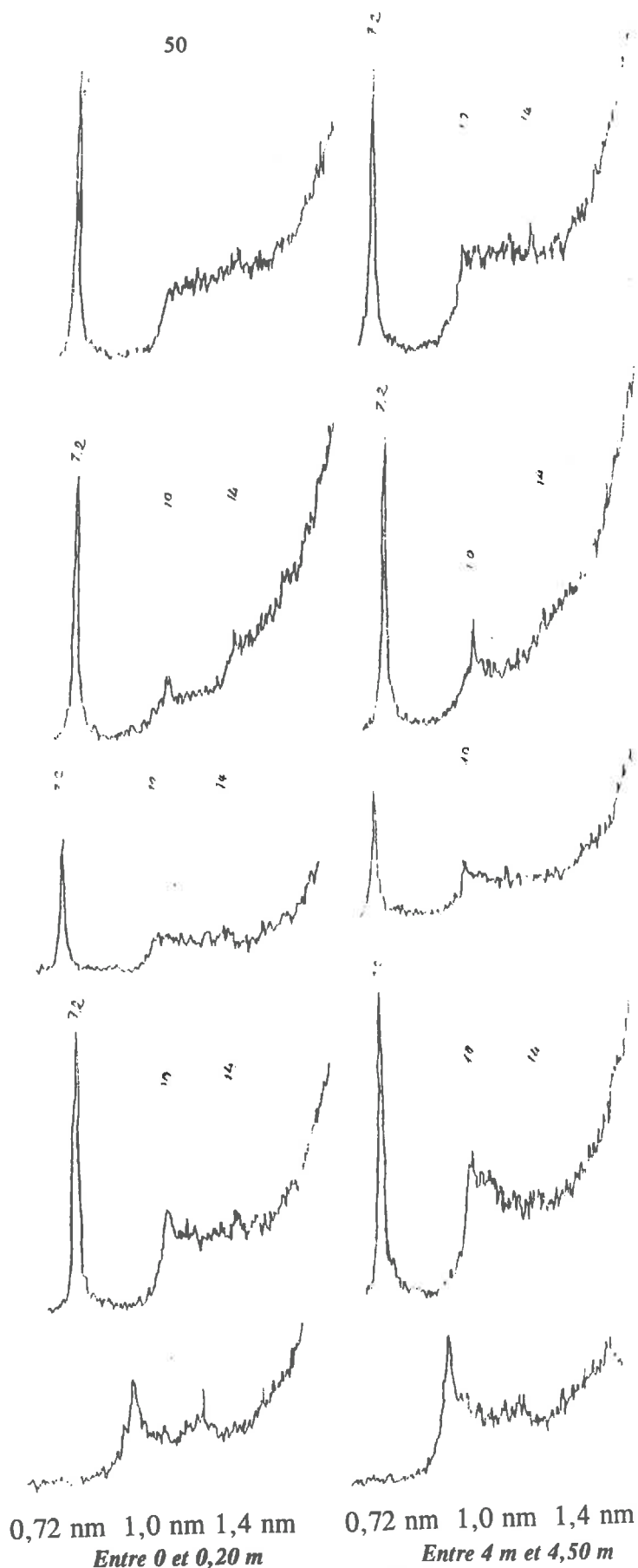
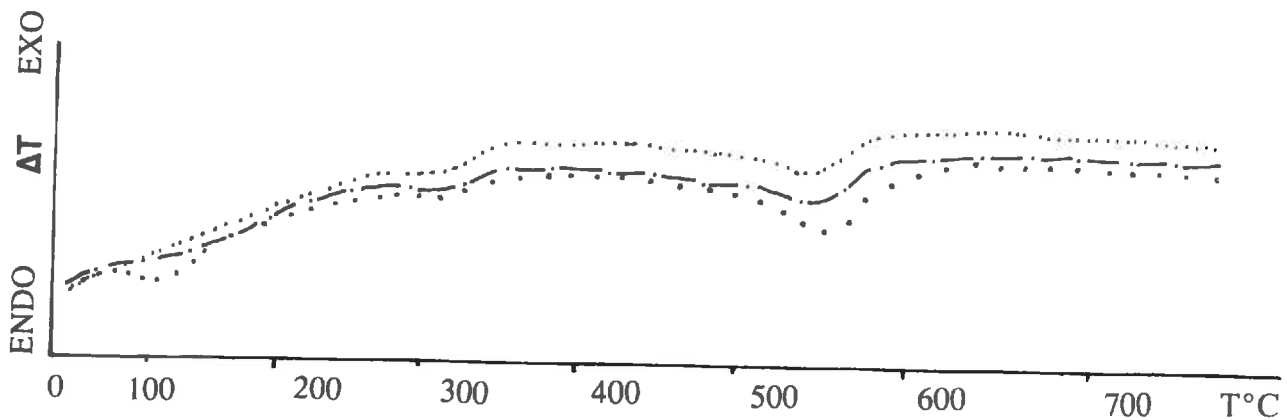


Figure 17. Analyse aux rayons X - Profil 3.

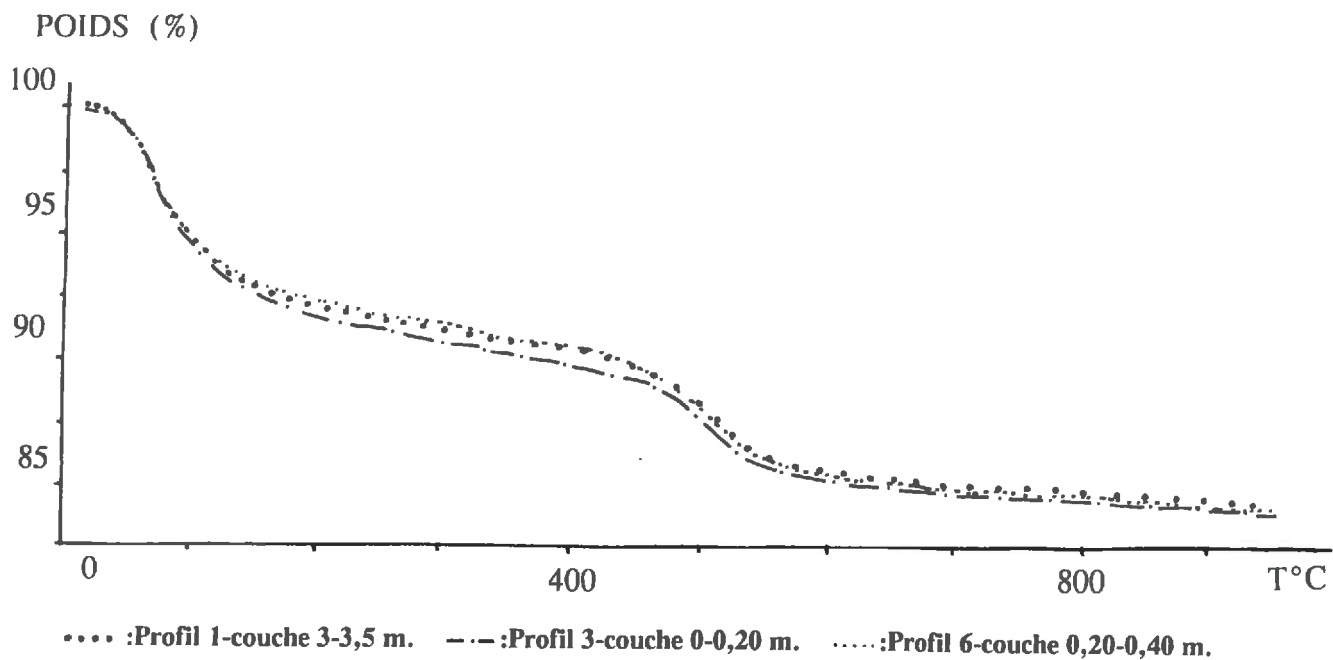


...:Profil 1-couche 3-3,5 m. -.-:Profil 3-couche 0-0,20 m.:Profil 6-couche 0,20-0,40 m.

Figure 18. Analyse thermodifférentielle (A.T.D.).

- A.T.G.:

Nous constatons aussi qu'il y a très peu de différence d'une courbe à une autre (Figure 19). La perte de poids est presque partout la même, 16 à 1% environ. Nous pouvons noter la présence des mêmes argiles dans les différents profils, avec une légère différence pour le profil-6. Ces argiles seront éventuellement identiques avec l'A.T.D.



...:Profil 1-couche 3-3,5 m. -.-:Profil 3-couche 0-0,20 m.:Profil 6-couche 0,20-0,40 m.

Figure 19. Analyse thermogravimétrique (A.T.G.).

- Analyse au microscope électronique à transmission (M.E.T.):

Les observations au M.E.T. ne montrent que quelques particules de kaolinite et probablement d'illites. On observe aussi des assemblages de particules floconneuses qui seraient des smectites.

Globalement, les 3 méthodes utilisées précédemment, en comparaison avec les résultats d'autres auteurs, nous amènent à conclure que les argiles dominantes sont héritées du matériau alluvionnaire initial comme cela a été décrit par Claude et al. (1976) et Belkhodja (1970).

III.4. Conclusion

Les différentes analyses convergent toutes vers une même conclusion selon laquelle le matériau qui forme cette colline est assez homogène. Des profils situés de part et d'autre du sommet présentent des résultats assez semblables. Cette ressemblance se constate aussi bien entre un profil et un autre qu'au sein d'un même profil et entre différentes profondeurs:

- Un matériau limono-argileux en surface et argileux en profondeur. Le sol ne semble avoir subi qu'un simple appauvrissement en argile du 1er mètre (pente d'environ 20%).
- Conservation du pseudosable au delà de 1 m dans les profils 2 et 3 situés au sommet de la colline.
- Une teneur en matière organique de 1 % en surface, qui devient très faible au delà de 1 m de profondeur.
- Une teneur constante en calcaire total de 30 %, et de 10 % en calcaire actif.
- Des argiles moyennement gonflantes: illites-micas, des interstratifiés irréguliers: illites-smectites, vermiculites-smectites et des argiles peu gonflantes: kaolinite.

IV. CARACTERISTIQUES PHYSICO-HYDRIQUES

IV.1. Densité apparente et porosité totale

La densité apparente déterminée par la méthode à la paraffine, est plus élevée en haut du profil 2 qu'à sa base contrairement aux profils 1 et 3 (Tableau 3). Cette différence pourrait être attribuée, d'une part au travail du sol et aux cultures céréalières pratiquées au sommet de la colline (profil 3) et d'autre part à une couverture plus dense du sol par des herbacées au niveau du profil 1. Au niveau de l'horizon de pseudosable, la densité est de 1,75. Les couches superficielles ont subi le plus de transformations physiques ce qui a abouti à la perte de l'organisation originelle caractéristique du pseudosable, et à la genèse d'une nouvelle structure peu poreuse.

Tableau 3. Densité apparente sur motte de 50 cm³ (Da) et porosité totale (P.T en %).
Moyenne de trois répétitions.

Couche (cm)	Profil-1		Profil-2		Profil-3	
	Da	P.T	Da	P.T	Da	P.T
0-20	1,79	33	2,00	25	1,84	31
20-40	1,90	28	2,05	23	1,81	32
40-60	2,06	22	1,96	26	1,86	30
60-80	2,01	24	2,01	24	1,84	31
80-100	1,94	27	1,97	26	1,76	34
100-150	1,94	27	1,91	28	1,83	31
150-200	1,96	26	1,71	36		
200-250	1,96	26	1,70	36		
250-300	2,05	23	1,70	36		
300-350	2,00	25	1,73	35		
350-400			1,84	31		
400-450			1,86	30		

IV.2. Caractéristiques hydriques

Les mesures ont été faites sur des échantillons à structure remaniée. Pour un même profil, il n'existe pas de différence notable entre les caractéristiques hydriques des différentes couches considérées (Tableau 4).

Tableau 4. Caractéristiques hydriques (Humidités pondérales en %).

Profil	Prof.(cm)	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-150	150-200	200-250	250-300	300-350	350-400	400-450
	pF												
1	1	46	48	46	47	46	47	48	46	45	44		
	1,7	37	35	35	35	34	37	38	36	35	34		
	2	34	33	32	32	30	30	29	30	31	31		
	2,8	27	24	25	25	26	27	26	27	27	27		
	4,2	19	18	18	18	18	19	20	19	19	18		
2	1	51	49	49	49	49	49	50	47	46	47		
	1,7	36	36	36	38	38	38	39	35	31	36		
	2	32	33	32	35	34	34	34	31	31	30		
	2,8	26	25	27	28	30	28	27	26	26	25		
	4,2	18	17	18	19	20	19	19	18	17	17		
3	1	46	44	50	50	48	48	48	52	48	48	47	51
	1,7	37	39	38	41	40	41	41	41	40	39	37	38
	2	30	30	32	30	32	32	31	31	32	31	29	29
	2,8	25	24	26	27	27	28	26	28	25	24	24	24
	4,2	17	17	18	18	18	18	18	18	16	17	16	16

IV.3. La stabilité structurale

Au niveau du profil-1, la stabilité structurale du sol déterminée par la méthode de Henin, est assez constante jusqu'à 1 m de profondeur (Tableau 5). Elle traduit un sol assez stable ($I_s=1,3$ en surface; $I_s=1,8$ à 1 m de profondeur). A partir de 1 m, la stabilité du sol diminue, le sol devient très instable, spécialement entre 3 m et 3,5 m ($I_s=63$). A ce niveau, nous rappelons que le Na/T atteint 22% alors qu'en surface, il est de l'ordre de 6% seulement.

Dans le profil-3, le sol est beaucoup plus instable particulièrement au delà de 80 cm où I_s atteint des valeurs de 32 et même 92 entre 2 m et 2,5 m. Curieusement, nous notons une chute de I_s vers 1 m de profondeur, alors que Na/T reste supérieur à 20%. Nous avons essayé d'établir une relation entre I_s et Na/T, la corrélation est:

$$I_s = 1,709 \cdot \text{Na/T} - 13,337 \quad n=14 \quad \text{et} \quad r = 0,915$$

La stabilité du sol est liée à son degré de sodisation. L'augmentation de la sodisation en profondeur s'accompagne d'une chute de la stabilité du sol, et aboutit à sa dégradation. Le sol qui conserve la structure de pseudosable, présente la stabilité structurale la plus faible ($I_s=92$).

Tableau 5. Indice d'instabilité structurale (I_s).

Prof. (cm)	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-150	150-200	200-250	250-300	300-350	350-400	400-450
Profil												
1	1,3	0,9	1,2	1,2	1,8	2,6	5,9	13,2	11,7	63,0		
3	1,9	1,8	2,9	7,2	31,6	59,3	65,2	92,0	67,0	38,5	11,8	7,5
6	1,6	1,9	2,8	3,4	2,5	3,9						

IV.4. Caractéristiques mécaniques des sols

On distingue trois états dans la consistance des argiles: les états liquide, plastique et solide. On utilise très généralement les limites définies par Atterberg (1912 in Costet et al., 1976) et précisées ensuite par Casagrande (1947 in Habib, 1973): **la limite de liquidité: W.L.**, elle sépare l'état liquide de l'état plastique; **la limite de plasticité: W.P.**, qui sépare l'état plastique de l'état solide et enfin **l'indice de plasticité: I.P.**, qui est la différence W.L.-W.P. W.L et W.P sont déterminées avec une erreur relative de 5% environ. Dans nos essais, la limite de liquidité provient d'une moyenne de 5 mesures pour 15, 20, 30 et 35 coups avec deux répétitions pour chaque essai (Tableau 6). L'interprétation des résultats obtenus par le recours au diagramme de Casagrande (1947 in Habib, 1973) permet de constater que les argiles qu'on rencontre dans ces sols sont peu à moyennement plastiques en général, mais très plastiques par endroits. Dans la plaine alluviale, il s'agit plutôt d'argiles très plastiques.

Tableau 6. Limites d'Atterberg.

Profil	Couche (cm)	W.L (%)	W.P (%)	I.P (%)
1	0-20	48	33	15
	300-350	48	31	17
3	0-20	50	29	22
	80-100	64	32	33
	400-450	51	26	24
6	0-20	57	29	28
	100-150	60	30	30

L'extensibilité linéaire (L.E.) est une variable utilisée pour caractériser les propriétés de gonflement et de rétraction (Grosmann, 1968). Elle est caractérisée par un coefficient (COLE; Greene-Kelly, 1974).

Par la méthode standard, la mesure du COLE est faite sur une motte de sol de 50 à 200 cm³ de volume: COLE_{STD}. Une nouvelle méthode de mesure du potentiel de gonflement et rétraction a été développée par Schafer et al. (1976) et Halleberg (1977); elle est valable aussi bien sur le terrain qu'au laboratoire. Cette nouvelle méthode de mesure: COLE_{ROD} consiste à la détermination des changements de longueurs de boudins de pâte de sol à des taux d'humidité sélectionnés. Le COLE_{ROD} est significativement corrélé au COLE_{STD}.

Les COLE_{STD} obtenus se situent à une valeur moyenne de 0,1 (Tableau 7). Ces valeurs portées sur la courbe établie par Franzmeier et al. (1968 in Schafer et al., 1976) permettent de situer le comportement des argiles de nos échantillons de sol. Les valeurs de COLE_{STD} enregistrées, comprises entre 0,079 et 0,119, se situent dans la zone des argiles de type montmorillonite et en bordure de la zone du mélange montmorillonite+kaolinite.

Tableau 7. Estimation de l'extensibilité linéaire.

Profil	couche(cm)	COLE _{ROD}	COLE _{STD}	P.V.C.	S.I.	Observations
1	0-20	0,17	0,11	6,5	5298	P.V.C. très critique = =
	80-100	0,19	0,12	7,1	5761	
	300-350	0,17	0,11	6,4	4954	
3	0-20	0,16	0,10	6,2	5113	P.V.C. très critique P.V.C critique =
	80-100	0,14	0,09	5,5	4557	
	400-450	0,13	0,09	5,2	4326	
6	0-20	0,17	0,11	6,6	5391	P.V.C. très critique =
	100-150	0,19	0,12	7,1	5807	

P.V.C.: Changement potentiel du volume (Potential Volume Change).

P.V.C. = COLE_{STD}*60

S.I.: Indice de gonflement (Swell Index; pounds per square foot).

S.I. = 298 + 46300*COLE_{STD}

IV.5. Conclusion

La caractérisation physique de ces sols nous permet de noter en particulier:

- une densité apparente de motte assez élevée dans le premier mètre, plus faible dans les horizons à pseudosable et une porosité de motte faible et des caractéristiques hydriques assez constantes dans tout le profil, traduisant une rétention d'eau assez élevée.

- une instabilité structurale du sol très élevée. Cependant les horizons les plus évolués voient leur structure devenir relativement plus stable. Cette instabilité est héritée du matériau originel puisque l'instabilité structurale élevée est celle du pseudosable et un comportement mécanique assez constant depuis le matériau originel jusqu'à la surface, traduisant un matériau assez gonflant. Cette instabilité est hautement corrélée au degré de sodisation du complexe d'échange.

En définitive, les horizons superficiels des sols ont subi une évolution physique par rapport au matériau originel, par une certaine stabilisation de la structure, un accroissement de la densité apparente dû à une diminution des vides inter-agrégats. Ces résultats concordent avec ceux déjà exposés précédemment.

Chapitre II

CARACTERISATION

ET EVOLUTION GEOCHIMIQUE

DES SOLS DE LA LUNETTE

Nous abordons dans ce chapitre, l'évolution géochimique des sols de la lunette. Nous procéderons dans une première phase, selon les mêmes transects choisis, à la caractérisation géochimique des sols, puis nous essayons de mettre en évidence les caractères d'évolution liés à leur désalinisation/désodisation.

I. CARACTERISATION GEOCHIMIQUE

I.1. pH et profils de salinité

Les mesures de pH sont faites sur des suspensions sol/eau=2,5. Les pH lus varient entre 7,7 et 8,8, les plus élevés se localisent généralement en profondeur. Ils peuvent être liés au phénomène de sodisation. Pour l'étude de la dynamique des éléments en solution, nous avons utilisé la conductivité électrique (CEe) de la solution provenant de l'extrait de pâte saturée et le SAR, exprimé en molalité et en activité. La distribution verticale et latérale de la CEe est représentée par la figure 21 (Résultats des analyses en Annexe 3a et b).

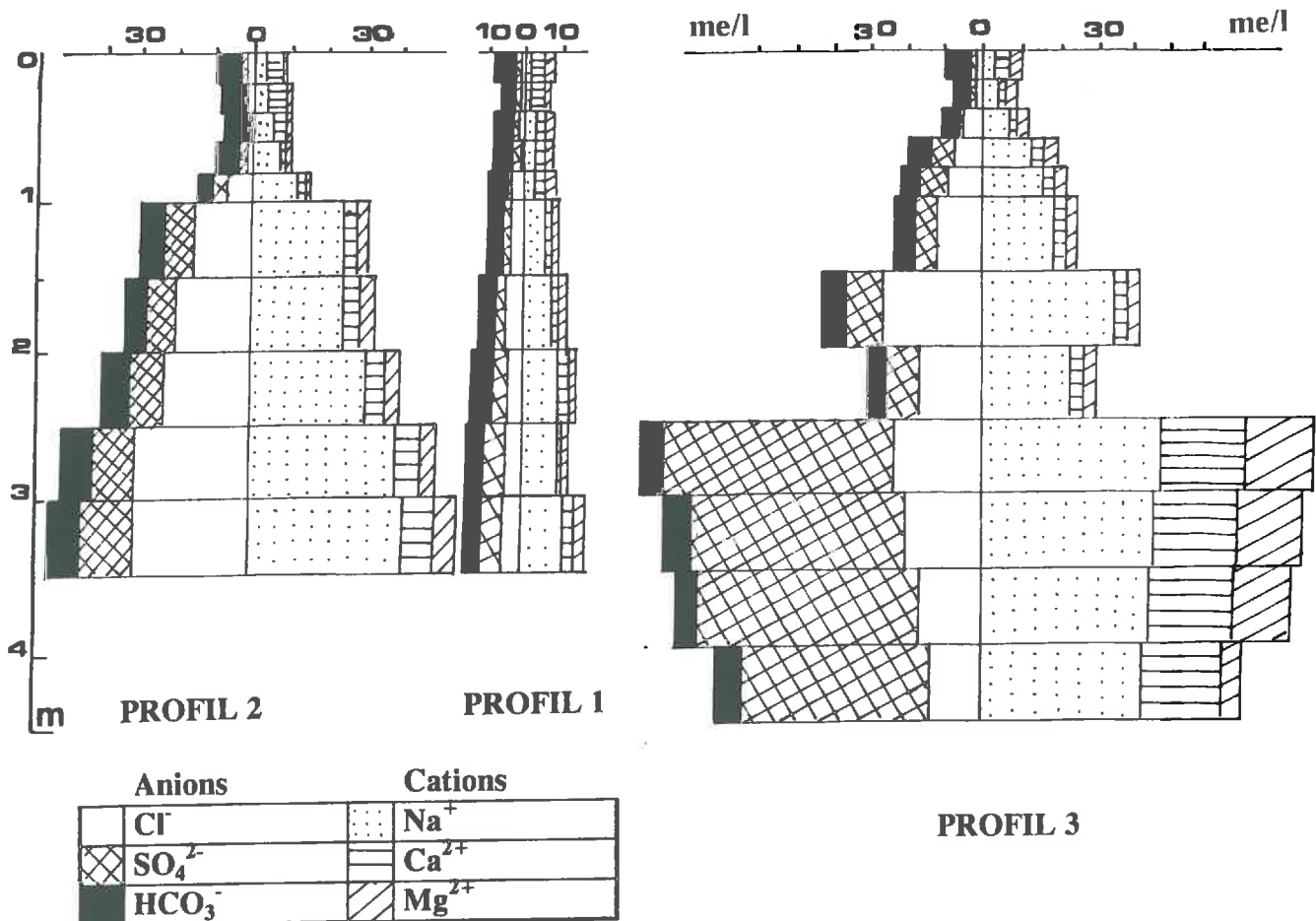


Figure 20. Composition cationique et anionique-Profils 1, 2 et 3.

Tous les profils sont du type descendant, c'est-à-dire qu'il y a lixiviation en surface au bénéfice d'une accumulation en profondeur. Toutefois ce gradient ne se manifeste pas avec la même intensité d'un profil à un autre. Dans les profils situés au sommet subissant uniquement les effets de l'infiltration, les accumulations sont encore importantes (7 dS/m) par contre dans les profils situés en bas de pente, subissant l'effet non seulement des eaux d'infiltration, mais également celui du transfert hypodermique latéral, les accumulations sont moins importantes ($CEe < 2$ dS/m). Les profils de la CEe et du SAR dans le profil-3 (Figure 21) appellent la remarque suivante: entre 2,5 m et 4,5 m, nous observons un accroissement brutal de la CEe qui atteint 7,2 dS/m alors que le SAR reste voisin de 12, autrement dit, cet accroissement de la CEe n'est pas accompagné d'une élévation du SAR. En observant le profil des anions et des cations, nous constatons une élévation brutale des teneurs en Ca^{2+} et SO_4^{2-} . Cette anomalie apparente résulterait en fait de la dissolution du gypse dont l'évolution de sa concentration correspond justement à une évolution divergente de la CEe et du SAR.

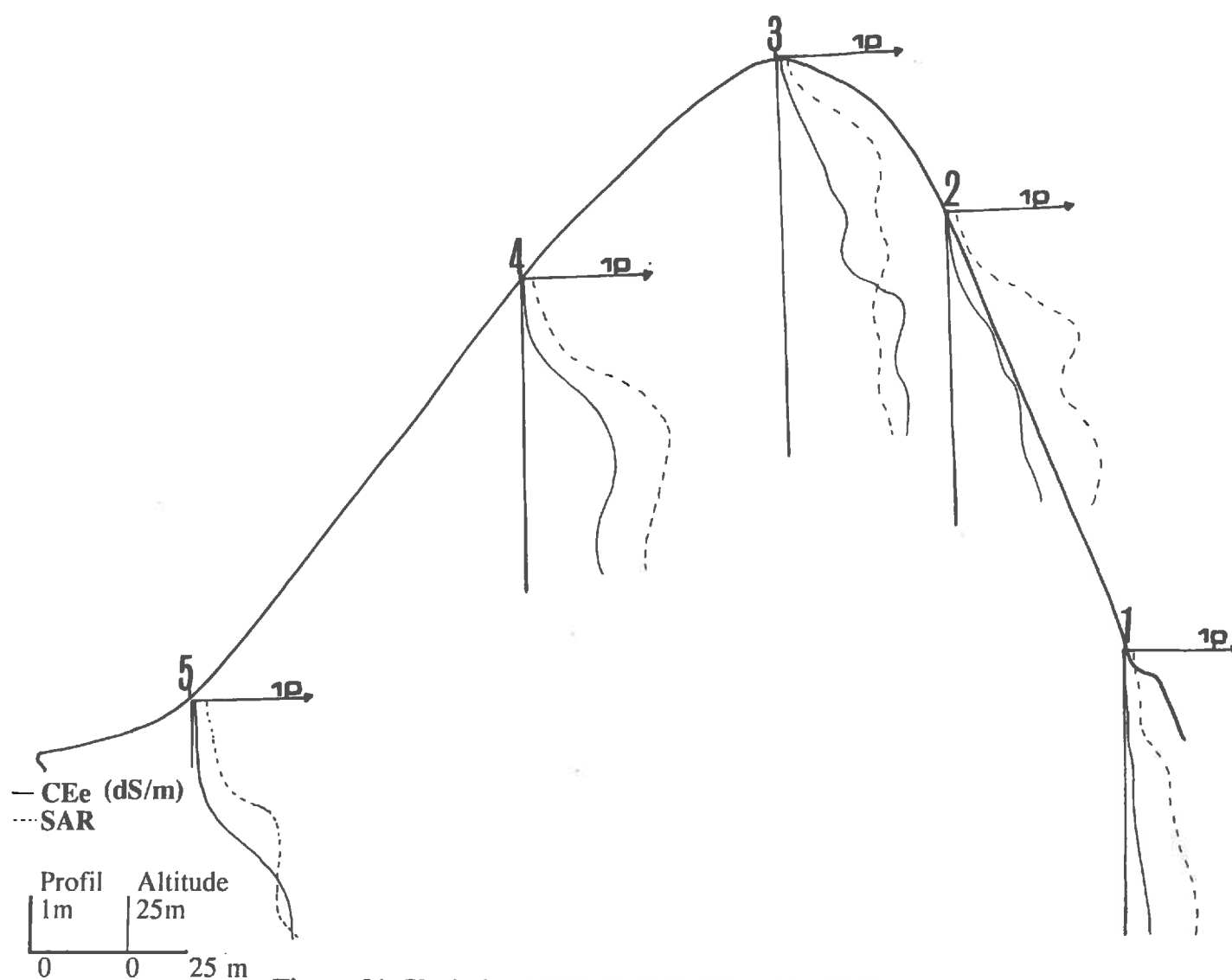


Figure 21. Variation verticale de la CEe et du SAR.

L'évolution latérale de la désalinisation (Figure 22) montre que l'horizon dessalé augmente d'épaisseur en allant du sommet des lunettes vers les piémonts. Les résultats concernant la concentration des solutions du sol mettent en évidence une relation entre la CEE (extrait saturé) et la force ionique I (Garrels et al., 1967). La corrélation entre CEE et I calculée pour les solutions des différents profils est: $I=0,0136*CEE-0,0014$, $r=0,976$.

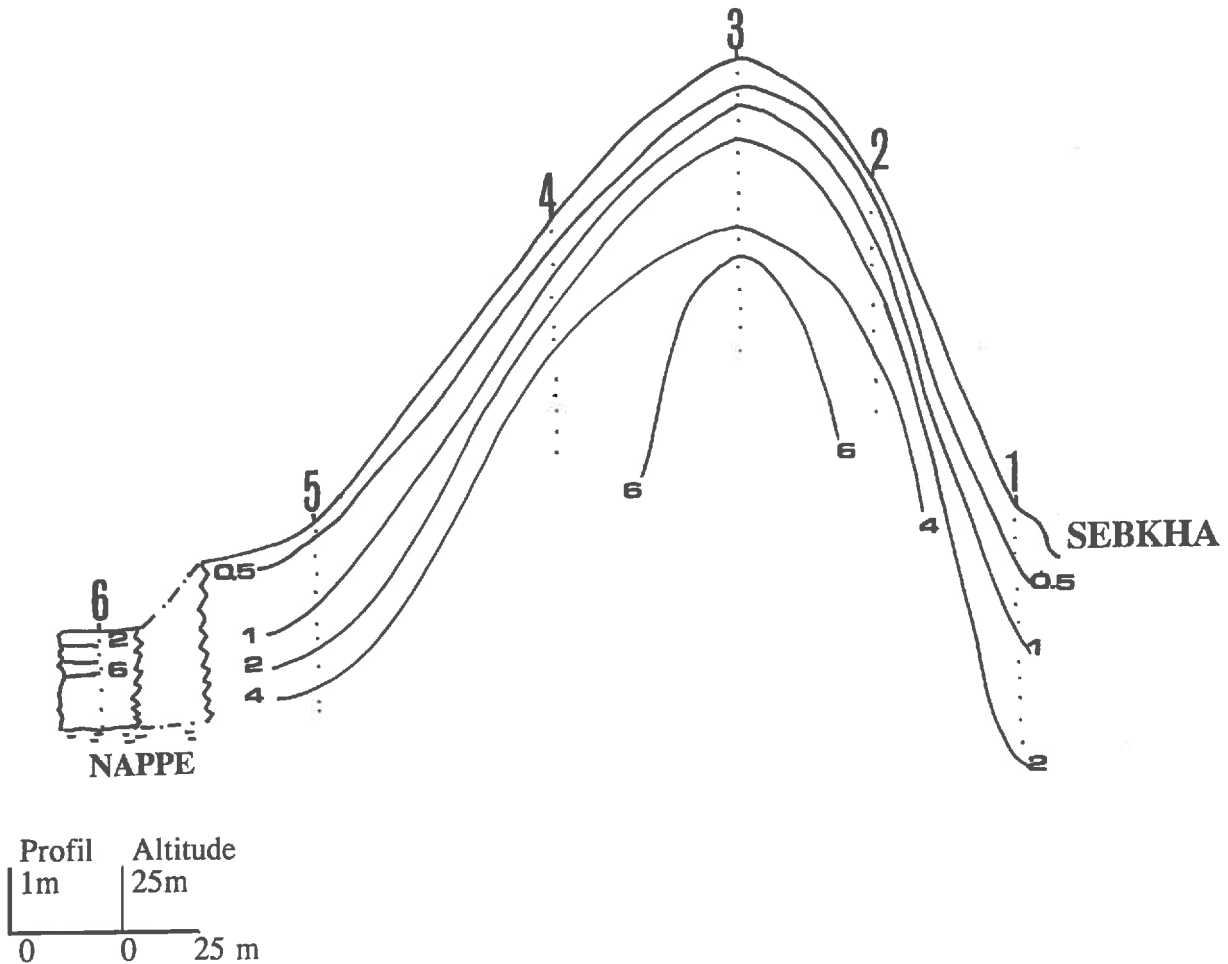


Figure 22. Evolution latérale de la désalinisation
(isovaleurs: 0,5; 1; 2; 4 et 6 dS/m).

I.2. Les bases échangeables et la capacité d'échange cationique (CEC = T)

Dans l'ensemble, la CEC. (CEC=T; méthode à l'acétate d'ammonium à pH 7) est comprise entre 15 et 25 méq/100 g de sol (Tableau 8). Parmi les bases échangeables, le magnésium (15 à 25%) et le potassium (3 à 8%) présentent des taux assez constants le long des profils, alors que le calcium qui forme 50 à 77% des bases échangeables, en surface, chute en profondeur (37%), ceci au profit du sodium ($Na/T = 6$ à 15% en surface, et 37% en profondeur).

Tableau 8. Complexe absorbant.

Profil	1		6		3		
Couche(cm)	0-20	250-300	20-40	100-150	40-60	100-120	300-350
Cations(mé/100 g)							
Ca ²⁺	15,9	8,0	9,0	11,4	8,6	7,3	9,6
Mg ²⁺	3,9	4,8	4,8	3,9	8,3	4,7	3,8
K ⁺	1,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,8	1,3
Na ⁺	1,4	3,7	4,1	5,8	3,2	7,3	4,6
T	22,5	16,9	18,4	21,2	20,7	20,1	19,3
Na/T (%)	6,0	21,7	22,3	25,1	15,7	36,4	23,7

II. EVOLUTION GEOCHIMIQUE

II.1. Evolution dans l'espace des faciès géochimiques

Dans les profils 1, 2, 3, 4, et 5:

- la composition cationique: il n'y a pas de cation dominant en surface (sauf dans le profil-2 où Ca domine légèrement). Vers 1 m de profondeur, le sodium devient la cation dominant.
- la composition anionique: elle est à bicarbonate dominant en surface, et à chlorure dominant en profondeur. Dans le profil-3, elle devient à sulfate dominant.
- Le faciès des solutions de sol est bicarbonaté calcique et magnésique en surface, il devient chloruré-sulfaté sodique en profondeur.

Dans le profil-6:

- la composition cationique: elle est à sodium dominant sauf en surface (0,20 cm) où il n'y a pas de cation dominant.
- la composition anionique: elle est toujours à chlorure dominant, bien que le sulfate augmente en profondeur.
- Le faciès des solutions de sol est chloruré-sulfaté calcique et magnésique entre 0 et 20 cm. Il est chloruré sodique et sulfaté sodique au delà de 20 cm.
- L'augmentation de la conductivité électrique en profondeur est due à un accroissement de la teneur en ion Cl⁻, Na⁺ et SO₄²⁻; cela est valable dans l'ensemble des profils.

Les solutions du sol sont d'autant plus chlorurées sulfatées sodiques qu'elles proviennent des niveaux profonds du sommet de la formation. Dans ces sols, le matériau originel très salé et très sodique, a subi parallèlement, mais avec des intensités différentes, deux processus d'évolution:

- une désalinisation qui s'est concrétisée par l'élimination des chlorures, puis à un degré moindre des sulfates. Ce processus a concerné des épaisseurs variables en fonction du profil.

- une désodisation qui s'est traduite par une élimination d'une partie du sodium échangeable et son remplacement par le calcium. Mais ce processus, plus lent que la désalinisation, a agi superficiellement. En tout les cas, le seuil critique de $\text{Na}/\text{T} = 15\%$ se rencontre dans la plupart des profils vers 1 m de profondeur, alors que la valeur critique de salinisation s'observe à des profondeurs variables avec les sites (comme dit précédemment), mais en tous les cas à plus de 2 m.

Si nous admettons sur la base des observations de Belkhodja (1970), que le matériau originel possède une $\text{CEe} > 40 \text{ dS/m}$ et un $\text{Na}/\text{T} > 50\%$, nous pouvons considérer que les sols ont subi, depuis leur dépôt, une évolution relativement importante par désalinisation et désodisation. Ces deux phénomènes ont affecté une épaisseur plus ou moins importante suivant les sites.

II.2. Les eaux de la nappe et de la Sebkha

A la base des profils 5 et 6, nous observons les eaux d'une nappe. Les analyses de ces eaux (N.5 et N.6) ainsi que celles de la Sebkha où nous avons effectué deux prélèvements espacés de deux mois (Tableau 9). Ces eaux assez chargées ont une composition cationique à sodium dominant et une composition anionique à chlorure dominant. Ces solutions ont de ce fait un faciès géochimique chloruré sodique, moins poussé pour les eaux de nappe.

Tableau 9. Analyses des eaux de la nappe et de la Sebkha.

Eau	Sebkha		Nappe	
			Profil 5	Profil 6
Date	27/12/83	23/2/83	27/12/83	27/12/83
Résidu sec (g/l)	65	54	11	19
CE (dS/m)	82,5	77,1	15,4	27,0
pH	7,6	7,3	7,9	7,8
SAR	130	131	17,9	36,7
CO_3^{2-} (me/l)	0	0	0	0
HCO_3^- (me/l)	7	6	6	6
SO_4^{2-} (me/l)	104,3	94,9	49,6	49,2
Cl^- (me/l)	1320	1030	110	220
Somme anions	1431,8	1130,9	165,6	275,2
Ca^{2+} (me/l)	40,0	35,2	20,1	29,7
Mg^{2+} (me/l)	130,5	81,3	42,6	29,8
Na^+ (me/l)	1200	1000	100	200
K^+ (me/l)	2,3	1,9	0,1	2,5
Somme cations	1372,8	1117,4	162,8	260,5

En drainant les sols des collines, les eaux se trouvent réunies dans cette Sebkha. Ces eaux entraînent avec elles les sels les plus solubles à savoir les chlorures et les sulfates qui précipitent en été formant une couche épaisse de 2 cm, voire plus par endroits.

II.3. Etat de saturation des solutions du sol

Cet état est apprécié par la règle de T (Al Droubi, 1976; Tardy et Gac, 1979 et Bahri, 1982).

- **vis-à-vis de la calcite et de la magnésite:** Les solutions du sol sont toutes saturées vis-à-vis de la calcite, et contiennent plus de (Ca^{2+}) que de (CO_3^{2-}) . Pour un même profil, les points représentant les différentes solutions s'ordonnent dans un nuage plus ou moins allongé (Hachicha, 1985), parallèle à la droite d'équilibre de la calcite. Les solutions provenant des niveaux profonds sont plus riches en (Ca^{2+}) . Par ailleurs, cette richesse est moins prononcée en allant du sommet (Profil-3) vers le bas (Profil-2) ou encore vers le bas de pente (Profil-1). Vis-à-vis de la magnésite, les solutions de sol ne sont pas toutes saturées.

- **vis-à-vis du gypse:** Les solutions du sol sont dans leur ensemble sous-saturées vis-à-vis du gypse, sauf quelques solutions des profils 3 et 6. Les solutions d'un même profil se caractérisent par un gradient croissant des sulfates (SO_4^{2-}) en allant vers la base du profil. Parallèlement à cela, les solutions d'une couche donnée du sommet de la formation sont plus riches en (SO_4^{2-}) que celles provenant d'une couche équivalente de zones situées plus bas.

II.4. Conclusion

La géochimie des solutions des sols, des eaux de nappes et de la Sebkha permet de constater que cette formation est affectée par deux processus géochimiques, une désalinisation assez poussée dans l'ensemble, mais variable en fonction du site et une faible désodisation, plus superficielle chez tous les profils, mais d'intensité variable. Le matériau originel a donc évolué par désalinisation rapide et par désodisation plus lente. Le complexe d'échange, saturé en profondeur par le sodium, est de plus en plus désodisé en surface où il est remplacé par le calcium. Les faciès des solutions, bicarbonaté-calcique et magnésique en surface, était auparavant chloruré-sulfaté sodique, caractéristique encore observable en profondeur. Actuellement les solutions de ces sols sont saturées vis-à-vis de la calcite, de la magnésite, et par endroits vis-à-vis du gypse. Cependant, la pédogenèse a bien sûr été largement influencée par la position du profil dans le paysage. Du fait que la désalinisation se limite à la lixiviation des sels solubles, elle est évidemment plus rapide que la désodisation. En conséquence, il n'est pas étonnant que la profondeur atteinte par la désalinisation soit plus élevée que celle touchée par la désodisation. La Sebkha a un faciès géochimique inverse de celui des sols, ce qui signifie que les sels qui sont perdus par les sols de la lunette se retrouvent dans la Sebkha. Malheureusement, ce niveau de base est ouvert vers la Mejerda, sans quoi il aurait été aisé de faire son bilan salin. Enfin, la variabilité latérale des modalités de la désalinisation coïncide à la variabilité latérale morphologique. La réorganisation du pseudosable depuis la surface du sol a eu lieu suite à une désodisation et un lessivage des sels qui cimentaient les particules argileuses.

DISCUSSION ET CONCLUSION

Nous avons mené cette étude sur une séquence de profils développés sur le même matériau, choisis en des lieux topographiques bien déterminés, et opté pour recourir à différentes méthodes d'observations et d'analyses, afin d'élucider les mécanismes d'évolution du matériau salsodique originel, à différents niveaux d'organisations: structure microscopique, organisation verticale du profil et développement latéral de la couverture pédologique.

L'origine éolienne du matériau est confirmée. Nous avons, en effet, retrouvé à la base de certains profils le pseudosable ayant conservé plus ou moins ses caractères originels d'organisation et même de composition. Le pseudosable se présente encore à l'état macroscopique sous forme d'horizon de texture "sableuse" et de structure massive. Au microscope optique, il se présente sous forme d'agrégats subarrondis, de dimensions assez homogènes, entassés, ménageant une microporosité assez développée qui se traduit par une densité apparente de motte relativement faible. Ce matériau de pseudosable, de nature argilo-limoneuse est constitué d'interstratifiés irréguliers smectites-illites, smectites-vermiculites, illites-micas, kaolinite et chlorites. A l'origine, il était très salé et très sodique. D'ailleurs, il conserve partiellement ces caractères. Il présente de ce fait un complexe d'échange dominé par le sodium, et un faciès géochimique chloruré, sulfaté sodique. Ce matériau salsodique possède une instabilité structurale très élevée.

Actuellement, le passage de ce matériau originel aux horizons du sol sus-jacent se réalise par une perte progressive des caractères originels et l'apparition de nouveaux caractères d'organisation, de composition et de comportement physique. Les principaux traits d'évolution du matériau originel sont:

- Caractères nouveaux d'organisation:

A l'échelle macroscopique, la structure massive du pseudosable cède la place d'abord à une structure prismatique grossière, puis vers les horizons superficiels à une structure polyédrique, puis moyenne à fine. A l'échelle microscopique, l'espace poral d'entassement qui caractérise le pseudosable, disparaît et cède la place à une microstructure tubulaire, cavitaire ou fissurée, qui se traduit par un accroissement de la densité apparente des mottes, signifiant par là une réduction de la porosité intra-pédique. Dans l'horizon de surface par contre et du fait du travail du sol, la porosité s'améliore un peu grâce à la fissuration de la microstructure. Parallèlement à cela, les agrégats du sol, très instables dans le matériau originel, voient leur stabilité s'améliorer considérablement vers la surface du sol. Ceci est attribué à une désodisation importante du complexe absorbant.

L'activité de la faune du sol a contribué considérablement dans ces nouveaux caractères d'organisation. La présence quasi-permanente des chenaux est le signe qui concrétise cette évolution.

- Caractères nouveaux de composition:

Le matériau originel, homogène dans son ensemble, a subi des transformations physico-chimiques importantes. Le processus primordial qui l'affecte est la désalinisation. En particulier, le premier mètre de la surface est quasiment dessalé. Mais l'appauvrissement en sels solubles ne s'est pas réalisé avec la même intensité pour tous les sels. En effet, en fonction de leur solubilité et de leur mobilité, les trois principaux sels; carbonate de calcium, sulfate de calcium et chlorure de sodium, ont dans l'ordre, subi un transfert de plus en plus intense. Le carbonate de calcium très peu soluble, n'a subi qu'une faible redistribution dans l'horizon et le profil du calcaire est resté pratiquement constant sur toute la profondeur du sol. Le calcaire mis en solution précipite très rapidement près de l'aire de sa dissolution. Ceci se voit clairement sur les microzones de décalcitisation toujours associées à des cristaux de calcite secondaire, qui semblent remplir des chenaux avoisinant ces microzones. Cela se traduit macromorphologiquement par l'existence de taches et de nodules calcaires moyennement exprimés et peu fréquents dans la plupart des horizons. Quant au sulfate de calcium, il a subi déjà une importante lixiviation. Cependant, il n'a pas quitté entièrement le profil puisqu'on le voit précipiter à la base de ce dernier, où même il va se loger en microrosettes de gypse dans l'espace intergranulaire du pseudosable. Par contre le chlorure de sodium, le plus soluble, a subi une lixiviation très poussée. Cette discrimination entre les sels se répercute évidemment sur le faciès géochimique des solutions du sol des différents horizons et leur saturation vis-à-vis de la calcite et du gypse, et sur la garniture cationique du complexe absorbant. En général le faciès géochimique chloruré sodique du pseudosable passe à un faciès chloruré sulfaté sodique dans les horizons intermédiaires, puis à carbonaté calcique et magnésique en surface. Le complexe absorbant, originellement très sodique ($Na/T > 50\%$), a subi dans le premier mètre une désodisation assez poussée puisque Na/T chute à 36%. Cette évolution est concrétisée par un déplacement du sodium par le calcium, (alors que Ca/T est de 36% en profondeur, il remonte en surface à 76%). Le magnésium et le potassium varient assez peu. Cette désodisation ne manque pas d'avoir des répercussions sur la stabilité structurale, comme nous l'avons déjà mentionné.

Sur un autre plan, il est important de noter l'enrichissement des couches superficielles en matière organique, où dans les 60 premiers centimètres la teneur en carbone organique ne se trouve qu'à l'état de traces. Il va de soi que cet enrichissement en matière organique contribue d'une part à l'amélioration de la structure et d'autre part à la différenciation des couches superficielles du reste du profil par une couleur légèrement plus foncée.

- Caractères nouveaux du comportement physique:

Le changement fondamental de propriétés physiques qui commandent le comportement mécanique du sol réside dans l'amélioration considérable de la stabilité structurale (Cf. plus haut). Ceci devrait se traduire par des changements du comportement hydrodynamique des couches superficielles du sol. D'un autre côté, les divers tests de mécanique des sols que nous avons réalisés ne nous ont pas permis de mettre en évidence des différences notables entre le comportement du matériau originel et celui des horizons pédologiques.

L'évolution spatiale du matériau originel:

La colline Koudiat Mabtouha fait partie d'un système de collines qui ont constitué la grande lunette bordant le Sud-Est de Garaât Mabtouha. Les changements de lit de la Mejerda au cours de l'histoire ont entraîné le morcellement de cette formation. Notre colline a subi depuis son installation une évolution morpho-pédologique qui s'est traduite par des différences notables entre les sites amont et aval. En effet, si les traits d'évolution sont communs à tous les profils de notre séquence, il n'en reste pas moins vrai que leur intensité varie selon la position topographique de chacun d'eux, et cela se répercute sur leur développement pédologique: épaisseur des horizons, profondeur du profil, présence ou non du matériau originel. Si nous comparons les divers profils, nous pouvons retenir en particulier que:

- Les profils situés au piémont de la colline sont plus profonds, beaucoup plus dessalés et plus désodisés que ceux du sommet.

- Le matériau originel n'apparaît qu'à la base du profil du sommet de la colline.

Nous attribuons ces différences à deux causes essentielles liées toutes deux à la dynamique de l'eau pluviale:

- L'érosion du sommet de la colline suivie d'un dépôt de terre dans le piémont. Ceci se traduit par le rajeunissement du profil amont (d'où apparition du matériau originel vers 1,50 m de profondeur seulement) et l'épaississement du profil aval.

- Des bilans hydrodynamiques variables avec l'emplacement des sites considérés par suite d'un fractionnement différent des paramètres de ce bilan (infiltration, ruissellement, drainage), cette dynamique étant commandée par la pente.

En définitive, l'étude du modèle d'évolution naturelle du matériau salsodique depuis son édification, nous a permis de montrer que malgré la texture fine, les caractères salsodiques originels fortement exprimés, ce matériau a subi des modifications suffisamment importantes pour en permettre l'exploitation agricole. La désalinisation est certes plus poussée que la désodisation. Cette dernière semble avoir porté seulement sur le premier mètre, mais surtout sur les 50 premiers centimètres, et cela suffit pour rendre ces sols cultivables. Les rendements en céréales pluviales y atteignent actuellement 20 à 30 quintaux/ha d'après les paysans de la région. Si nous pouvons seulement réaliser dans un laps de temps de quelques années ce que la nature a fait en quelques milliers d'années, nous pourrions prétendre alors que la récupération des sols salsodiques des bordures des sebkhas reste envisageable, puisque la bonification d'une tranche de sol de quelques dizaines de centimètres suffit pour améliorer considérablement sa productivité. C'est ce que nous nous proposons d'étudier dans la deuxième partie de ce travail.

Deuxième Partie

ORGANISATION, FONCTIONNEMENT

ET EVOLUTION DES SOLS

DU PERIMETRE IRRIGUE

DE KALAAT LANDELOUS

Chapitre I

L'ORGANISATION DES SOLS DU PERIMETRE IRRIGUE

Dans ce chapitre, nous allons identifier les caractères d'organisation des sols et la variabilité de ceux liés à la texture et à la salure.

I. METHODE D'ETUDE DES SOLS

I.1. Caractérisation des sols

La prospection de terrain a été menée entre 1989 et 1994. La variabilité des propriétés des sols a été étudiée à différentes échelles et à différents pas de mesure. Sur plus de 1400 ha et au niveau de 144 sites, des prélèvements de sols ont été effectués à 10, 50, 100, 150 et 200 cm selon une maille assez régulière d'environ 200 m x 280 m soit une borne d'irrigation sur deux. Cette analyse globale de la texture, nous a permis de distinguer des 'Unités Fonctionnelles Homogènes' définies sur la base de leur texture. Elle nous a aussi guidé dans le choix d'un premier transect T1 de 5200 m de longueur, le long duquel les propriétés physiques et hydriques ont été mesurées. Cette analyse a été affinée par des mesures plus rapprochées sur un segment de T1 appelé 'transect T2' ayant 500 m de longueur. Nous avons ainsi apprécié la variabilité des paramètres physiques à des pas de mesure de 200 m sur le transect T1 puis à des pas de 20 m sur le transect T2.

Après la caractérisation structurale et texturale des sols et la variabilité des paramètres d'organisation, nous avons procédé à la caractérisation de la salure des sols et de leur variabilité puis analysé la morphologie de sols stratifiés et sa conséquence sur la distribution des sels.

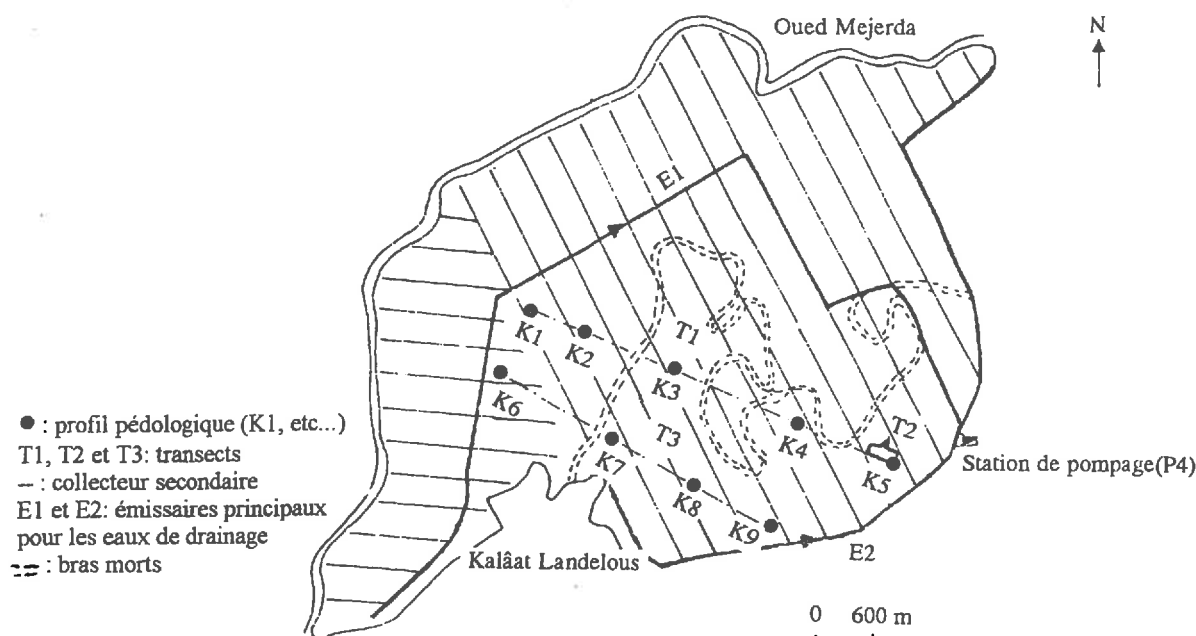


Figure 23. Secteur étudié dans le périmètre de Kalaât Landelous et les lieux d'échantillonnage du sol et des eaux de la nappe.

(Les lignes verticales et horizontales sont les collecteurs secondaires).

L'organisation des sols a été observée au niveau de 5 profils pédologiques situés sur le transect T1 et 4 profils situés sur le transect T3 (Figure 23). La salure des sols a été abordée sur l'ensemble du périmètre. Des déterminations minéralogiques et des observations micromorphologiques ont été effectuées pour une sélection d'échantillons.

I.2. Analyses des données

Les interprétations sont fondées sur les considérations suivantes:

1. pour définir la structure des variables, les traitements statistiques sont ceux qui permettent la description de la distribution des données (loi de distribution et moyenne), et leur dispersion (coefficient de variation), (Vauclin, 1982).

2. pour la structure spatiale des paramètres, nous avons employé la géostatistique. Les variables analysées sont considérées comme des variables régionalisées, c'est-à-dire qu'elles présentent simultanément un aspect aléatoire et un aspect structuré (Gascuel-Oudou et al., 1995). On cherche en premier lieu à caractériser cette structure spatiale en construisant les semi-variogrammes expérimentaux qui sont ensuite modélisés. Les cartes d'isovaleurs interpolées sont obtenues par un krigeage ordinaire (Gascuel-Oudou, 1984; Voltz, 1986; Walter, 1990 et Boivin, 1991).

Dans le cas du krigeage ordinaire, on se place dans le cadre de l'hypothèse intrinsèque, hypothèse de stationnarité d'ordre 2 sur les accroissements (Gascuel-Oudou et al., 1995), c'est-à-dire sur les différences $[Z(x)-Z(x+h)]$, soit:

- d'une part, l'espérance des accroissements ne dépend pas de x :

$$E[Z(x+h)-Z(x)]=0 \text{ quels que soient } x \text{ et } h$$

- d'autre part, les accroissements ont une variance finie, liée à h et indépendante de x :

$$\text{VAR}[Z(x)-Z(x+h)] = 2\sigma(h)$$

La fonction $\sigma(h)$ est appelée variogramme. Tenant compte de la première équation, la seconde devient:

$$\sigma(h) = 0,5 * E\{[Z(x)-Z(x+h)]^2\}$$

Un variogramme se caractérise par un comportement à l'origine: la courbe peut partir de l'origine et comporter une variance à l'origine appelée effet de pépite et un palier et une portée.

Ces points sont utilisés pour modéliser le variogramme brut, lequel modèle est repris pour l'interpolation des cartes d'isovaleurs. L'estimation par krigeage respecte deux conditions. Elle est en premier lieu non-biaisée. En second lieu, on cherche à minimiser la variance d'estimation.

Le traitement géostatistique est réalisé moyennant le logiciel GEOSTAT-PC (Boivin, 1990). Ce logiciel offre deux fonctions à l'utilisateur: un module de variographie et un deuxième module de cartographie par krigeage d'une variable donnée.

II. CARACTERISATION MORPHOLOGIQUE DES SOLS

II.1. Typologie des matériaux, des horizons et des sols

II.1.1. Organisation macroscopique

Les sols peu évolués d'apport alluvial à caractères vertiques (Soil Taxonomy: Typic xérofluents; FAO: calcaric Fluvisol), salés et sodiques par endroits sont très répandus sur les terres riveraines de l'Oued Mejerda depuis son amont jusqu'à la mer. Ils couvrent des milliers d'hectares dont plus de 80.000 ha irrigués. On les observe également dans presque toutes les vallées du Nord de la Tunisie.

Dans la plaine de Kalaât Landelous, les profils stratifiés sont constitués de couches alluviales plus ou moins limoneuses qui s'interposent entre des couches plus argileuses. L'épaisseur de ces strates varie de quelques centimètres à plus d'un mètre. Les niveaux à sables ne s'observent qu'à la base des profils. Ces matériaux de surface reposent toujours sur une argile bleuâtre. Les profils sont schématisés dans les figures 24a et 24b. Les descriptions et les analyses sont consignées en annexe 4, 5a, 5b, 6a et 6b (9 profils et plus de 52 horizons). **La structure est jugée en pondérant les observations de l'hiver par celle de fin d'été** (Planche 4 et 5, 1993). On peut regrouper les profils en deux ensembles:

- **ceux à texture irrégulière:** avec une ou plusieurs strates intercalées entre des horizons de textures plus limoneuses (K1, K2 et K3 et K9) ou plus argileuses (K6 et K7).

- **ceux à texture assez régulière:** avec des strates à argile limoneuse qui se superposent à des niveaux plus limoneux (K5 et K8) ou plus argileux (K4).

Texture et structure sont souvent associées pour former:

- **horizon "e"** à argile limoneuse et à structure polyédrique subanguleuse;

- **horizon "f"** à argile limoneuse, limon argileux, limon argileux fin ou limon fin et à structure polyédrique à tendance cubique;

- horizon "g" à argile, argile limoneuse, limon argileux fin, limon argileux ou limon fin argileux et à structure polyédrique prismatique ou tendance prismatique;
- horizon "h" à argile fine, argile ou argile limoneuse et à structure prismatique (5 cmx10 cm);
- horizon "i" à argile limoneuse, limon argileux, limon argileux fin, limon ou limon sableux, et à structure massive à débit polyédrique;
- horizon "j" à limon, limon sableux ou limon très sableux et à structure fondue.

Ainsi, les structures possibles sont: polyédrique subanguleuse plus ou moins nette, polyédrique à tendance cubique, polyédrique+prismatique ou à tendance prismatique, prismatique, fondue à débit polyédrique et enfin fondue.

Dans la masse des éléments structuraux, on peut identifier les pédotraits suivants: pseudo-mycéliums calcaires et taches d'oxydo-réduction.

Macroscopiquement, les unités structurales élémentaires (peds) constituant ces horizons se réduisent à trois:

- "u" brun jaunâtre (10YR4/3), argilo-limoneux, de structure polyédrique subanguleuse d'environ 2 mm de taille, très calcaire;
- "v" plus clair, limon fin argileux à limon sableux, de structure fondue à débit anguleux;
- "w" limon sableux à très sableux, de structure fondue, formé de sable grossier très riche en débris de coquilles.

Les sols sont organisés en plusieurs niveaux selon l'échelle d'observation (Figure 25). L'unité u donne naissance aux horizons e et f; l'unité v se réorganise en horizon i et l'unité w en horizon j. Les horizons g et h peuvent provenir de l'évolution aussi bien de l'unité u que v (Tableau 10). La structure de l'horizon semble être générée d'abord par celle de l'unité structurale élémentaire. L'unité "u" est plus fréquente entre 0 et 80 cm, l'unité "v" entre 80 et 120 cm et l'unité "w" entre 120 et 140 cm.

Tableau 10. Relations de genèse unités structurales élémentaires - horizons.

Unités structurales élémentaires (peds)	Horizons					
	e	f	g	h	i	j
u	+	+	+	+		
v			+	+	+	
w						+

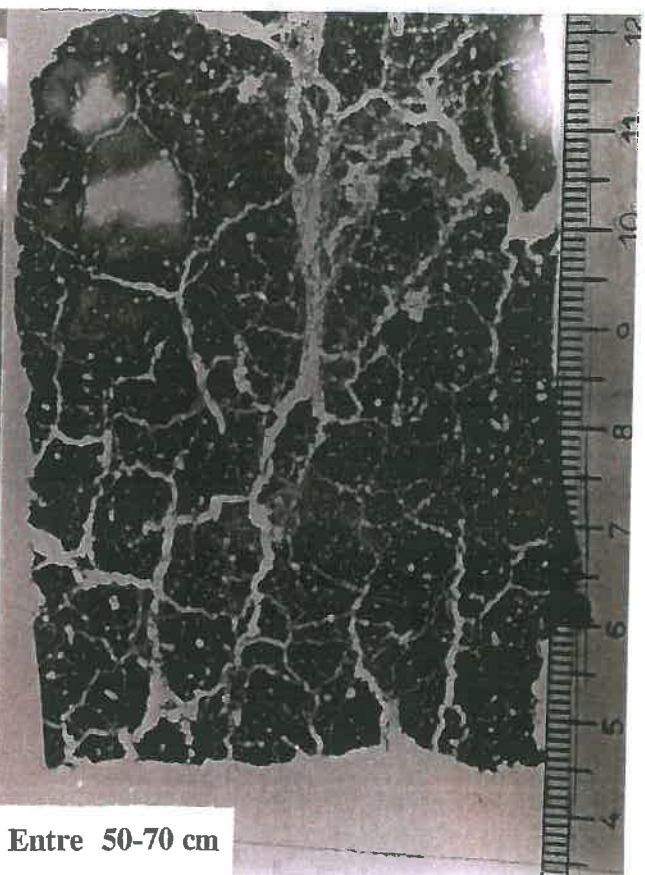
Planche 4. Variation saisonnière de la structure dans les profils K1 et K3.

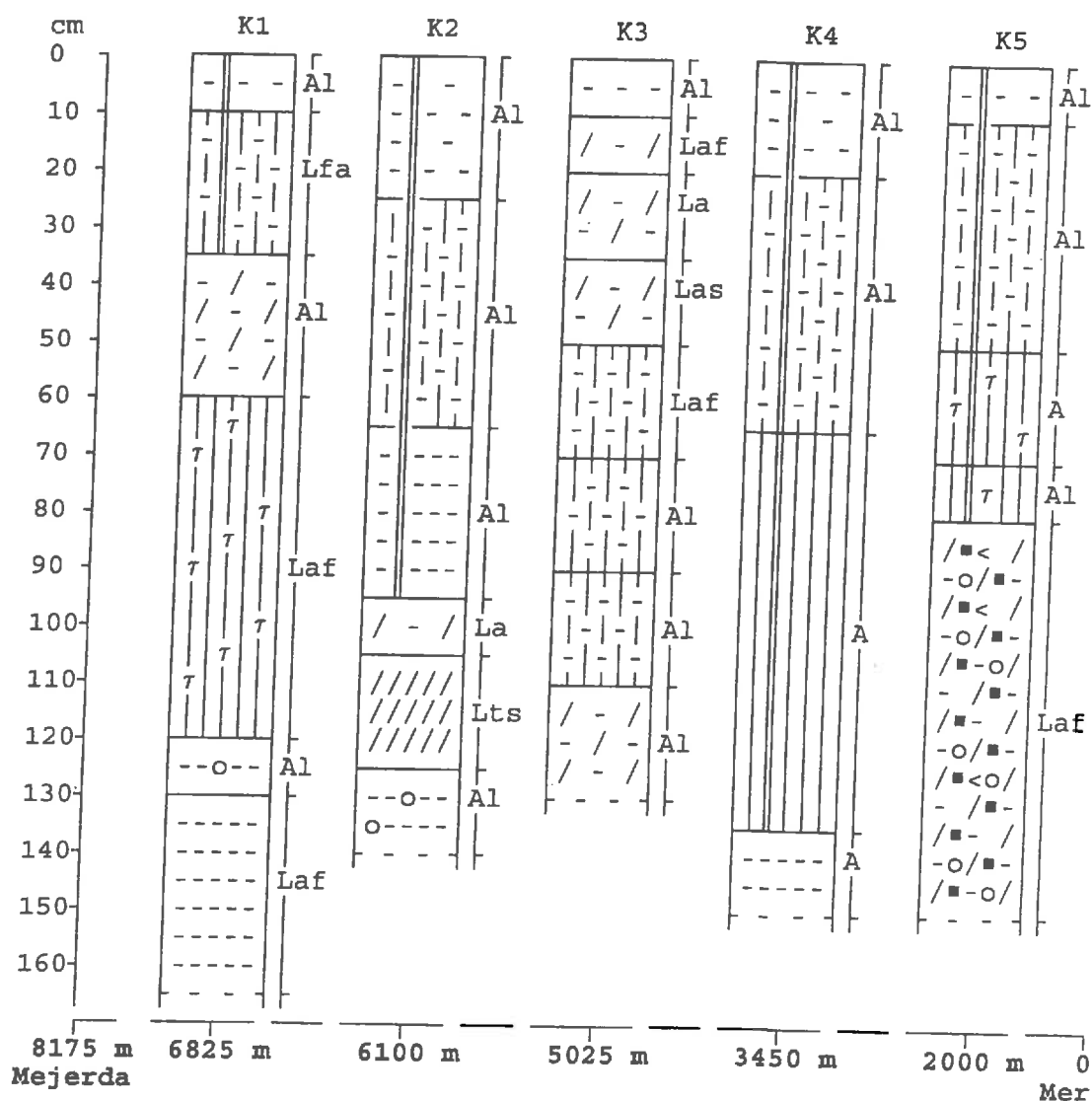


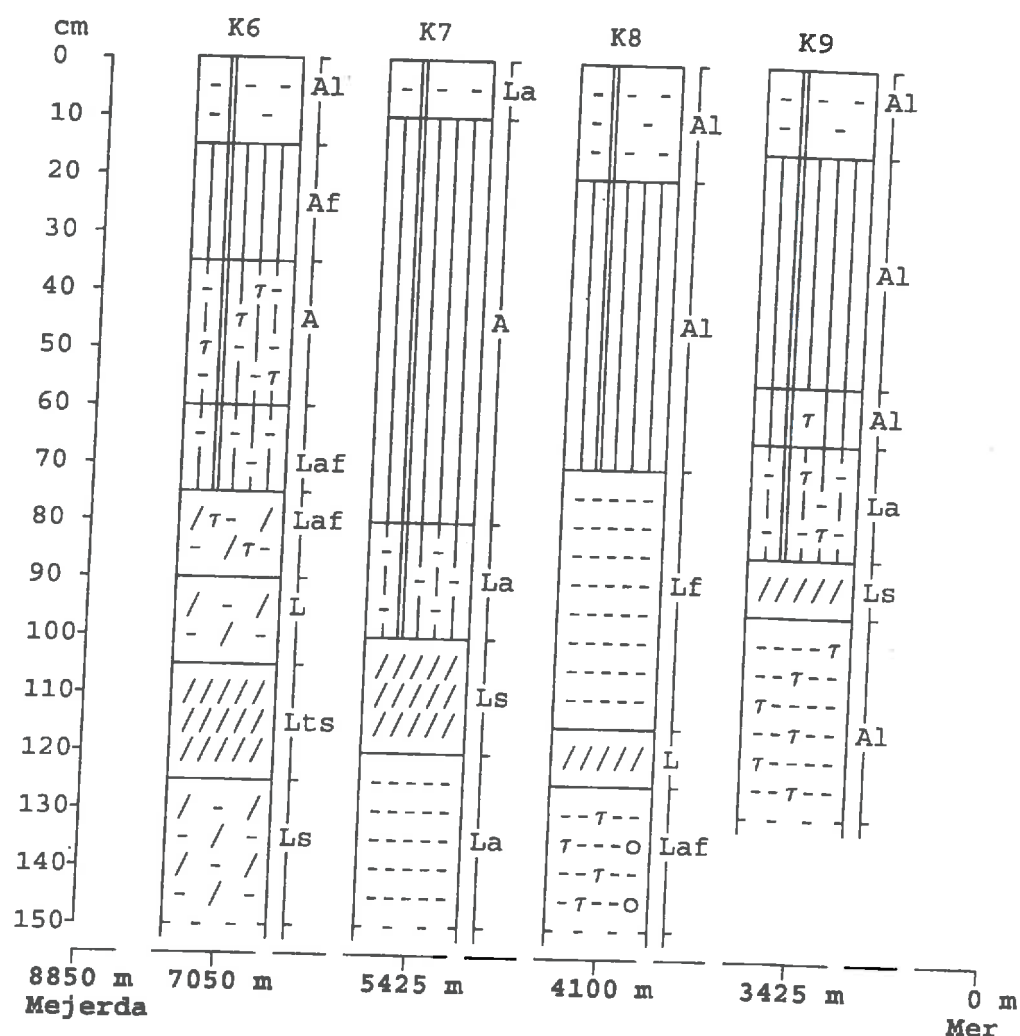
Planche 5. Variation saisonnière de la structure dans les profils K4 et K6.



Planche 6. Variation verticale de la structure dans le profil K3.





**STRUCTURE**

e: - - polyédrique
 f: --- polyédrique anguleuse fine
 g: -|- polyédrique+prismatique
 ou tendance prismatique
 h: ||| prismatique
 i: /-/ fondue à débit polyédrique
 j: /// fondue

PEDOTRAITS

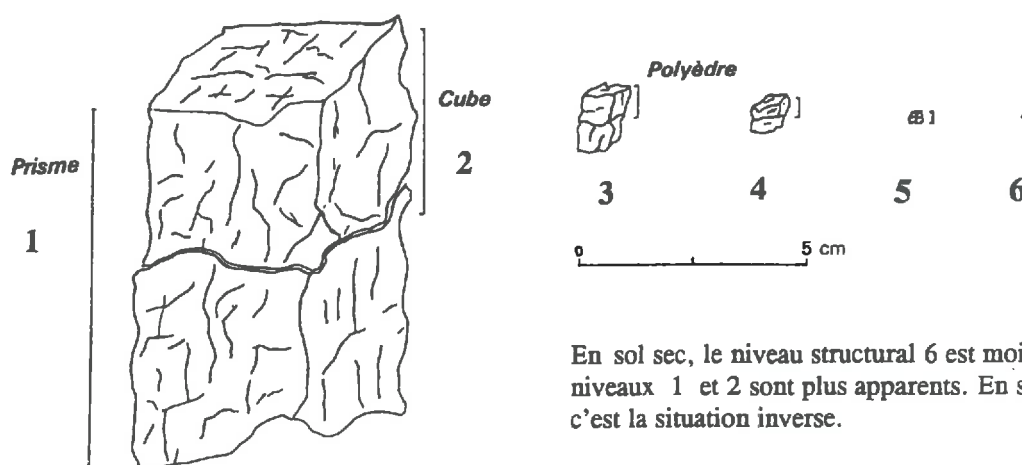
τ pseudo-mycelium
 calcaire
 ■ amas calcaire
 o tache d'oxydo-réduction
 || fente de retrait

TEXTURE

Af Argile fine
 A Argile
 Al Argile limoneuse
 Laf Limon argileux fin
 La Limon argileux
 Lfa Limon fin argileux
 Las Limon argilo-sableux
 Lf Limon fin
 L Limon
 Ls Limon sableux
 Lts Limon très sableux

Figure 24b. Représentation schématique des profils pédologiques le long du transect T3.

Matériau argilo-limoneux:



Matériau limono-sableux:



La structure se conserve du sol sec au sol humide.

Figure 25. Niveaux macroscopiques d'organisation des sols de Kalaât Landelous.

En profondeur, plusieurs caractères s'affirment: horizons plus frais et cohérents à la base, couleurs légèrement moins foncées, moins de vides, disparition des fentes, baisse de la matière organique, traces d'activité biologique et racines moins nombreuses, faces de glissement par endroit luisantes. Des caractères sont ainsi communs et fréquents à plusieurs profils dans ces sols. D'autres, moins nombreux, constituent les caractères de différenciation. Les caractères les plus répandus sont l'horizon "f" et l'unité structurale élémentaire "u" (Cf. pages 68 et 69). Eu égard à ces observations, la fraction limono-argileuse, omniprésente dans les sols, apparaît comme le constituant le plus important dont le rôle mérite d'être élucidé.

Une relation apparaît entre la structure des horizons et la granulométrie des matériaux (Tableau 12) et leur densité apparente. Depuis le dépôt des matériaux, l'évolution de la structure est dépendante de la texture et des contraintes, en particulier de la nappe. Plus la structure est prismatique, plus elle correspond à un matériau argileux, et plus la densité apparente du matériau apparaît faible dans ces sols (Tableau 13; le nombre d'échantillons faible pour certaines classes ne nous permet pas d'affirmer clairement les tendances de variation). La structure prismatique s'observe pour une teneur en argile supérieure à 50%. Elle est polyédrique anguleuse fine (cubique) quand

cette teneur est de l'ordre de 41%. Elle apparaît massive pour une teneur de 16% d'argile. Parallèlement mais moins nettement, la baisse de la teneur d'argile s'accompagne d'une augmentation de la densité apparente (Tableau 14).

Tableau 12. Relation entre texture et structure (51 échantillons issus des 9 profils).

Structure	Texture										
	Lts	Ls	L	Lf	Las	Lfa	La	Laf	Al	A	Af
Prismatique									+	+	+
Polyédrique + prismatique						+	+	+		+	
Polyédrique + cubique				+			+	+			
Polyédrique							+	+	+		
Fondue + polyédrique		+	+		+		+	+	+		
Fondue	+	+	+								

Tableau 13. Caractéristiques physiques par texture.

Texture	Nombre s	% A		D.a (cylindres)	
		Moyenne	C.V. %	Moyenne	C.V. %
Af	1	64		1.47	
A	5	57		1.61	
Al	22	47	13	1.52	7
Laf	7	36		1.55	
La	6	32		1.59	
Lfa	1	22		1.50	
Las	1	26		1.70	
Lf	1	24		1.53	
L	2	21		1.66	
Ls	3	17		1.73	
Lts	2	15		1.61	

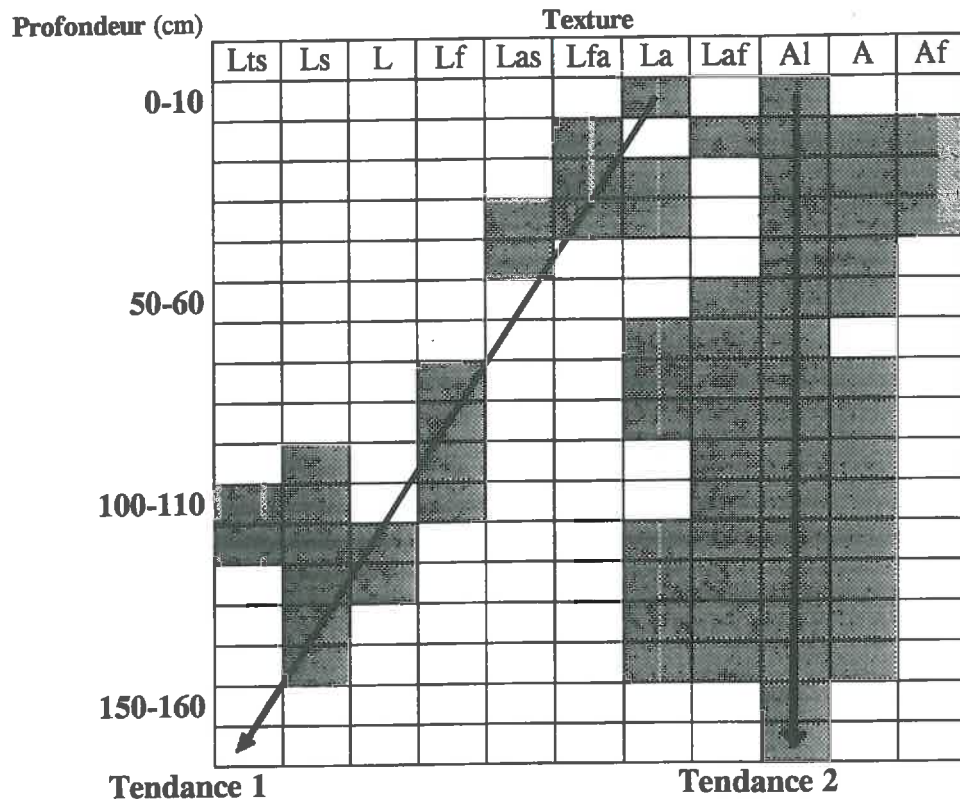
Tableau 14. Caractéristiques physiques par structure.

Structure	Nombre d'éch.	% A		D.a	
		Moyen.	C.V. %	Moyen.	C.V. %
Prismatique	8	51	17	1.56	5
Polyédrique + Prismatique	11	45	27	1.58	6
Polyédrique + cubique	8	37	40	1.56	9
Polyédrique	9	45	18	1.48*	7
Polyédrique + Fondue	10	35	35	1.59	7
Fondue	5	20	39	1.68	11

*: D.a n'est pas fonction nécessairement de la structure.

Mais la texture n'est pas le seul facteur dont dépendent ces structures. La présence de ces matériaux en surface, au milieu ou à la base des profils joue aussi dans la genèse de ces structures. Les matériaux fins sont plus fréquents en surface et ceux plus limoneux et sableux plus au milieu du profil ou en profondeur (Tableau 15). La texture argilo-limoneuse, prépondérante avec la fourchette des textures d'argile à limon argileux, est présente à tous les niveaux. En effet, toute la gamme des sols limoneux est présente.

Tableau 15. Distribution des textures en fonction de la profondeur.
Aucun échantillon (51) ne sort des caissons.



A l'exception de la structure massive, les autres sont aussi fréquentes les unes que les autres à toutes les profondeurs (Figure 26). Le développement des structures a essentiellement lieu dans le premier mètre. Les horizons profonds ont fréquemment conservé plusieurs caractères des matériaux originaux (structure polyédrique subanguleuse fine ou fondue).

Les fentes de retrait qui apparaissent au fur et à mesure que le sol se dessèche s'arrêtent quand elles atteignent les matériaux limono-sableux à structure fondue. La profondeur varie d'environ 40 cm à plus de 130 cm. Cette discontinuité qui se matérialise par les fentes intervient ainsi sur les flux hydriques et de solutés de la nappe vers la surface et inversement. Cet aspect sera développé plus loin dans l'étude de la stratification des sols.

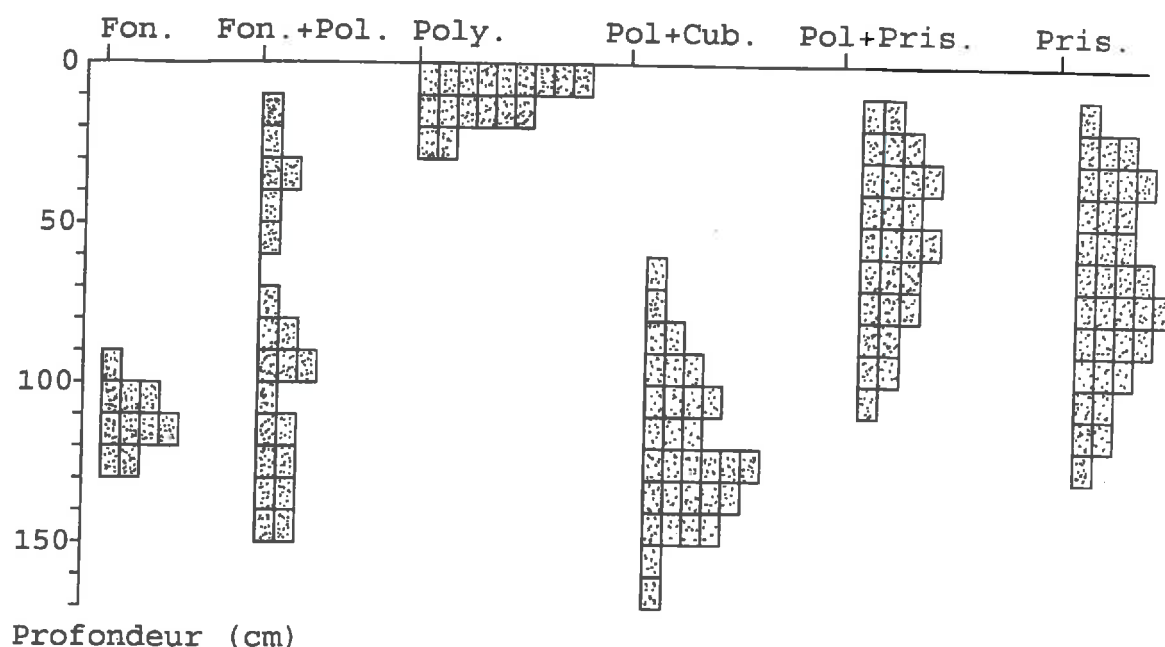
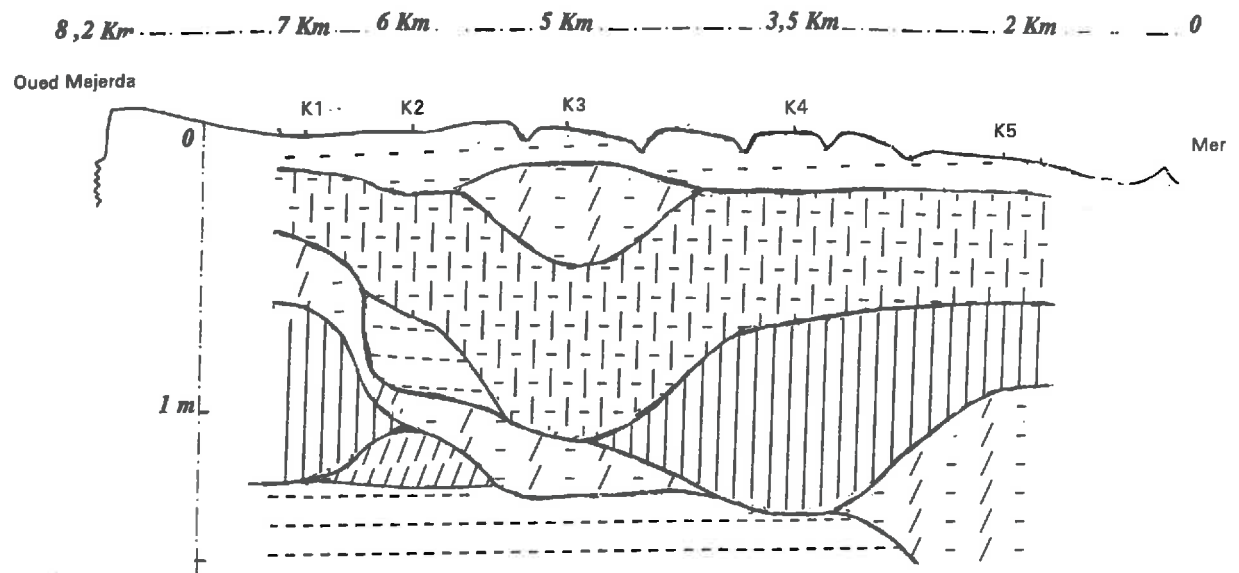


Figure 26. Distribution des structures des horizons en fonction de la profondeur (51 horizons).

La teneur en calcaire total varie entre 37 et 54 %; celle en calcaire actif entre 2 et 29%. Dans le limon très sableux, la teneur n'atteint guère 10%. La majorité du calcaire total est formé de débris de coquilles. Les horizons en contact de la nappe sont moins riches en calcaire actif. Près de la surface, le calcaire s'accumule sous diverses formes microcristallines.

Les pédotraits n'apparaissent qu'en profondeur. Les taches d'oxydo-réduction s'observent dans les horizons humides avoisinant la nappe. Les amas calcaires sont peu fréquents. Les pseudo-mycéliums calcaires, assez répandus, sont plutôt associés à des structures prismatiques à des matériaux argileux, et à d'autres propriétés liées au régime hydrique. En effet, près des bras morts, zones qui drainent mieux, les pseudo-mycéliums calcaires sont absents quel que soient le matériau et la texture.

La distribution verticale des couches alluviales suit un granulo-classement plus net près du lit de l'oued que près de la mer (Figures 27 et 28). Le passage vertical d'un horizon argileux à un autre limono-sableux se réalise par des horizons de plus en plus grossiers. Cependant, un horizon à texture grossière peut reposer directement sur un horizon à texture très fine. Dans ce cas, cela ne s'explique que par le hasard de la distribution d'une sédimentation en régime hydrique turbulent au cours d'une crue. L'organisation spatiale peut être simplifiée: en surface, un horizon argilo-limoneux polyédrique subanguleux repose sur un matériau argileux prismatique auquel succède un horizon limono-sableux de texture fondue qui recouvre un horizon de limon argileux fin à structure polyédrique anguleuse fine. L'épaisseur des horizons à texture grossière et structure fondue diminue du lit de l'Oued en direction de la mer, à l'opposé des horizons à texture fine et structure prismatique.



STRUCTURE

- e: - - polyédrique
- f: . . . polyédrique anguleuse fine
- g: -| - polyédrique+prismatique
ou tendance prismatique
- h: ||| prismatique
- i: /- / fondue à débit polyédrique
- j: /// fondue

Figure 27. Organisation spatiale des structures des sols sur le transect T1.

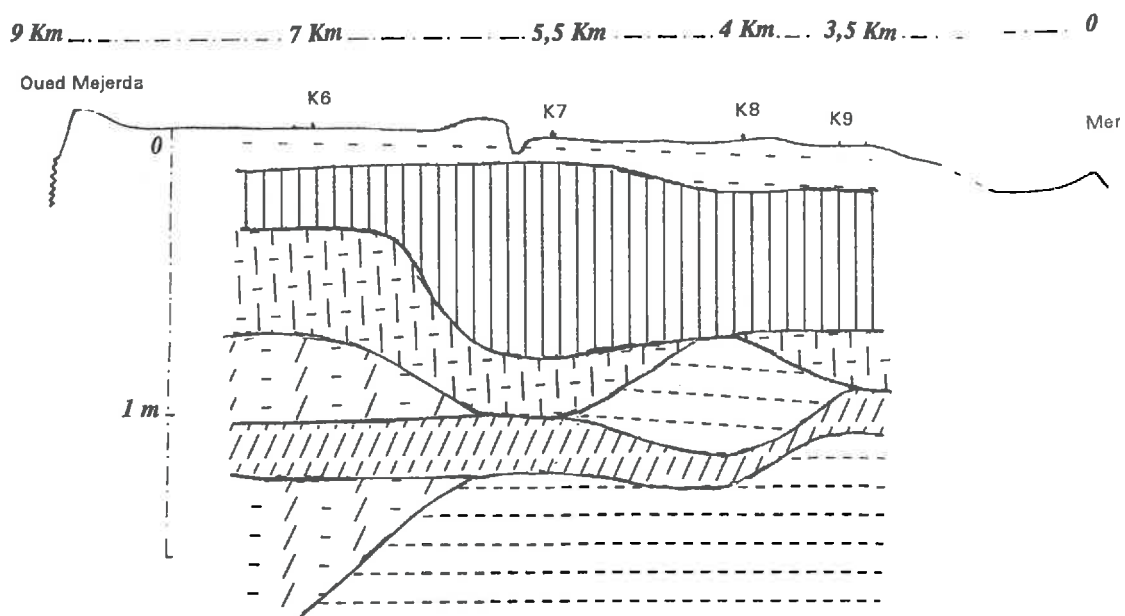


Figure 28. Organisation spatiale des structures des sols sur le transect T3.

II.1.2. Organisation micromorphologique

Après l'étude macromorphologique, nous avons eu recours à l'observation micromorphologique pour examiner l'unité fondamentale. Les observations sont relatives au profil K-3 situé au milieu du périmètre. Ces observations réalisées par Pr. Dr. G.Stoops (ITC-INAT, 1997), ont porté sur des lames minces de 30 μm dont l'interprétation s'est basée sur le modèle établi par Bullock et al. (1985) qui distinguent les trois parties suivantes: la microstructure, la masse basale et les pédotraits. Les observations sont résumées dans le tableau 16 (Planche 7).

- **La microstructure:** Elle est cavitaire en surface (0-0,10 m), polyédrique anguleuse et de plus en plus tubulaire (chenaux verticaux) et nette vers la base du profil. Les polyèdres anguleux de 3 cm se subdivisent vers 0,70 m de profondeur en polyèdres anguleux de 0,5 à 1 cm. De même, les chenaux d'environ 400 μm près de surface ne sont plus que d'environ 100 μm de diamètre. Cependant, la porosité totale (observable) de 5 % en surface triple vers 0,40 m (15 %).

- **La masse basale:** Elle présente une alternance de masse basale homogène à une masse basale hétérogène. Ainsi, elle est fréquemment homogène mais par endroit elle renferme des fragments d'argile polyédriques anguleux d'environ 2 mm. Cette masse basale contient du calcaire polymicritique de la taille s.f. à s.m. (s.f.=sable fin; s.m.=sable moyen) avec des fragments de coquilles et des grains de glauconite non altérés. Quant à la micromasse, il s'agit d'une argile brun-grisâtre tachetée et de la calcite avec biréfringence cristallitique. La matière organique est visible à travers des sections de racines jusqu'à 0,70 m où de nombreux résidus noirs de cellules apparaissent dans la masse basale puis noirs et rouges à partir de 0,90 m. De la surface à la base du profil, la distribution relative g/f (grossiers/fins) passe d'une porphyrique simple, à porphyrique à double espacement, à chitonique, à géfurique, à monique fine, à porphyrique fermée, et enfin à porphyrique ouverte. Le rapport g/f croît de 1/2 en surface à 2/1 vers 0,35 m puis décroît à 1/100 en profondeur.

- **Les pédotraits:** Ils sont au nombre de quatre:

- des nodules ferriques: Ils apparaissent entre 0,10 et 0,20 m, arrondis, de taille moyenne et de couleur brune. Puis à partir de 0,50 m, les nodules sont arrondis, de petite taille et brun-rougeâtre.

- des remplissages de vides soit par des matériaux grossiers soit par des excréments entre 0,70 et 1,10 m.

- des bandes d'argile orientée: visibles uniquement en profondeur.

- des revêtements d'argile:

-en surface, des hyporevêtements rouge-jaunâtres dans les chenaux;

-entre 0,20 et 0,35 m, des revêtements d'argile et de calcite et des coiffes de grains.

- des hyporevêtements brun-jaunâtres dans les pores.

Tableau 16. Observations Micromorphologiques-Profil-K3 (s.f.:sable fin, s.m.:sable moyen).

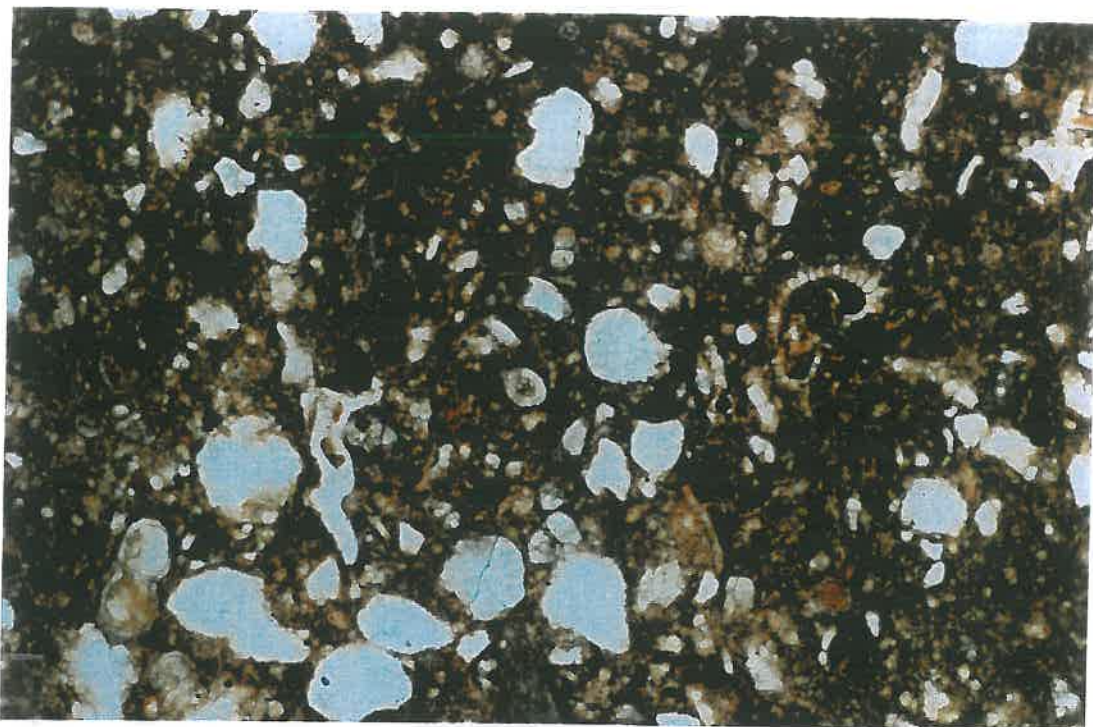
Profondeur (m)		0-0,10	0,10-0,20	0,20-0,35	0,35-0,50	0,50-0,70	0,70-0,90	0,90-1,10
Microstructure et Porosité		cavitaire (4 mm) porosité: 5 %	polyédrique angulaire (3 cm) avec des chenaux intrapédales (400 µm)	chenaux verticaux (tubulaire); (400 µm)	polyédrique angulaire modérément développée; micro-structure formée de chenaux (tubulaire) dominante; porosité totale visible: 15 %	polyédrique angulaire (1 cm); micro-structure formée de chenaux (tubulaire)	polyédrique angulaire (2-3 cm), subdivisée en une polyédrique angulaire modérément développée (0,5-1 cm), avec beaucoup de chenaux (100 µm)	idem avec plus de chenaux
Masse	Type	homogène	homogène	hétérogène; fragments (2 mm) de matériau de la taille de l'argile ou du limon, plusieurs zones de grosse taille	matrice de sable fin et de limon avec des fragments anguleux (2 mm) d'argile	homogène	hétérogène; présence de polyèdres d'argiles (1 mm)	homogène
	grains grossiers	sable calcaire e s.f. à s.m.	calcaire polymicritique(s.m.) avec des fragments de coquilles et des grains de glauconite altérés		calcaire e (s.m. à s.f.)	idem	calcaire polymicritique de différents genres, essentiellement s.f.	
	Basale	argile brun-grisâtre tachetée et calcite avec biréfringence cristallitique						
Basale	micromasse							
	matière organique	quelques sections de racines		non observée	sections de racines	rare sections de racines	quelques sections de racines; nombreux résidus de cellules noirs dans la masse basale	quelques sections de racines; nombreux résidus de cellules noirs et rouges dans la masse basale
	distribution relative g/f	porphyrique simple à porphyrique à double espacement Rapport g/f= 1/2	porphyrique à double espacement Rapport g/f= 1/3-1/4	chitonique et géfurique Rapport g/f= 2/1	allant du chitonique à porphyrique fermée Rapport g/f= variable	monique fine Rapport g/f= 1/100	porphyrique fermée Rapport g/f= 1/1	monique fine à porphyrique ouvert Rapport g/f= 1/100
Pédotraits		rare hyporevêtements rouge-jaunâtre dans les chenaux	nodules ferriques bruns arrondies (m.s.)	-des zones locales avec une matrice porphyrique fermée à simple espacement -quelques revêtements d'argile et de calcite grossiers à la base de cavités ou comme coiffe de grains	rare hyporevêtements brun-rougeâtre dans les pores	quelques nodules ferriques brun-rougeâtre de petites tailles (100 µm) arrondis	remplissage par des excréments	-remplissages par des excréments -raies et bandes de matériau fin contenant de l'argile fortement orientée -nodules ferriques rougeâtres de petites tailles (s.f.)

Planche 7.
Micro-
structures
et pédotraits.
Profil K3.

Photo 1: Près de la surface du sol (horizon de labour).

a. 2,5 PL.

Microstructure cavitaire. Masse basale assez homogène contenant du calcaire polymictique + fragment de coquille. Micromasse formée d'argile brun-grisâtre tachetée + calcite. Biréfringence cristallitique. Pédotraits: nodules ferriques, remplissages de vides par du matériau grossier, hyporevêtements rouge-jaunâtres dans les chenaux et revêtements d'argile + calcite et des coiffes de grains.



b. 2,5 XD. Idem.

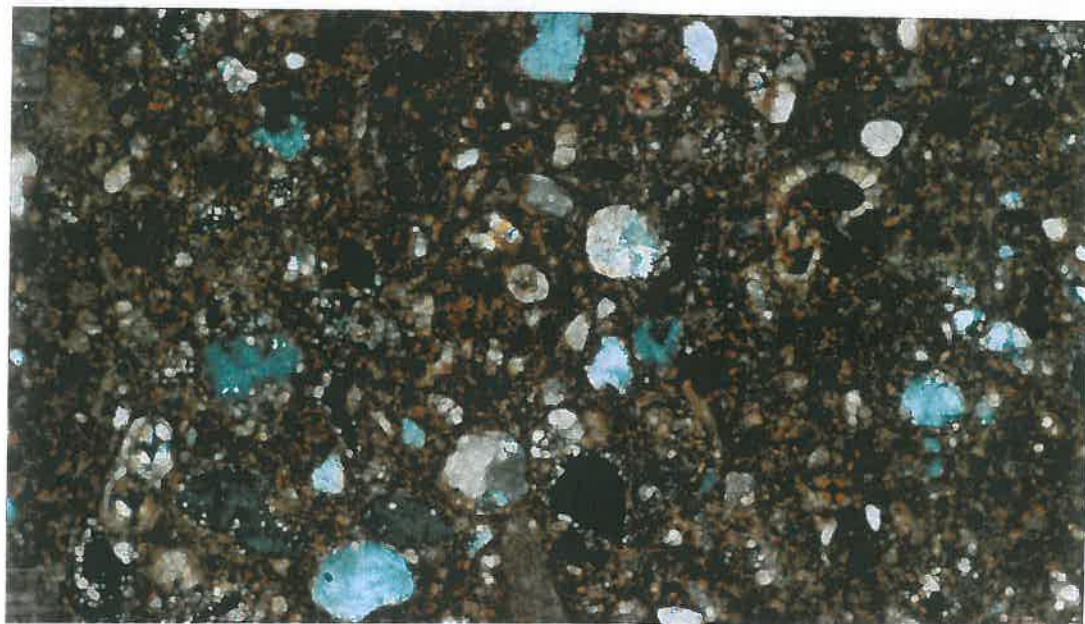
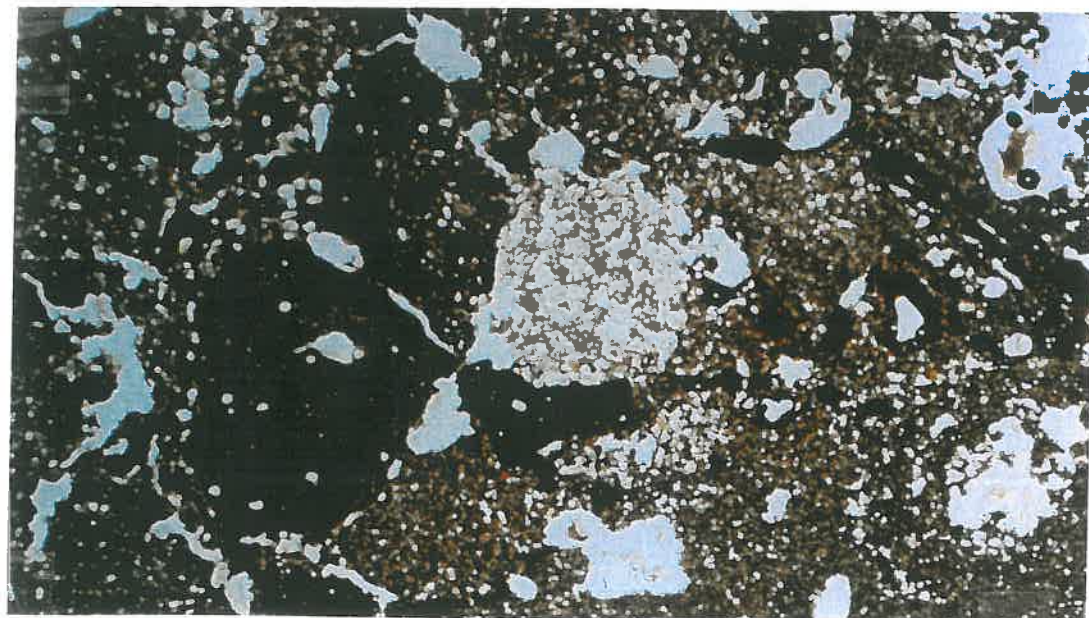


Photo 3 (1 PL):
en profondeur (vers 1 m).

Microstructure polyédrique angulaire. Masse basale hétérogène contenant des fragments d'argiles et de grains calcaires. Pédotraits: remplissages de vides par du matériau grossier.



II.1.3. Relation (filiation) entre macrostructures et microstructures

Nous avons repris au tableau 17 les observations macromorphologiques et micromorphologiques réalisées au niveau du profil K3.

- *au niveau de la structure*: la structure polyédrique angulaire correspondant à une microstructure polyédrique angulaire est l'unité de base. Quand la microstructure est moins nette vers la surface, des cavités apparaissent. La microstructure tubulaire (chenaux) est présente à tous les niveaux du profil. Mais elle domine à partir de 20 cm de profondeur. La porosité totale visible est de l'ordre de 15 % entre 35 et 50 cm. Elle diminue vers la surface à environ 5 % et aussi en profondeur.

- *au niveau de la texture*: le matériau argilo-limoneux brun jaunâtre et calcaire qui réagit fortement au HCl est constitué d'une micromasse argileuse de couleur brun-grisâtre, tachetée et de calcite dont la biréfringence est cristallitique. Cette masse est généralement homogène contenant des grains grossiers de calcaire polymicritique de petite taille avec par endroit des fragments de coquilles et des grains de glauconite altérés. Elle renferme des racines près de la surface et même à 1 m de profondeur. A partir de 0,70 m, des résidus de cellules végétales s'observent dans la masse basale. Ces résidus sont de couleur noire entre 0,70 et 0,90 m et de couleur noire et rouge plus en profondeur et à proximité de la nappe (0,90-1,10 m). La distribution relative g/f couvre généralement toute la gamme porphyrique. Mais des changements brutaux de distribution s'observent également allant de porphyrique à chitonique, à géfurique, à monique fine. Le rapport g/f est assez variable. Cependant il est d'environ 1/2 en surface, à 1/3 puis 1/4 vers 0,15 m. Il augmente à 2/1 entre 0,20 et 0,35 m et à plus de 1/100 en profondeur.

- *au niveau des traits pédologiques*: Les taches d'oxydo-réduction autour des radicelles dans la couche superficielle se confirment microscopiquement sous forme d'hyporevêtements rouge-jaunâtre dans des chenaux. Cette manifestation du fer indique un engorgement temporaire de cette couche au cours de la saison pluvieuse (échantillons prélevés le 30/3/93). Entre 0,10 et 0,20 m, les nodules ferriques bruns arrondis ne sont visibles qu'à fort grossissement. Entre 0,20 et 0,35 m, apparaissent des revêtements d'argile et de calcite à la base de cavités ou comme coiffe de grains. Il s'agit probablement de migration d'argile et de redistribution de calcaire à la limite de la couche de labour. Entre 0,35 et 0,50 m réapparaissent les hyporevêtements ferriques puis des nodules ferriques entre 0,50 et 0,70 m. On l'attribue à l'effet de la nappe. Le remplissage des pores par les excréments à partir de 0,70 m puis l'apparition en plus d'argile fortement orientée à partir de 0,90 m et aussi des nodules ferriques dénotent des conditions de saturation en eau près de la nappe (nappe à 1,45 m en hiver et 1,65 m en été).

**Tableau 17. Correspondance entre les observations macro et microscopiques,
Profil K3.**

MACROSCOPIE	Limites des horizons (cm)	MICROSCOPIE
<ul style="list-style-type: none"> -couleur brun-jaunâtre. -vides nombreux inter et intra agrégats sous formes de cavités et chenaux. -texture argilo-limoneuse -structure polyédrique subangulaire fine peu nette. -matière organique sous formes de résidus de végétaux. - beaucoup de racines. - forte effervescence généralisée au HCl. - taches d'oxydo-réduction autour des radicelles. 	0	<ul style="list-style-type: none"> -microstructure cavitaire (4 mm). -porosité: 5%. -masse basale homogène formée de grains grossiers de calcaire polymicritique (s.f. à s.m.), d'une argile brun-grisâtre tachetée et de la calcite avec biréfringence cristallitique et de quelques racines et une distribution g/f porphyrique simple à porphyrique à double espacement et un rapport g/f égale 1/2. - rares hypo-révêtements rouge jaunâtres dans les chenaux.
<ul style="list-style-type: none"> -texture limono-argileuse fine. -structure massive à débit anguleux peu nette. -porosité tubulaire. -idem pour le reste. 	10	<ul style="list-style-type: none"> -microstructure polyédrique angulaire (3 cm) avec des chenaux intrapédales. -masse basale homogène formée de grains grossiers de calcaire polymicritique (s.m.) avec des fragments de coquilles et de grains de glauconite altérés, d'une argile brun-grisâtre tachetée et de la calcite avec biréfringence cristallitique et de quelques racines; une distribution g/f porphyrique à double espacement et un rapport g/f égale 1/3-1/4. - nodules ferriques bruns arrondis (s.m).
<ul style="list-style-type: none"> -couleur plus jaunâtre. -texture limono-argileuse. -structure massive à débit anguleux. -porosité tubulaire. -idem pour le reste. 	20	<ul style="list-style-type: none"> -microstructure tubulaire (chenaux verticaux). -masse basale hétérogène formée de grains grossiers de calcaire polymicritique (s.m.) avec des fragments de coquilles et des grains de glauconite altérés, d'une argile brun-grisâtre tachetée et de la calcite avec biréfringence cristallitique et ayant une distribution g/f chitonique et géfurique et un rapport g/f égale 2/1. - des zones formées de matrice ayant une distribution g/f porphyrique à simple espacement. -quelques revêtements d'argile et de calcite grossiers à la base de cavités ou comme coiffe de grains.
<ul style="list-style-type: none"> -couleur plus foncée. -texture limono-argilo-sableuse. -structure massive à débit anguleux. 	35	<ul style="list-style-type: none"> -microstructure polyédrique angulaire modérément développée; microstructure tubulaire dominante. -porosité: 15%. -masse basale homogène formée de grains grossiers de calcaire polymicritique (s.f à s.m.), d'une argile brun-grisâtre tachetée et de la calcite avec biréfringence cristallitique, et ayant une distribution g/f allant du chitonique à porphyrique fermée et un rapport g/f variable. -rares hyporevêtements d'argile brun-rougeâtres dans les pores.
<ul style="list-style-type: none"> -couleur plus foncée. -texture limono-argileux fine. -structure polyédrique subanguleuse nette (2,5x2 cm) avec une sur-structure prismatique (5x10 cm). 	50	<ul style="list-style-type: none"> -microstructure polyédrique angulaire (1 cm)+tubulaire. -masse basale homogène formée de grains grossiers de calcaire polymicritique (s.f à s.m.), d'une argile brun-grisâtre tachetée et de la calcite avec biréfringence cristallitique, et ayant une distribution g/f monique fine et un rapport g/f=1/100. -quelques nodules ferriques brun-rougeâtres. -rares hyporevêtements d'argile brun-rougeâtres dans les pores.
<ul style="list-style-type: none"> -texture argilo-limoneuse. -idem que précédemment mais structure moins nette. 	70	<ul style="list-style-type: none"> -microstructure polyédrique angulaire (2 à 3 cm) subdivisée en polyédrique angulaire modérément développée (0,5-1 cm) + tubulaire. -masse basale hétérogène formée de polyèdres argileux et de grains grossiers de calcaire polymicritique (s.f.), d'une argile brun-grisâtre tachetée et de la calcite avec biréfringence cristallitique, et ayant une distribution g/f porphyrique fermée et un rapport g/f=1/1. -quelques remplissages par des excréments.
<ul style="list-style-type: none"> -texture argilo-limoneuse. -idem pour le reste. 	90	<ul style="list-style-type: none"> -idem pour la microstructure mais avec plus de chenaux. -masse basale homogène formée des mêmes constituants que précédemment et ayant une distribution g/f monique fine à porphyrique ouvert et un rapport g/f=1/100. -quelques remplissages par des excréments. -bandes de matériau fin contenant de l'argile fortement orientée. -nodules ferriques rougeâtres (s.f.).
	110	

De ces observations macro et micromorphologiques, deux remarques importantes peuvent être faites. La première est d'ordre génétique et concerne l'origine du matériau constituant l'assise du sol. La seconde est d'ordre fonctionnel et concerne l'organisation du système poral et son effet sur la circulation de l'eau et de solutés. Ainsi, le sol est formé d'un matériau alluvionnaire de nature calcaire polymicritique fin contenant des éléments détritiques fossiles de croûtes calcaires. La stratification granulométrique est largement préservée. La présence de fragments de matière organique très foncés en profondeur pointe vers une origine alluviale. La pédogenèse est limitée à quelques traits redoximorphiques le long du profil indiquant des périodes de saturation en eau. Une activité biologique intense est observée. Les revêtements de grains et les remplissages de chenaux sont des traits d'un lessivage superficiel d'argile. Les vides inter-agrégats créent un système poral caractérisé, en surface, par une porosité assez importante formée de cavités et de chenaux. C'est le niveau le plus poreux de tout le profil, où la circulation des solutions est favorisée. En profondeur, le nombre de chenaux augmente certes considérablement, mais leur taille diminue et les cavités disparaissent. Du coup, globalement le milieu est moins poreux et l'eau circule plus difficilement.

II.1.4. Constitution minéralogique

La composition minéralogique de terre fine est très uniforme le long du profil K3 qui a fait l'objet des analyses menées par le Prof.Dr. G.Stoops (ITC-INAT, 1997). Les minéraux dominants dans cette fraction (Figure 29a) sont la calcite (0,385 et 0,304 nm) et le quartz (0,426 et 0,333 nm). Les minéraux mineurs sont la kaolinite (0,72, 0,447 et 0,36 nm) et les feldspaths (0,325 et 0,32 nm).

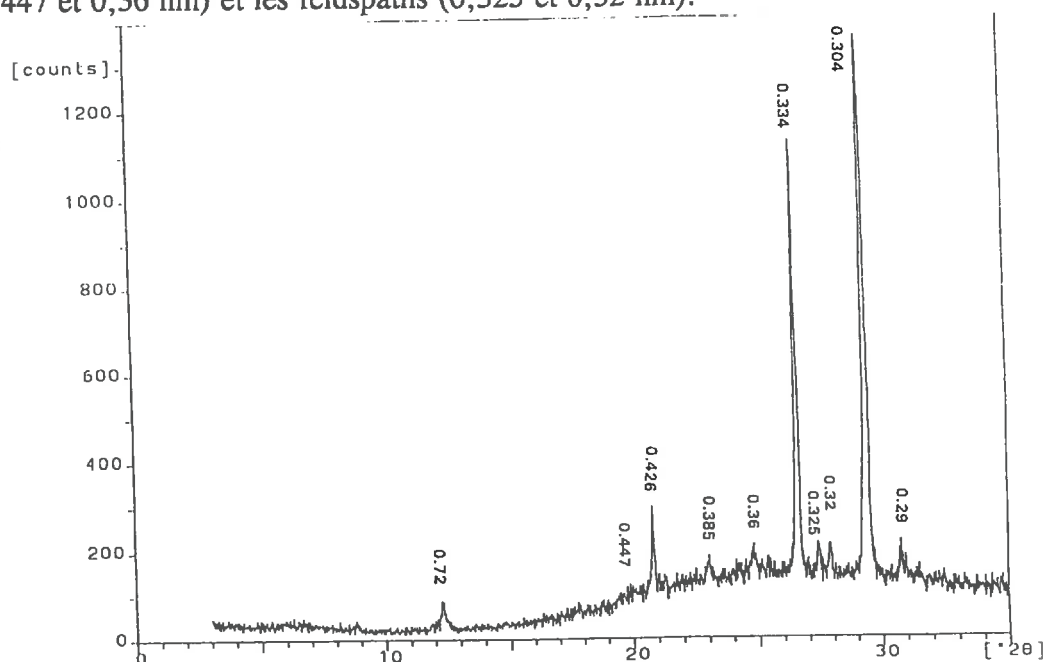


Figure 29a. Diffraction aux rayons X de la terre fine non traitée-Profil K3.
Couche 0-10 cm.

La décalcification de la fraction limoneuse est incomplète particulièrement près de la surface du profil où la calcite (0,385 et 0,304 nm) et la dolomite (0,29 nm) sont présents. Les réflexions de la calcite et de la dolomite disparaissent après le traitement avec HCl 1N (Figures 29b et 29c). Le quartz est le minéral prédominant. Feldspaths et kaolinite sont présents en faible quantité. On retrouve des traces de mica tout le long du profil.

La fraction argileuse (Figure 29d) est constituée essentiellement de kaolinite (0,72, 0,447 et 0,36 nm dans les échantillons saturés par Mg^{++} et K^+) et de smectites (changement de la réflexion de 1,45 nm dans l'échantillon saturé par Mg^{++} à 1,75 nm après glycolation). Les minéraux accessoires sont le quartz (0,426 et 0,333 nm) et un mélange de couches formées de mica (pont entre 1,00 et 1,45 nm dans l'échantillon saturé par Mg^{++}).

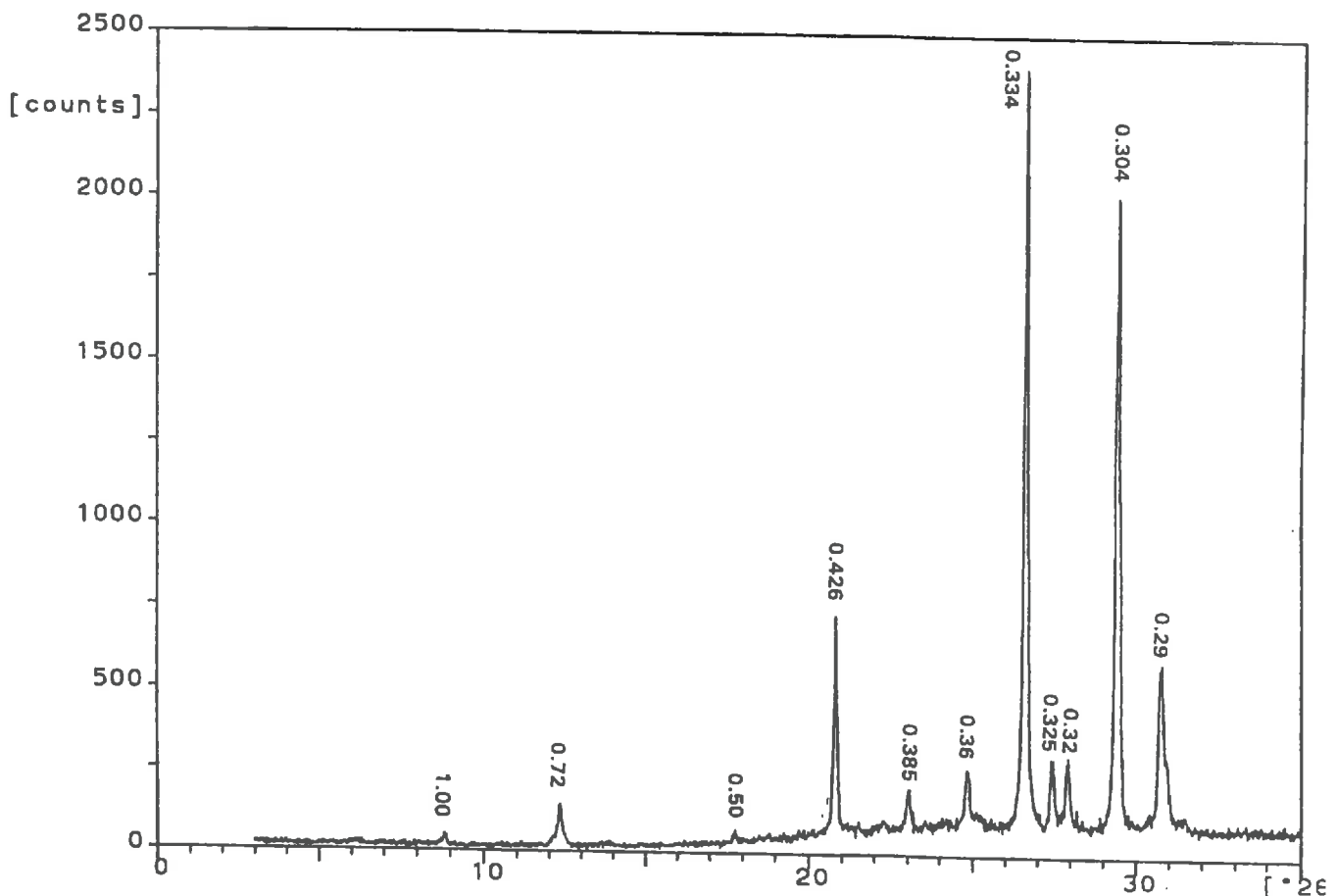


Figure 29b. Diffraction aux rayons X de la terre fine non décalcifiée (DCB); saturation de la fraction limoneuse par Na^+ - Profil K3, couche 0-10 cm.

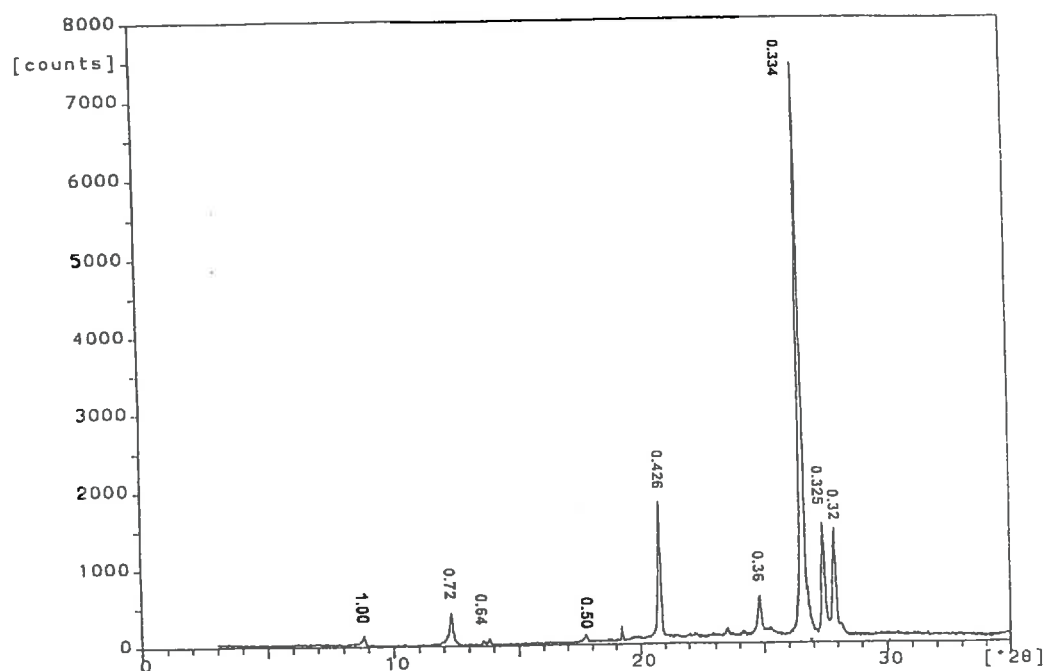


Figure 29c. Diffraction aux rayons X de la terre fine traitée avec HCl 1N; saturation de la fraction limoneuse par Na^+ - Profil K3, couche 0-10 cm.

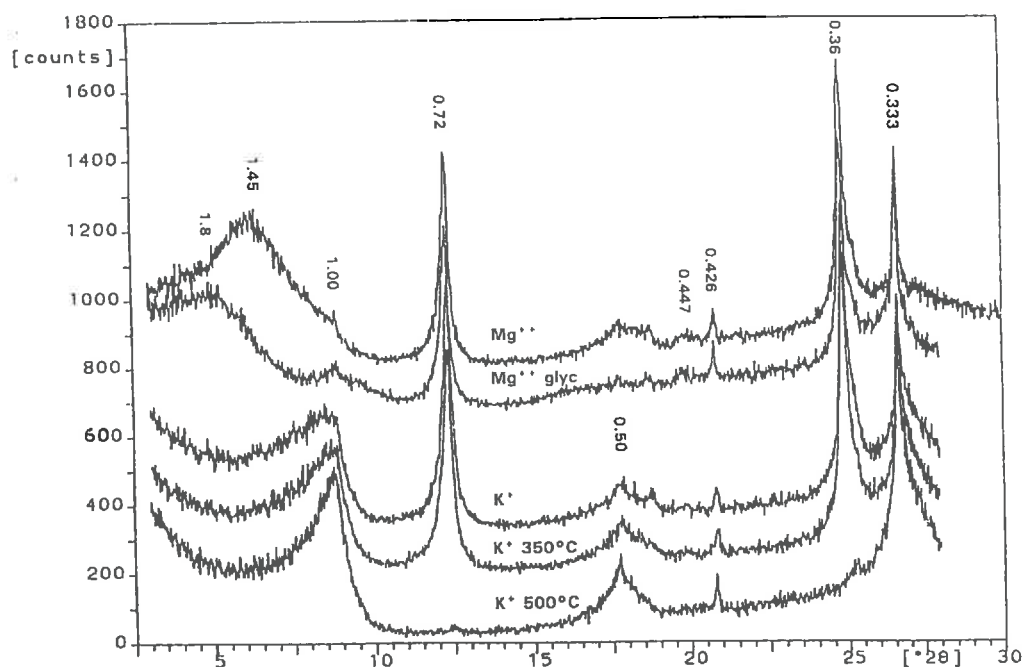


Figure 29d. Diffraction aux rayons X de la fraction argileuse après décalcification et saturation par Mg^{++} et K^+ - Profil K3, couche 0-10 cm.

Ainsi, les analyses minéralogiques réalisées d'abord sur la terre fine puis sur la fraction argileuse mettent en évidence certains aspects relatifs à la nature des matériaux et à la genèse des sols du périmètre de Kalaât Landelous.

Au niveau de leur constitution, les sols sont formés de smectites. Quelques minéraux primaires sont présents en faible quantité.

Au niveau de la genèse, les sols sont formés d'apports récents assez uniformes tout le long du profil pédologique (0-1,30 m) et les minéraux primaires originaires du bassin versant de la Mejerda n'ont subi aucune altération notable, ce qui dénote la faible évolution de ces sols.

Ces caractères sont analogues à celles observées par AGRAR (1978) dans la Haute Vallée de la Mejerda et par Gallali (1982) au niveau de la station de Cherfech à une vingtaine de kilomètres du périmètre de Kalaât Landelous. Mais mieux encore, les constitutions des sols du périmètre sont identiques à ceux rencontrés dans les pseudo-sables de la lunette (voir première partie). Ce qui conforte notre affirmation que ces pseudo-sables sont des apports de la Mejerda déposés sur les bords asséchés de l'ancien Golfe d'Utique et emportés par les vents sur la rive Sud-Est.

II.1.5. Organisation microscopique

Il s'agit en fait de trois microanalyses au microscope électronique à balayage et à la micro sonde sur un seul échantillon prélevé en surface (L2, 0-25 cm) dans la parcelle objet du chapitre « Evolution des sols à l'échelle de la parcelle ». Ces observations ont été menées par Mr C.Cheverry et Mme J.Berrier (Labo. physique des sols ENSA/INRA Rennes).

Les amas cristallins vus à l'oeil nu se révèlent du gypse (Figure 30). Quelques cristaux, épars de dolomite, apparaissent aussi. Agrandis 10 fois (de 620 μm à 60 μm), les amas gypseux se présentent sous forme de rosettes formées de cristaux en majorité de 2 μm à 15 μm (Figures 31 et 32). Agrandis 5 fois (de 620 μm à 120 μm), les cristaux de dolomite se présentent sous forme d'entités de 10 à 15 μm et d'épaisseur égale à 4 μm (Figure 33). Ces cristaux contiennent 21,94 % d'atomes Mg et 22,02 % d'atomes Ca (Figure 34).

On observe également d'assez nombreux cristaux de calcite dispersés (Figure 35) et pratiquement dépourvus de magnésium (Figure 36). Ce résultat n'avait jamais été observé dans les sols du Maghreb (Daoud et al., 1993).

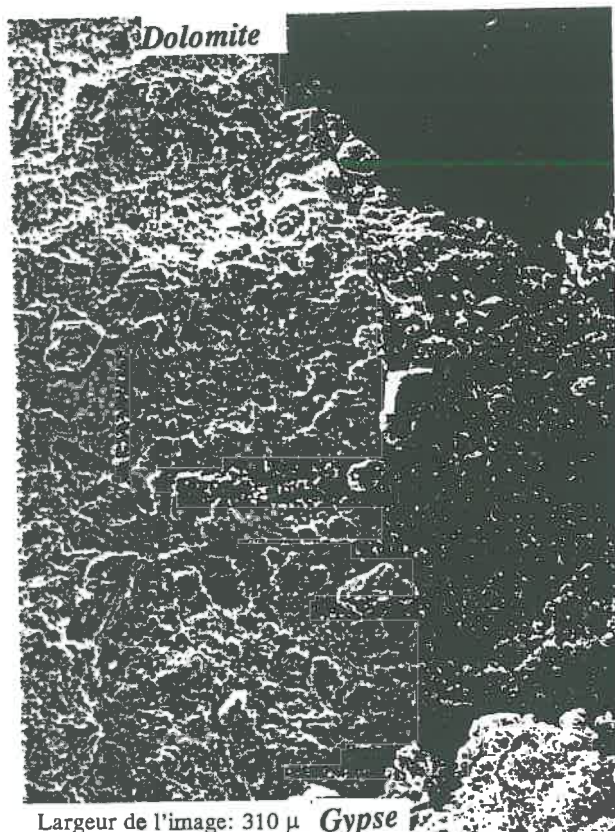


Figure 30. Analyse au MEB d'un échantillon de sol (L2, 0-25 cm).



Figure 31. Analyse au MEB d'un échantillon de sol (L2, 0-25 cm)-
Agrandissement de l'amas gypseux.

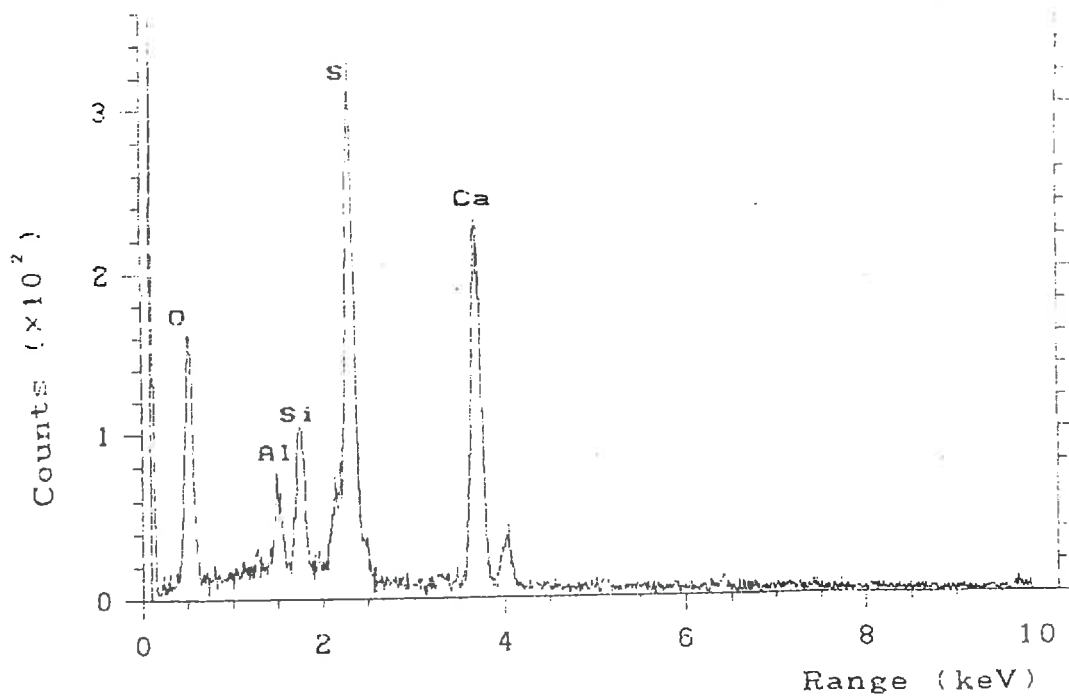
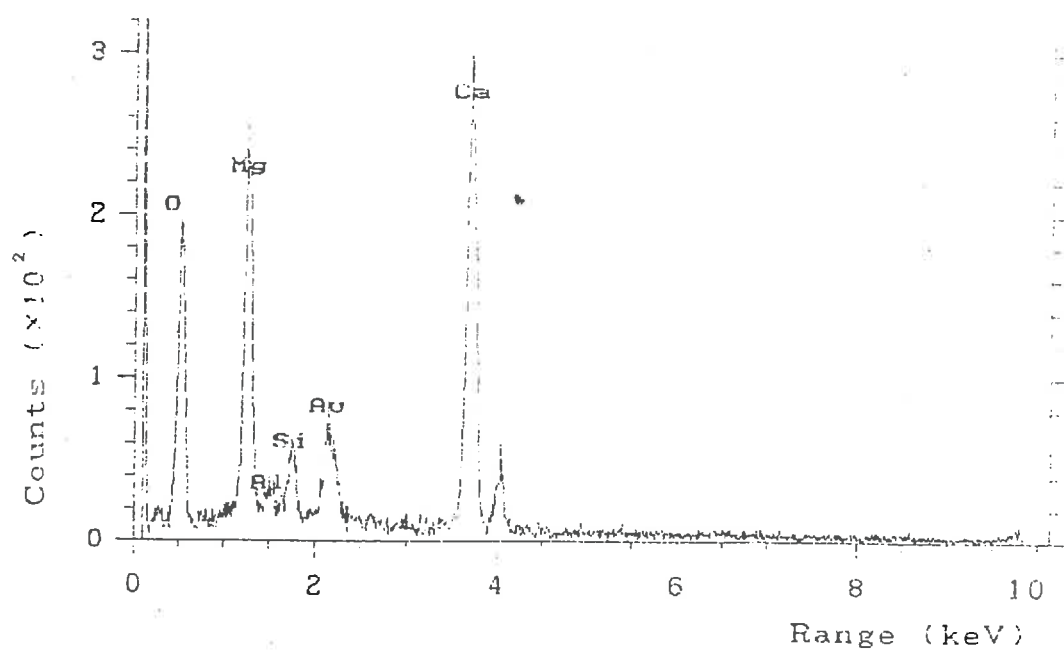


Figure 32. Analyse au microsonde de l'amas gypseux- Echantillon de sol (L2, 0-25 cm).

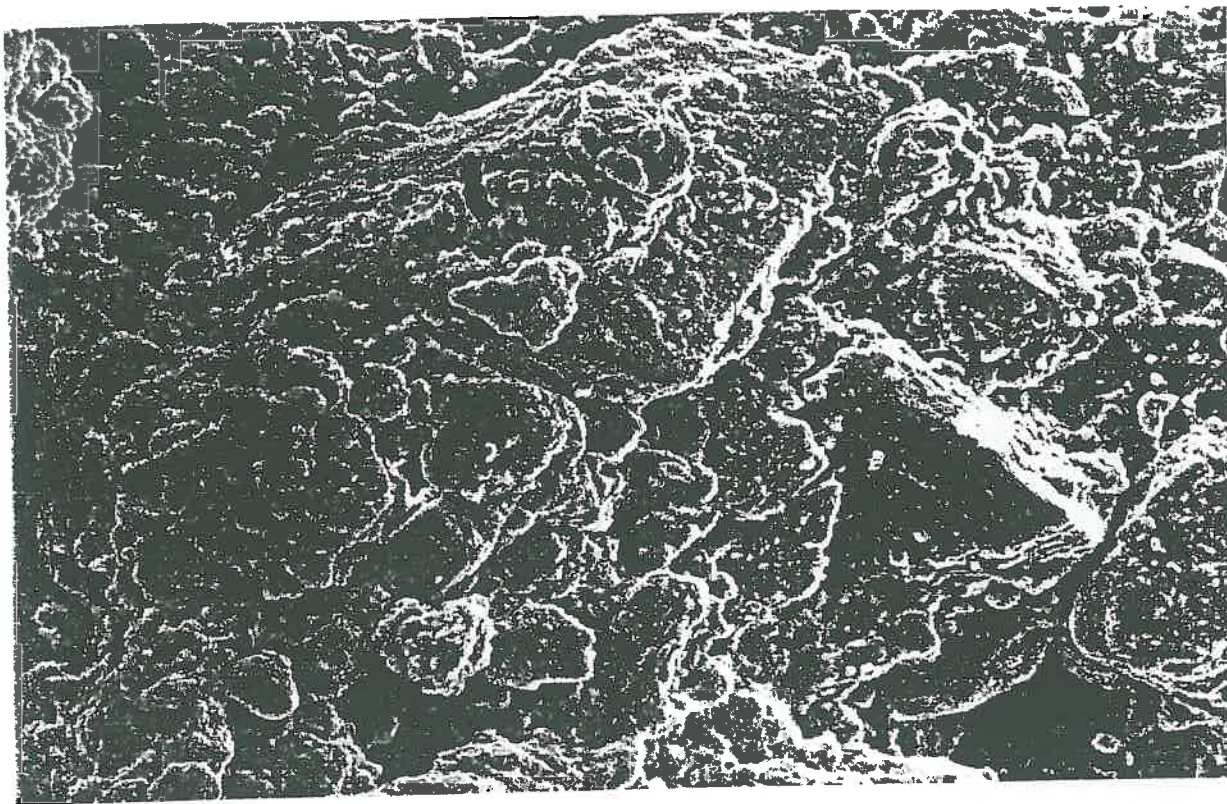


G: 1000 Largeur de l'image: 120 μ Dolomite

**Figure 33. Analyse au MEB d'un échantillon de sol (L2, 0-25 cm)-
Agrandissement des cristaux de dolomite.**

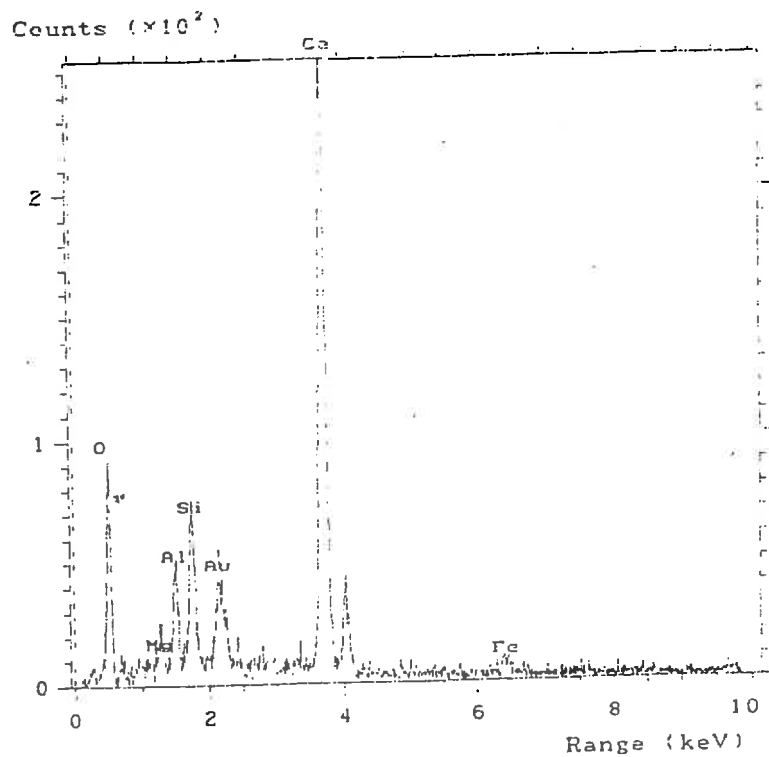


**Figure 34. Analyse au microsonde des cristaux de dolomite-
Echantillon de sol (L2, 0-25 cm).**



G: 775 Largeur de l'image: 150 μ Carbonate de Calcium

**Figure 35. Analyse au MEB d'un échantillon de sol (L2, 0-25 cm)-
Agrandissement de cristaux de calcite.**



**Figure 36. Analyse au microsonde des cristaux de calcite-
Echantillon de sol (L2, 0-25 cm).**

Ainsi, les observations au MEB mettent en évidence trois types de cristaux qui traduisent la genèse des sols de la région et leur évolution. Les cristaux de dolomite sont des matériaux allochtones transportés depuis l'amont où ils sont fréquents dans le bassin versant. C'est une indication sur l'origine de ces sols. Les cristaux de gypse ou de calcite sont à la fois des indications sur l'origine des matériaux, mais aussi sur l'évolution de ces sols. Ces sels sont des constituants des alluvions. Après dépôt, ils peuvent acquérir des formes différentes selon les processus auxquels ils sont soumis et leur intensité (halomorphie et hydromorphie).

II.2. Variabilité des paramètres d'organisation et de comportement hydrique des sols

II.2.1. Variabilité des paramètres d'organisation

L'étude géostatistique des principales propriétés physico-chimiques de ces formations alluvionnaires permet d'analyser leur structure et leur variabilité spatiale. Les paramètres analysés à différentes échelles et à des pas de mesures de plus en plus petits peuvent améliorer notre connaissance des sols et de leur variabilité afin de pouvoir élaborer les règles nécessaires à leur meilleure gestion. L'analyse globale de la texture permet de distinguer des 'Unités Fonctionnelles Homogènes' qui guident dans le choix des transects le long desquels les propriétés physiques et hydriques sont mesurées.

II.2.1.1. Organisation spatiale des sols: mise en évidence d'unités texturales homogènes

La répartition des fractions granulométriques analysées au niveau de 144 sites de prélèvements sur plus de 1400 ha selon un maillage assez régulier (200 m x 280 m), se révèle selon la méthode de Freeze (1975), hétérogène et non uniforme (loi de distribution bimodale; Figure 37; Hachicha et al., 1997a).

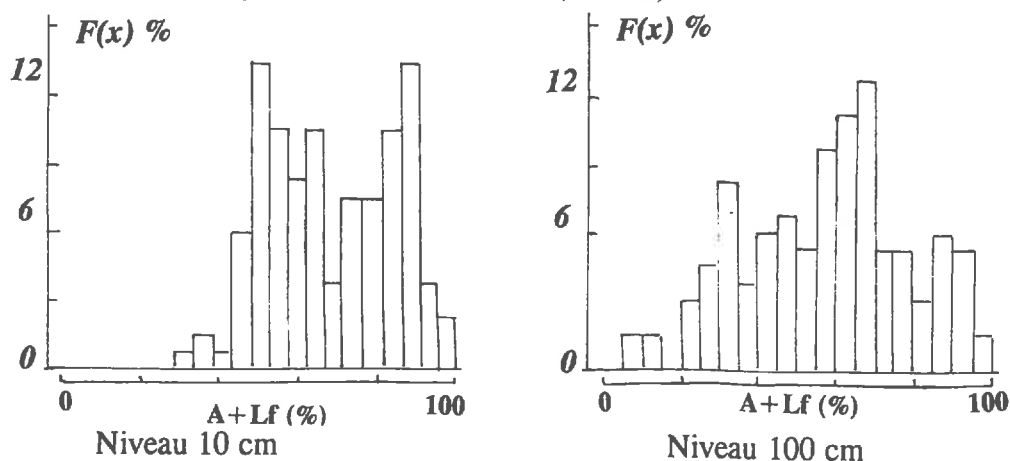
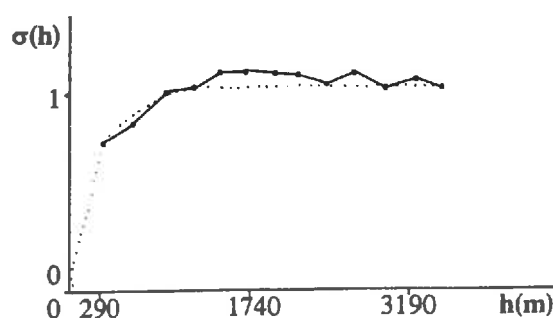


Figure 37. Exemples d'histogrammes des fréquences relatives de la fraction fine (A+Lf).

A tous les niveaux, l'argile et le limon fin sont positivement corrélés entre eux et négativement corrélés aux limon grossier et sable (Analyse en Composante Principale). Les fractions fines (argile et limon fin) sont moins dispersées que les fractions grossières (C.V. <46% contre C.V. >75%). Les variogrammes bruts de l'argile+limon fin révèlent un important effet de pépité (Figure 38). Nous avons imputé ce comportement à l'origine au pas d'échantillonnage élevé de 200 m. Aux variogrammes moyens, nous avons ajusté des modèles sphériques et sphériques+linéaires. Les portées des variogrammes expérimentaux variant de 300 à 800 m, sont très élevées comparativement à celles rapportées dans la littérature. Burrough (1983) a montré que la portée augmente avec l'intervalle d'échantillonnage alors que l'hypothèse de stationnarité était à priori satisfaite.

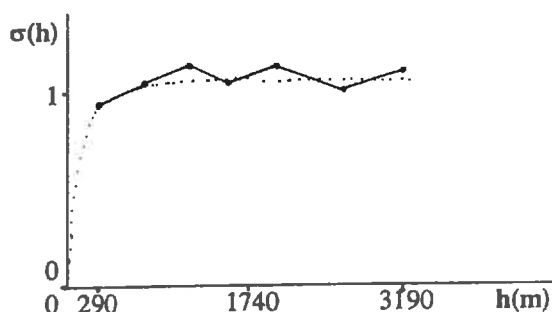
A 10 cm de profondeur
Variance = 262,4



A 150 cm de profondeur
Variance = 413,5



A 200 cm de profondeur
Variance = 489,4



● : points expérimentaux
... : modèle ajusté

Figure 38. Variogrammes moyens bruts normés de l'argile+limon fin déterminés au niveau du périmètre.

Les variogrammes directionnels confirment une légère anisotropie texturale des sols (Figure 39). Les matériaux d'apport suivent un granulo-classement latéral depuis le lit de la Mejerda et en direction de la mer. Les matériaux les plus grossiers se rencontrent plus près du lit de l'Oued (Claude et al., 1976).

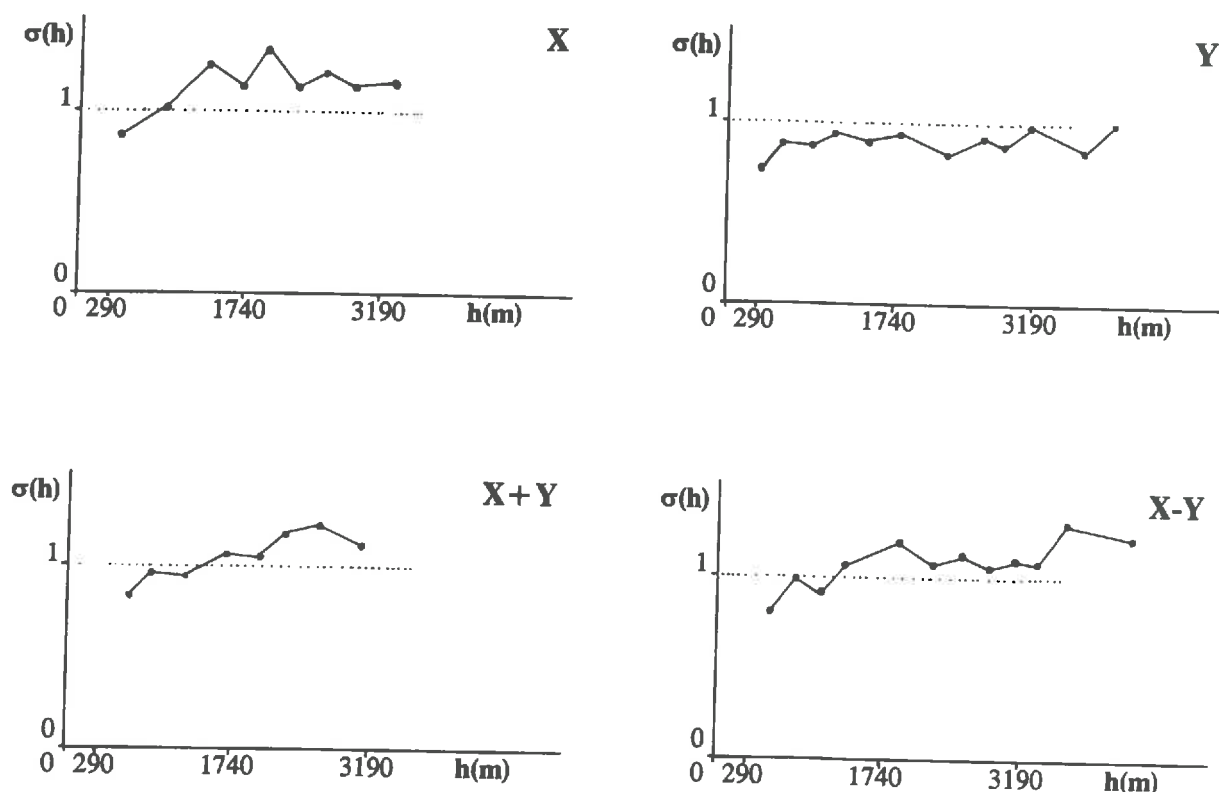


Figure 39. Variogrammes directionnels de la fraction argile+ limon fin- Niveau 10 cm.

La direction X est perpendiculaire à la Mejerda et la direction Y est parallèle à la Mejerda.

Les variogrammes moyens modélisés ont été utilisés pour obtenir des cartes krigées de la fraction fine (Argile+limon fin) pour chaque profondeur. La superposition de ces cartes d'isovaleurs de l'argile+limon fin fait ressortir 5 unités texturales différentes qui ont servi aux choix d'un transect amont-aval pour affiner l'étude de la variabilité et pour observer l'organisation verticale du sol (Figure 40).

LEGENDE

Unité	Symbole	Niveau (cm)				
		10	50	100	150	200
I		+	+	+	+	+
II	.	-	-	-	-	-
III	/	+	+	+	+	-
		+	+	-	-	-
IV		+	+	+	-	+
		+	+	-	-	+
V	\	-	+	+	-	-
		-	-	+	-	-

+ = (A+Lf) > 60% et - = (A+Lf) < 60%

0 600 m

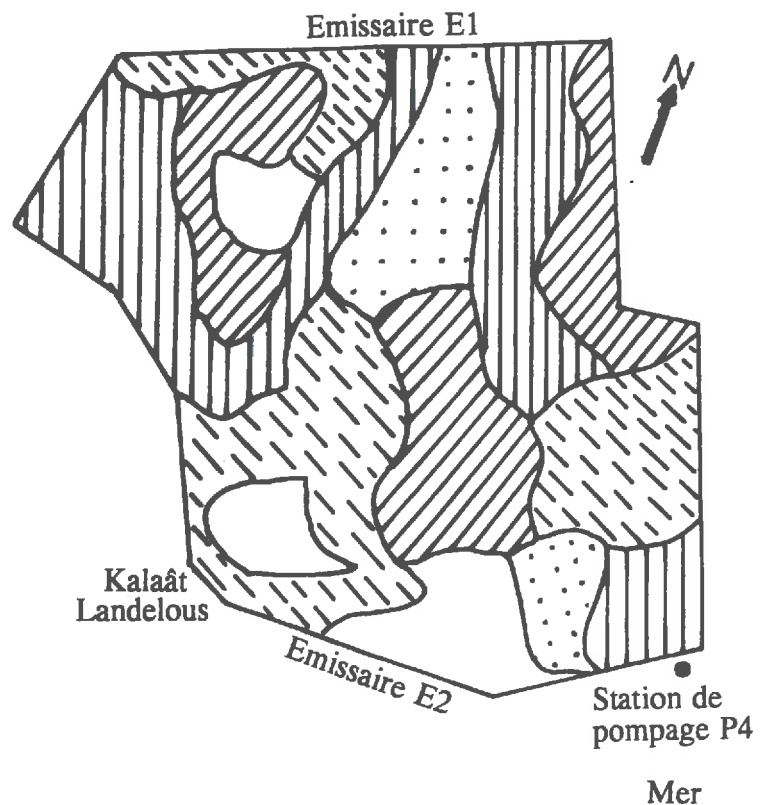


Figure 40. Les unités texturales homogènes.

II.2.1.2. Organisation verticale des sols

Pour élucider la contribution du pas d'échantillonnage sur l'important effet de pépité constaté précédemment, nous avons analysé sur deux transects (T1 et T2) et à des pas d'échantillonnage différents (200 m et 20 m), des paramètres d'organisation et de comportement hydrique des sols: texture, densité apparente et perméabilité selon deux méthodes.

Eu égard aux observations pédologiques, la couche 0-70 cm, est formée d'un matériau assez homogène. Située à plus de 70 cm du niveau des drains enterrés (140-170 cm de profondeur), cette couche échappe à l'effet direct de la nappe. Sur le plan agronomique, c'est celle qui conditionne le type et le rendement des cultures. Ces considérations ont été à la base du choix de cette couche sur le transect T1. Les mesures ont porté sur les niveaux 10 cm, 30 cm et 70 cm.

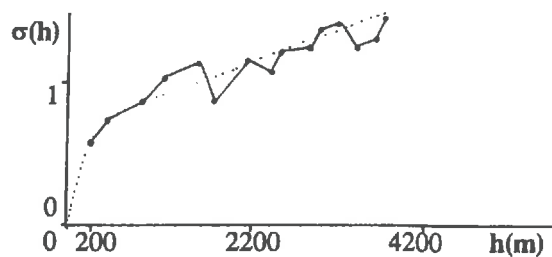
Sur ce transect T2 (500 m de long, 26 sites), la texture apparaît homogène non uniforme pour l'argile+limon fin. La variabilité est moyenne pour l'argile+limon fin (C.V.=24%; Tableau 18). Elle est du même ordre de grandeur que celle obtenue pour l'ensemble du périmètre à 10 cm de profondeur (0-20 cm; C.V.=24%) et à 50

cm (40-60 cm; C.V.=29%). Le passage à des pas de mesure de 20 m sur le mini-transect T2 n'a pas permis de réduire la variabilité observée sur T1 (23%). En dépit des mesures rapprochées, la fraction argile+limon admet une structure spatiale mais possède une pépite élevée même à de courtes distances (Figure 41).

Tableau 18. Paramètres statistiques de la fraction argile+ limon fin à l'échelle du périmètre et à différents pas de mesures (transects T1 et T2).

Lieu	Nombre	Min.	Max.	Moy.	C.V(%)	Loi de distribution
Périmètre - 10 cm (0-20)	144	29	98	68	24	Normale
Périmètre - 50 cm (40-60)	144	7	99	68	29	Normale
Transect T1 (0-70 cm)	81	27	96	69	24	Normale
Transect T2 (0-70 cm)	78	42	96	70	23	Normale

Sur le transect T1
Variance=282



Sur le transect T2
Variance=258

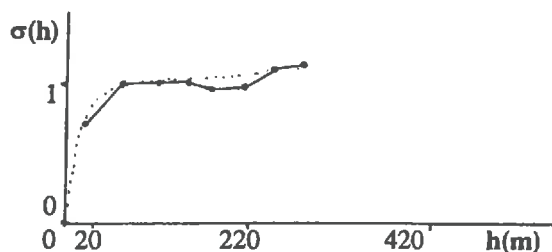


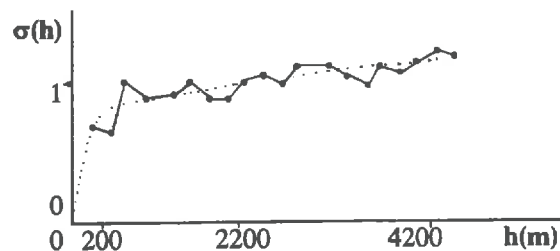
Figure 41. Variogrammes moyens bruts normés de l'argile+ limon fin au niveau des transects T1 et T2 (0-70 cm).

La densité apparente déterminée par la méthode des cylindres, présente une faible variabilité, entre 8 et 10% (Tableau 19). C'est une caractéristique des variables statiques (Vauclin, 1982). La moyenne est du même ordre de grandeur sur T1 et sur T2. D'après les variogrammes expérimentaux, les structures sur les deux transects ne semblent pas fondamentalement différentes (Figure 42). En dépit des mesures rapprochées, la variabilité n'est pas atténuée.

Tableau 19. Paramètres statistiques de la densité apparente (méthode des anneaux) à différents pas de mesures (transects T1 et T2).

Lieu	Nombre	Min.	Max.	Moy.	C.V(%)	Loi de distribution
Transect T1 (0-70 cm)	81	1,13	1,76	1,50	10	Normale
Transect T2 (0-70 cm)	78	1,12	1,81	1,57	8	Normale

Sur le transect T1
Variance=0,018



Sur le transect T2
Variance=0,016

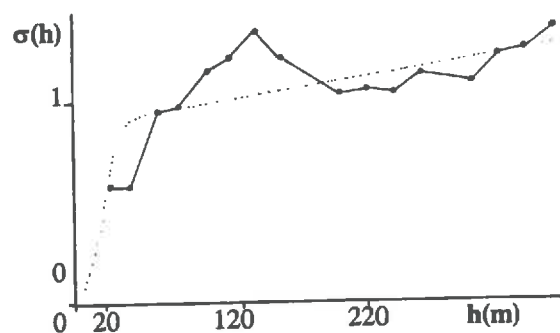


Figure 42. Variogrammes moyens bruts normés de la densité apparente sur les transects T1 et T2.

II.2.2. Variabilité des paramètres de comportement hydrique

Pour caractériser la variabilité du comportement hydrique des terres de ce périmètre, nous avons étudié la conductivité hydraulique à saturation de ces formations alluvionnaires par deux méthodes différentes et à différents pas d'échantillonnage: la méthode de Müntz pour la mesure de surface de la vitesse d'infiltration à saturation et la méthode de Porchet pour la mesure de la perméabilité des sols entre 0 et 70 cm (Hachicha et al., 1996c).

Les perméabilités s'ajustent sur des lois log-normales. La moyenne de la perméabilité Müntz est d'environ 3,46 cm/h sur T1 et d'environ 1,73 cm/h sur T2. Leur dispersion est moyenne à forte (Tableau 20). Elle est toujours plus faible sur le transect T2 comme c'est le cas pour les fractions granulométriques et la densité apparente (C.V. = 156% sur T1 et seulement à 69% sur T2).

Selon la méthode de Porchet, la valeur moyenne de la perméabilité est de 1,59 cm/h avec un C.V. égal à 87% sur T1. Cette moyenne s'élève sur T2 à 2,24 cm/h mais la série est moins dispersée; C.V. égale à 67%.

Tableau 20. Valeurs moyennes et coefficient de variation des perméabilités (cm/h).

Perméabilité	T1			T2		
	Nombre	Moyenne	C.V(%)	Nombre	Moyenne	C.V(%)
Müntz	27	3,46	156	26	1,73	69
Porchet	27	1,59	87	26	2,24	67

Ainsi, selon les tendances moyennes et leur dispersion, le **modèle d'organisation de ces sols** serait le profil-type suivant:

- de 0 à 20 cm: horizon argilo-limoneux à structure polyédrique anguleuse;
- de 20 à 120 cm: horizon plus argileux à structure prismatique;
- de 120 à 140 cm: horizon limono-sableux à structure fondue;

- de 140 à 170 cm: horizon limono-argileux fin à structure polyédrique anguleuse fine.

Ce profil-type et ses caractéristiques présentent une variabilité moyenne pour les paramètres statiques (granulométrie et densité) et élevée pour les caractères dynamiques (perméabilité).

Le comportement hydrique de ces sols repose sur une texture homogène non uniforme pour l'argile et le limon fin et hétérogène pour le limon grossier et le sable.

III. CARACTERISATION DE LA SALURE DES SOLS

Nous allons caractériser la distribution des sels au niveau de ces mêmes profils et définir la variabilité de la salure. Les phénomènes liés à la salure des sols seront traités plus en détail dans les chapitres suivants.

III.1. Typologie de la distribution des sels

La salinité (CEe= Conductivité Electrique de l'extrait de pâte saturée, méthode USSS, 1954) croît généralement en profondeur donnant lieu à des profils salins descendants (Type D selon Servant, 1975). Les mécanismes opposés de salinisation et de désalinisation s'expriment aussi entre la surface et la base du profil donnant lieu à des profils à ventre salin (Type B). La salure est alors maximale vers 1 m de profondeur. La variabilité de la CEe est très élevée (Tableau 21). Le pH de la solution du sol (pH eau 1/2,5) varie entre 7,9 et 8,6. La valeur moyenne de 8,3 est assez centrée. Le C.V. est de seulement 2,2%.

Tableau 21. Conductivité électrique et pH caractéristiques (9 profils).

Nombre d'échantillons	CEe (dS/m)		pH eau (1/2,5)	
	Moyenne	C.V(%)	Moyenne	C.V(%)
52	5,7	108	8,3	2,2

Les horizons superficiels sont plus riches en ions calcium et sulfates. A proximité de la nappe, la solution du sol s'enrichit en chlorure et en sodium. Les chlorures représentent 40 à 72 % de la somme des anions et le sodium 43 à 64 % de la somme des cations. Les faciès géochimiques sont chlorurés sodiques et dans quelques cas chloruro sulfatés sodiques ou sulfatés calciques surtout près de la surface du sol (Bach Hamba, 1992).

Pour la plupart des profils, la solution du sol est sur-saturée vis-à-vis du gypse. Elle évolue dans le sens d'une saturation vis-à-vis de la mirabilite et de la halite en profondeur. Au niveau des bases échangeables (mesurées), le calcium représente 45 à 90 % de la capacité d'échange cationique. La proportion de sodium est très variable: 2 à 28 %, celle du magnésium n'est que de 2 à 10 %.

La salinité initialement reliée aux matériaux, a évolué sous l'effet de la pluie et de la nappe salée. Au cours de leur décantation et de la concentration des eaux, les matériaux fins qui se sont déposés les derniers lors d'une crue étaient certainement les plus salés. Par ailleurs, l'horizon superficiel subit entre l'été et l'hiver une désalinisation dont l'intensité est variable d'un site à un autre. L'évolution saisonnière des profils salins dépend pour les autres profondeurs de la distribution verticale de la texture. Actuellement, certains profils salins se sont secondairement salinisés en surface dans les parcelles irriguées. Ainsi, la salinité des horizons n'est pas dépendante de la salinité des matériaux originels (Tableaux 22 et 23). Même la tendance des matériaux limono-sableux à structure fondue à être plus salés est plus attribuable à leur localisation à la base des profils. Il faut remarquer que ces relations ne sont pas simples. La genèse de chaque structure est plus ou moins dépendante de la nappe.

Tableau 22. Conductivité électrique et pH caractéristiques par texture (9 profils).

Texture	Nombre d'échantillons	CEe (dS/m)		pH (1/2,5)	
		Moyenne	C.V. %	Moyenne	C.V. %
Af	1	0,9		8,5	
A	4	2,9		8,3	
Al	23	5,3	117	8,2	2,4
Laf	7	5,4		8,2	
La	6	6,6		8,3	
Lfa	1	1,2		8,5	
Las	1	2,1		8,4	
Lf	1	6,1		8,5	
L	2	9,5		8,4	
Ls	3	14,3		8,4	
Lts	2	7,4		8,2	

Tableau 23. CEe et pH caractéristiques par structure.

Structure	Nombre d'éch.	CEe (dS/m)		pH	
		Moyen.	C.V. %	Moyen.	C.V. %
Prismatique	9	5,6	146	8,3	2,5
Polyédrique + Prismatique	11	4,1	124	8,2	2,3
Polyédrique + cubique	8	7,8	89	8,2	2,3
Polyédrique	9	2,6	84	8,1	1,9
Polyédrique + Fondue	7	7,0	83	8,3	1,9
Fondue	5	11,5	82	8,4	2,1

III. 2. Variabilité de la salure des sols

Cette variabilité a été examinée uniquement à l'échelle du périmètre. La conductivité électrique (CEe) d'échantillons de sol prélevés dans l'ensemble du périmètre (144 sites, octobre-novembre 1989) présente une distribution log-normale à 10, 100 et 150 cm (Hachicha et al., 1997a). Le coefficient de variation de la salinité du sol est élevé. En particulier pour les horizons de surface, C.V. est compris entre 52 et 76%.

Les variogrammes moyens de la CEe indiquent une meilleure structure spatiale en profondeur. La portée d'environ 300 m en surface devient sans limite en profondeur. En dessous de l'horizon de surface, ce comportement à l'origine ne dépasse guère 20% de la variance totale (Figure 43). L'augmentation de la portée des mesures en profondeur résulte de l'effet de la nappe qui a tendance à uniformiser la salinité et donc à réduire la variabilité de la salinité.

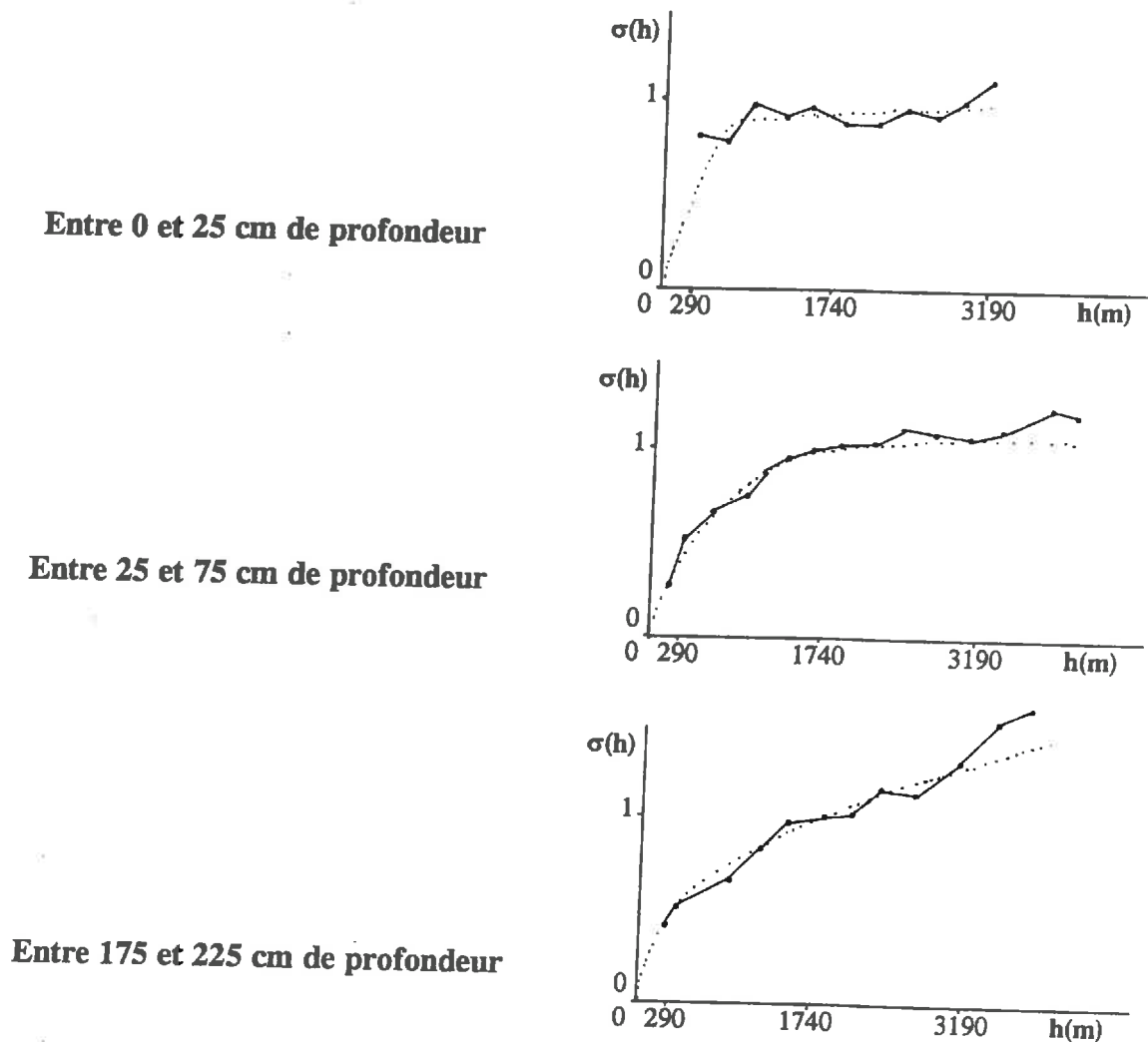


Figure 43. Variogrammes moyens bruts normés et modèles ajustés de la salure du sol déterminés au niveau du périmètre en octobre 1989 (Bach Hamba, 1992).

Les profils salins sont descendants ou à ventre salin. En profondeur, le sol s'enrichit en chlorure et en sodium. Néanmoins, les solutions possèdent une réserve en calcium (gypse) leur évitant la sodisation. Au modèle d'organisation, nous pouvons juxtaposer les caractéristiques chimiques suivantes (printemps 1993):

- de 0 à 20 cm: CE est d'environ 1,5 dS/m;
- de 20 à 120 cm: CE est d'environ 6 dS/m; horizon plus argileux à structure prismatique;
- de 120 à 140 cm: CE est d'environ 7,7 dS/m;
- de 140 à 170 cm: CE est d'environ 8,4 dS/m;

Ce profil salin-type présente une variabilité plus faible en profondeur et en surface mais plus forte aux niveaux intermédiaires soumis à la fois aux effets des précipitations et à ceux de la nappe.

IV. MORPHOLOGIE DES SOLS STRATIFIES DANS LE PERIMETRE - CONSEQUENCES SUR LA DISTRIBUTION DES SELS

Si les sols stratifiés ont fait l'objet de quelques études basées sur leurs caractéristiques physico-hydriques (Hillel, 1988; Mermoud et al., 1991), on a peu décrit leur morphologie et leur effet sur leur fonctionnement. Comme la réussite de la bonification de ce périmètre dépend de la maîtrise du fonctionnement hydrique des sols, nous allons entreprendre une analyse d'une strate limono-sableuse intercalée dans le matériau argilo-limoneux de la plaine afin de procéder ultérieurement à l'étude de son effet sur la dynamique des sels.

Pour définir la morphologie de sols stratifiés, nous nous sommes basés sur les profils pédologiques pour le choix de la zone à prospector. La répartition dans l'espace d'un matériau sableux a été entreprise autour d'un profil caractérisé par une couche à texture grossière (Profil K6). Les sites de prélèvements sont définis au fur et à mesure en fonction des précédentes investigations jusqu'à la disparition de ce matériau. L'échantillonnage définitif est aléatoire et les 134 mesures se répartissent sur 45 ha environ (Figure 44). La salure du sol le long d'un transect a été mesurée et des analyses fines de la variation de la texture et de la salinité ont été entreprises pour délimiter l'extension d'une lentille et mettre en évidence l'effet de la stratification du sol sur la distribution des sels.

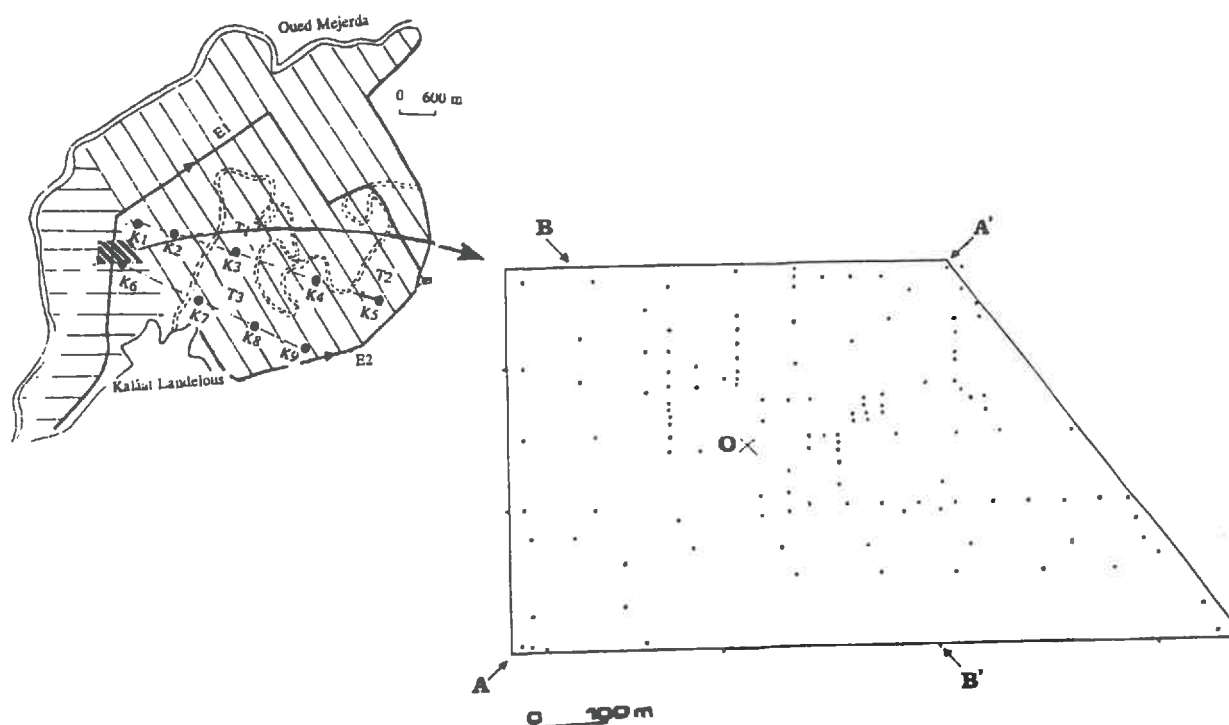


Figure 44. Plan d'échantillonnage pour l'étude de la distribution de la couche limono-sableuse.

IV.1. Caractères morphologiques généraux de la strate

Le matériau étudié est celui qu'on observe au niveau du profil K.6 entre 105 et 125 cm de profondeur (voir description en annexe 4 et analyse en annexe 5). Il s'agit d'un limon très sableux (Triangle de texture, S.C.S., USDA, 1975), très riche en calcaire sous forme de débris de coquilles et à très faible teneur en matière organique. La morphoscopie des grains de quartz sous binoculaire met en évidence des grains à dominance de ronds et luisants et secondairement ronds et mats. Ceci atteste d'une origine à la fois marine et fluviatile. Le profil K.6 illustre l'organisation des matériaux dans le secteur étudié. Synthétiquement, il est formé d'une succession de matériaux argilo-limoneux puis argileux qui deviennent de plus en plus limoneux à limono-sableux entre 105 et 150 cm. Ces deux strates, assez sableuses, reposent sur une argile bleuâtre et compacte.

Sur 134 sites, 90 renferment un horizon limono-sableux entre 117 cm et 141 cm (Tableau 24). Il arrive qu'il apparaisse vers 70 cm ou plus profondément vers 185 cm. Son épaisseur d'environ 23 cm se réduit (quand elle n'est pas nulle) à environ 3 cm comme elle peut atteindre 63 cm. Les variabilités de l'épaisseur du niveau situé au-dessus de cet horizon (L1) et du niveau situé en dessous (L2) sont moyennes (C.V. < 25), celle de l'horizon limono-sableux est élevée (C.V. = 72 %).

Tableau 24. Caractères généraux de la variabilité de l'épaisseur de la strate
(Nombre des sites = 90).

Paramètre	Variable		
	L1	L2	L (=L2-L1)
Moyenne	117.3	140.7	23.4
Médiane	112.5	136.5	20
Mode	100	120	5
C.V.(%)	24.7	17.6	72.2
Min.	70	80	3
Max.	185	195	63
1er quartile (25%)	100	120	10
2ème quartile (75%)	135	160	35

L = épaisseur de la strate limono-sableuse;

L1 = Limite supérieure et L2 = Limite inférieure de cet horizon.

Les cartographies de la limite supérieure (L1) et inférieure (L2) de la strate font apparaître une dépendance qui se manifeste à travers une répartition similaire des plages de matériau à texture grossière (Figures 45 et 46). Sur la carte des zones iso-épaisseur (L), on décèle une légère tendance de variation dans la direction SW-NE (Figure 47). Cependant les variogrammes obtenus par traitement géostatistique ne confirment pas cette tendance. La meilleure structure spatiale correspond à l'axe Sud-Nord parallèle au lit de l'Oued Mejerda. La variation à l'origine reste très élevée malgré des pas de mesure parfois faibles (moins de 10 m).

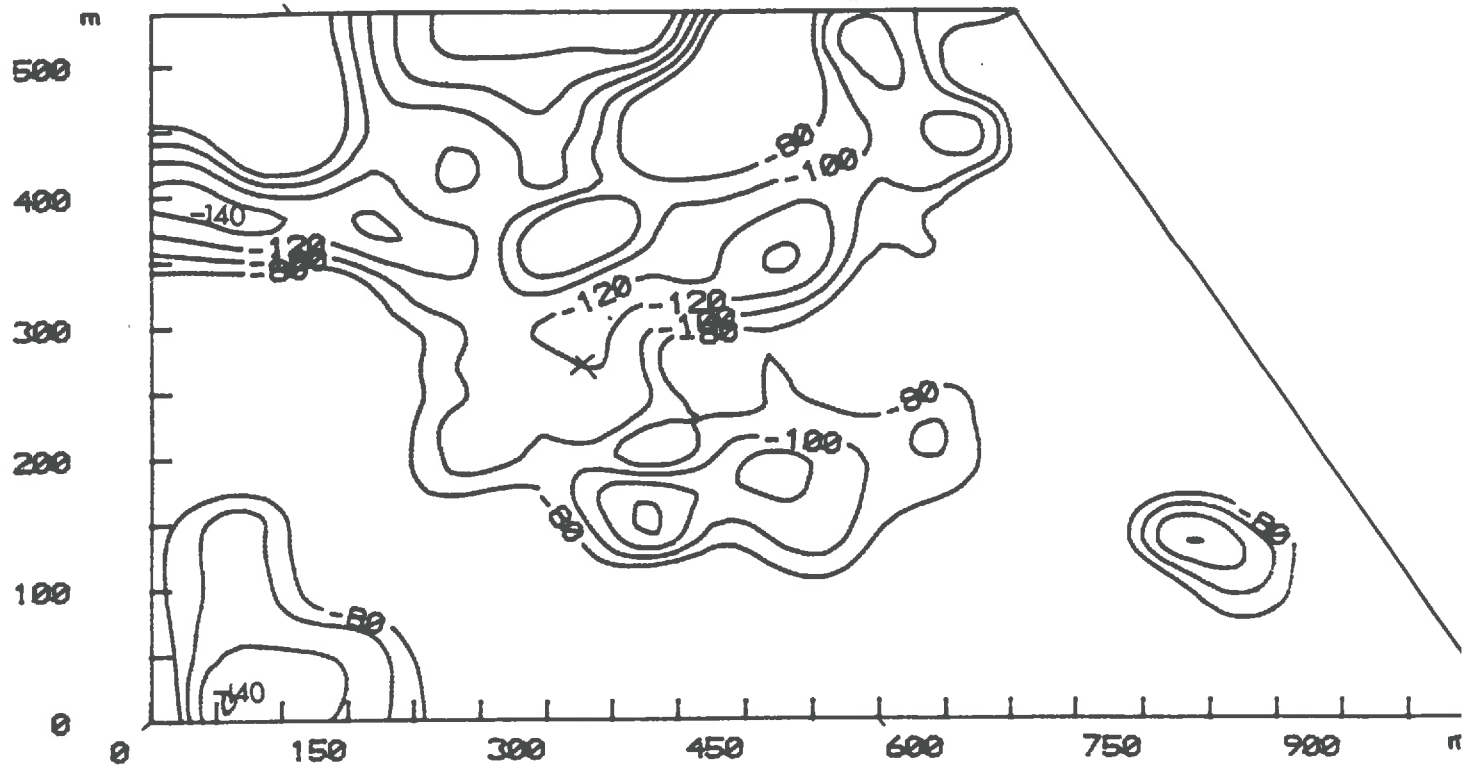


Figure 45. Variation spatiale de la limite supérieure de la strate (L1, en cm^{-1}).

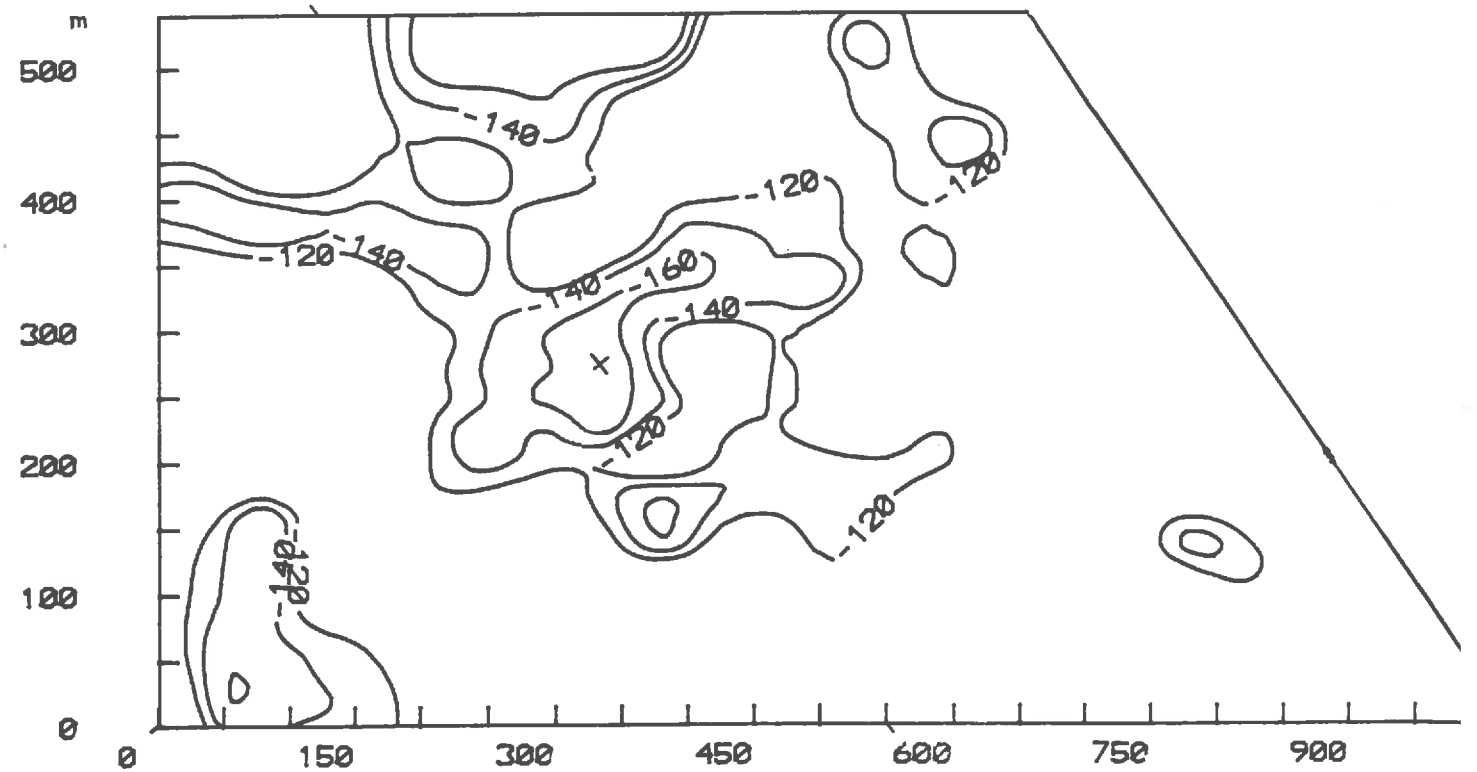


Figure 46. Variation spatiale de la limite inférieure de la strate (L2, en cm^{-1}).

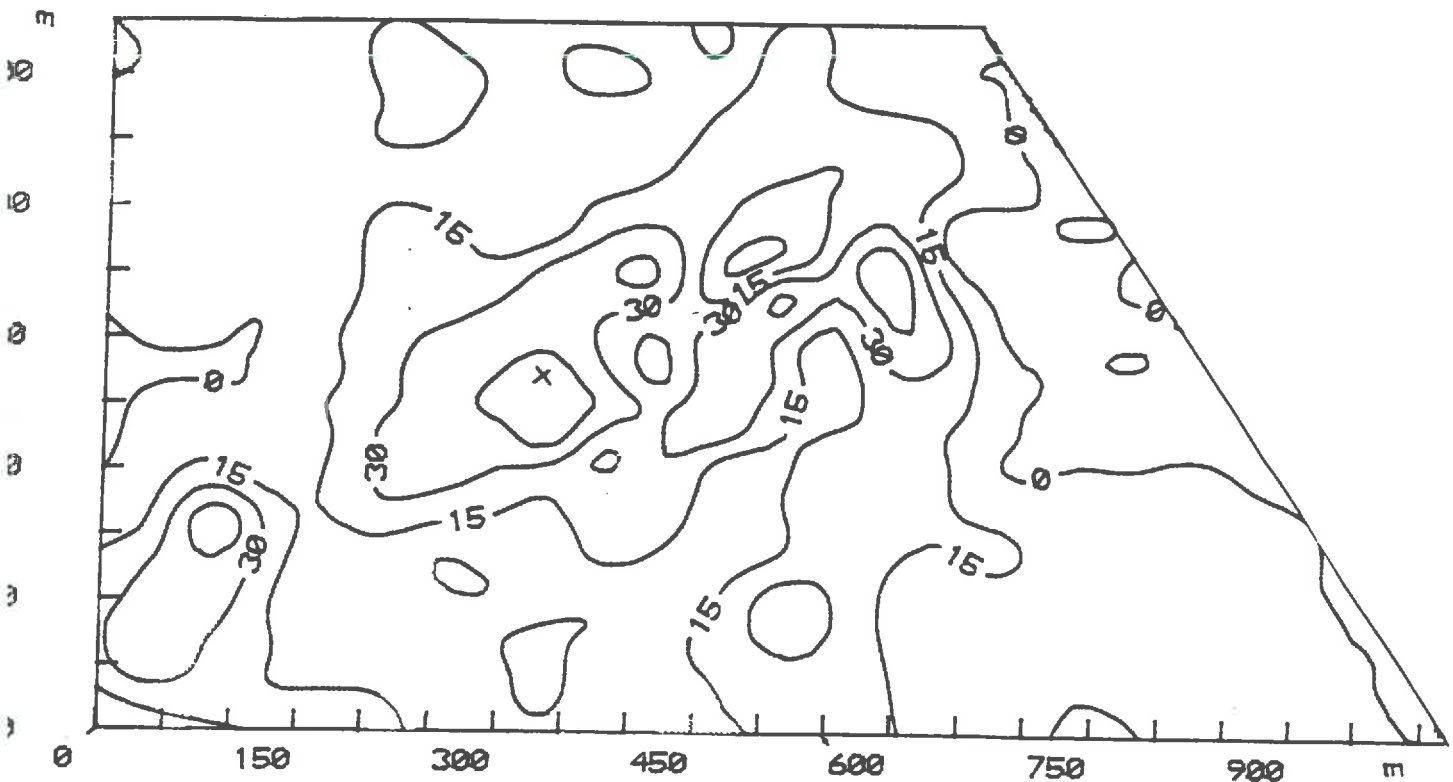


Figure 47. Variation spatiale de la strate (L) - iso-épaisseur en cm.

Pour préciser ces informations, nous avons travaillé le long de deux transects perpendiculaires, le transect AA' de direction SW-NE et le transect BB' orienté NW-SE. Sur le premier transect de 814 m de longueur, l'altitude varie de 4,9 m par rapport au niveau de la mer en A à 4,4 m en A'. Sur le second transect de 685 m de longueur, elle est de 4,3 en B et en B' et s'élève légèrement entre ces points. On constate que plus la limite inférieure L2 s'éloigne de la surface, plus l'épaisseur du matériau grossier est élevée. Si on assimile la limite L2 comme étant, à un moment donné, le niveau superficiel, il en découle que les dépôts grossiers ont alors été plus importants dans les dépressions (Figures 48 et 49). Les limites inférieure et supérieure sont reliées par la relation suivante:

$$L1 = -16,4 + 0,95 \cdot L2 \quad r=0,81 \quad n=90$$

La morphologie allongée de la coupe latérale de cet horizon justifie le terme de lentille fréquemment employé pour désigner ce genre de strate à texture limono-sableuse. La forme concave de la strate est une caractéristique aussi importante que la constitution du matériau. L'épaisseur de la couche à texture grossière est dépendante d'un état antérieur de la topographie.

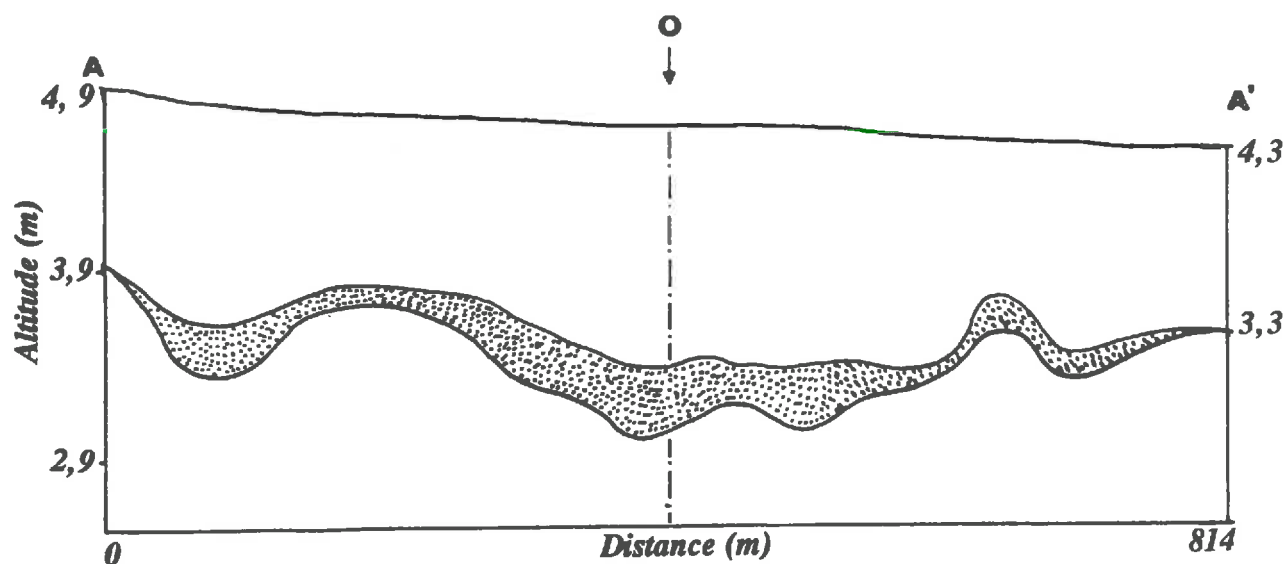


Figure 48. Coupe AA' de la strate.

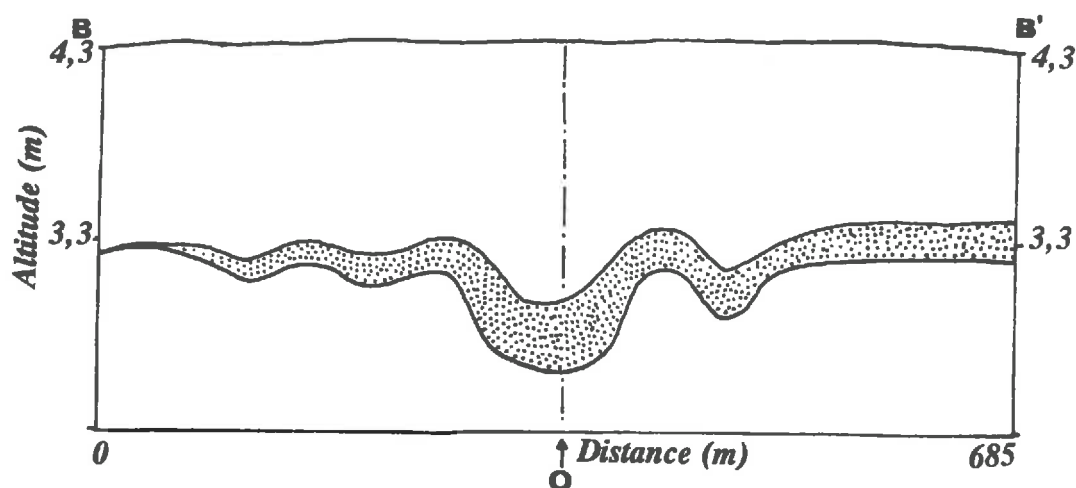


Figure 49. Coupe BB' de la strate.

IV.2. Effet de la stratification sur la distribution des sels

L'effet de la stratification sur la distribution des sels a été recherché sur le transect AA' par la mesure de la CE de l'extrait au cinquième. Les horizons distingués présentent les tendances moyennes suivantes:

- un horizon de surface, de texture argilo-limoneuse (Tableau 25), très riche en calcaire total (43%) dont environ la moitié formé de fraction inférieure à 2 microns. La salinité au cinquième 0,9 dS/m environ est très variable. La variabilité est faible dans les parcelles non irriguées et forte dans celles fréquemment arrosées.

Tableau 25. Caractéristiques statistiques du matériau argilo-limoneux de surface.

Variable	Moy.	Ecart-T.	Min.	Max.	C.V(%)	Nb
Argile (%)	45	10.3	24	73	23	42
Limon fin (%)	30	7.2	15	48	24	42
Limon grossier (%)	12	7.0	2	31	59	42
Sable fin (%)	12	9.7	1	37	84	42
Sable grossier (%)	1	0.6	0	2	86	42
Calcaire total (%)	43	3.5	33	49	10	42
Calcaire actif (%)	21	6.1	7	33	30	42
CE (1/5) en dS/m	0.9	0.5	0.1	2.3	56	42

- En dessous de cet horizon et au-dessus de la strate à texture relativement grossière, un matériau limono-argileux apparaît vers 60 cm. Il est aussi riche que le précédent en calcaire mais moins pourvu en fraction fine. La salinité de l'ordre de 1 dS/m (0,98) est moyennement variable (Tableau 26).

Tableau 26. Caractéristiques statistiques du matériau limono-argileux.

Variable	Moy.	Ecart-T.	Min.	Max.	C.V(%)	Nb
Argile (%)	26	6.7	11	40	26	29
Limon fin (%)	17	6.1	4	30	36	29
Limon grossier (%)	22	13.8	3	73	64	29
Sable fin (%)	33	16.2	4	80	49	29
Sable grossier (%)	1	0.8	0	3	80	29
Calcaire total (%)	47	3.1	38	51	7	29
Calcaire actif (%)	13	4.7	6	25	37	29
CE (1/5) en dS/m	0.98	0.30	0.28	1.73	31	29

- L'horizon de la strate dont l'étude est au coeur de ce chapitre possède la texture la plus sableuse, elle est limoneuse à limoneuse très sableuse. Dans ce cas, elle est identique à celle observée dans le profil K6. C'est la texture la moins dispersée (Tableau 27). Le taux de calcaire y est similaire à celui des autres horizons, cependant la fraction fine ne dépasse guère les 20% du total. La salinité de cet horizon est plus faible que précédemment (CE=0,82 dS/m) et faiblement variable dans l'espace.

Tableau 27. Caractéristiques statistiques du matériau limoneux (Triangle USDA).

Variable	Moy.	Ecart-T.	Min.	Max.	C.V(%)	Nb
Argile (%)	22	5.4	14	12	25	12
Limon fin (%)	15	9.0	1	30	62	12
Limon grossier (%)	17	9.3	5	31	54	12
Sable fin (%)	44	13.5	29	72	30	12
Sable grossier (%)	1	0.8	0	3	62	12
Calcaire total (%)	47	4.2	38	54	9	12
Calcaire actif (%)	9	5.3	1	18	61	12
CE (1/5) en dS/m	0.82	0.11	0.72	1.17	13	12

- L'horizon en dessous de la strate, se situe vers 1,50 m. Il est limono-argileux (Tableau 28) mais cette composition est fortement variable sur le transect (C.V. > 50%). La salinité très dispersée s'élève à environ 1 dS/m (0,99).

Tableau 28. Caractéristiques statistiques du matériau limono-argileux fin.

Variable	Moy.	Ecart-T.	Min.	Max.	C.V(%)	Nb
Argile (%)	30	13.8	12	63	46	20
Limon fin (%)	22	13.9	1	50	60	20
Limon grossier (%)	15	12.0	3	39	80	20
Sable fin (%)	32	24.8	1	72	79	19
Sable grossier (%)	1	2	0	9	20	19
Calcaire total (%)	45	5.6	32	56	13	19
Calcaire actif (%)	15	9.6	3	35	64	18
CE (1/5) en dS/m	0.99	0.49	0.25	1.94	50	20

Il faut remarquer que le calcaire est réparti de manière très homogène dans le matériau argilo-limoneux et limono-argileux. Le C.V < 13% est faible. L'horizon à texture limoneuse apparaît légèrement moins salinisé que les horizons plus argileux qui l'encadrent (Figure 50). On obtient des corrélations très significatives entre la salinité de cet horizon et celles des 20 premiers cm des horizons qui l'enveloppent (Tableaux 29 et 30). Cette dépendance traduit l'effet qu'exerce cette strate sur la continuité du flux des solutés et à fortiori sur l'écoulement de l'eau. La salinité élevée des 20 premiers cm de l'horizon sus-jacent résulte probablement de la formation d'une nappe perchée temporaire dans l'horizon limono-sableux qui au cours du dessèchement en surface, transfère par ascension capillaire des sels à la frange sus-jacente plus argileuse.

Tableau 29. Caractérisation de la salinité de la strate.

CE(1/5)	Moy.	Ecart-T.	Min.	Max.	C.V(%)	Nb
10 cm au-dessus de la strate	1.01	0.13	0.87	1.31	13	11
au niveau de la strate	0.82	0.11	0.72	1.17	13	12
10 cm au-dessous de la strate	1.05	0.55	0.32	1.94	52	10

Tableau 30. Corrélations entre les salinités ($Y=a+b \cdot X$).

Y = CE(1/5)	X = CE(1/5)	a	b	r	Nb
10 cm au-dessus de la strate	de la strate	0.45	0.68	0,82	11
10 cm au-dessous de la strate	de la strate	-0.52	1.90	0,59	10

En piégeant les sels au sein de ses vides, la strate tamponne la remontée des sels de l'horizon sous-jacent très salinisé sous l'effet direct de la nappe. Celle-ci, située dans le secteur étudié à environ 2,5 m de profondeur, avait au cours de l'été 1994 un résidu sec d'environ 14 g/l. En hiver, l'infiltration de l'eau s'arrête à la base de ces niveaux à texture plus grossière ce qui profite à l'écoulement latéral. Les concavités peuvent perturber cet écoulement. Les niveaux sont ainsi plus saturés et plus salinisés favorisant la formation d'une nappe perchée temporaire qu'attestent les taches d'oxydo-réduction observables uniquement au niveau des 20 cm dans l'horizon en dessous.

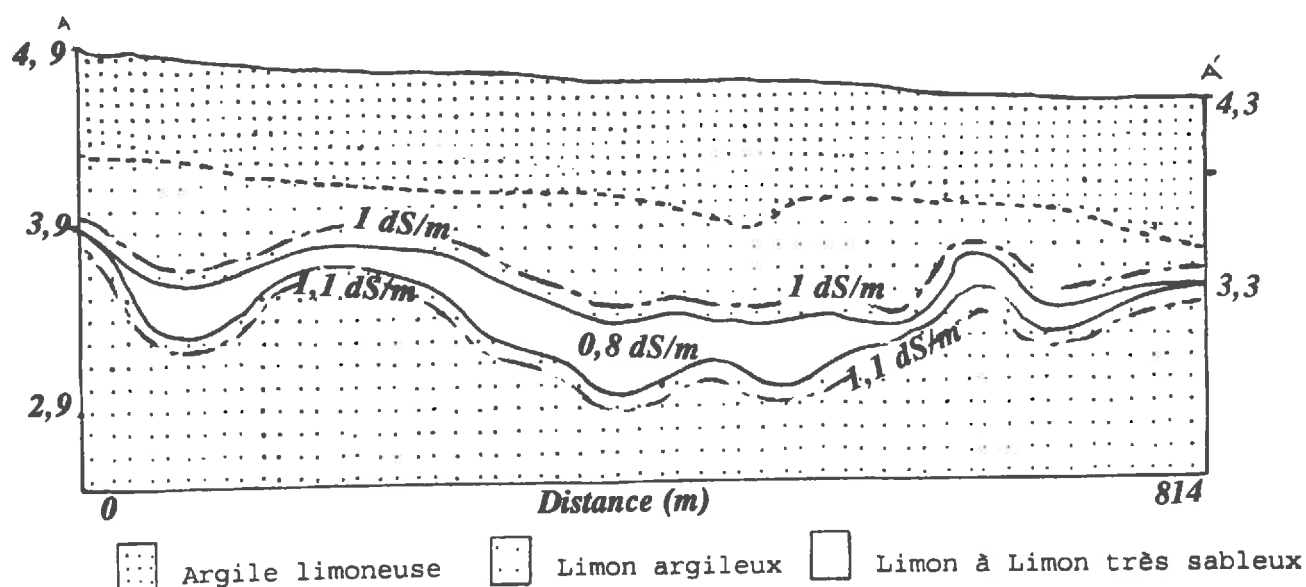
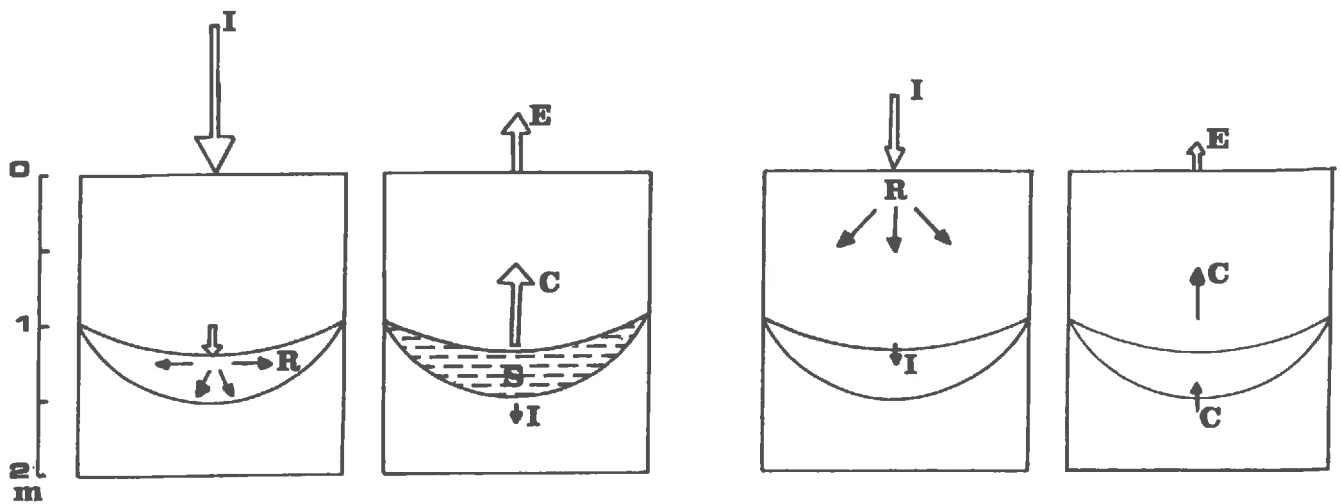


Figure 50. Organisation texturale et distribution de la salinité le long du transect AA'- CE(1/5) en dS/m.

Tenant compte des propriétés conductrices du sol, on peut proposer les mécanismes d'intervention des strates dans la salinisation des sols (Tableau 31). Les principes du modèle sont illustrés dans les figures 51a et b, en considérant le cas d'une gestion efficace des eaux d'irrigation et le cas d'un emploi abusif de cette eau.

Tableau 31. Régimes hydrique et salin générés par la lentille au cours d'un cycle d'irrigation.

Régime d'irrigation	Régime hydrique	Régime salin
Dose et fréquence excessives	Phase 1: -Infiltration (I) -Redistribution au niveau de la strate (R)	-Lessivage des sels -Redistribution des sels
	Phase 2: -Saturation de la strate (S) -Infiltration en dessous (I) -Remontée capillaire (C) -Evaporation (E)	-Saturation des solutions -Lessivage des sels -Remontée des sels -Accumulation des sels
	Flux évaporatif depuis la strate élevé \Rightarrow remontée des sels importante \Rightarrow salinisation des sols	
Dose et fréquence adéquates	Phase 1: -Infiltration (I) -Redistribution au niveau de la strate (R)	-Lessivage des sels -Redistribution des sels
	Phase 2: -Légère infiltration vers la strate -Remontée depuis la couche sous jacente (C) -Remontée vers la couche sus jacente (C) -Evaporation (E)	-Lessivage vers la strate -Remontée des sels vers la strate -Remontée des sels à la surface -Accumulation des sels
	Flux évaporatif depuis la strate négligeable \Rightarrow remontée des sels faible \Rightarrow salinisation modérée des sols	



a. Irrigation excessive

b. Irrigation adéquate

I: infiltration; R: redistribution; C: remontée capillaire; E: évaporation réelle; S: zone saturée

Figure 51. Principes du modèle de fonctionnement de la strate.

Ainsi, l'analyse de la strate limono-sableuse localisée dans le matériau argilo-limoneux met en évidence la morphologie lenticulaire de ce dépôt. Sur une zone étudiée de 45 ha environ, la strate couvre plus d'une quinzaine d'hectares. Sa mise en place apparaît dépendante de la topographie actuellement enterrée à 1 m sous les dépôts. Plus la microdépression était grande, plus cette épaisseur était élevée.

La strate constitue un réservoir pour les eaux qui s'infiltrent. Ceci est confirmé par la distribution des sels au-dessus et au-dessous de cette strate. Les salinités en ces niveaux sont corrélées avec celle de la strate.

La stratification intervient ainsi dans la distribution des sels dans ces sols mis récemment en irrigation. Elle favorise la salinisation quand les irrigations sont excessives. Elle l'atténue par la réduction de la remontée capillaire des sels, si les irrigations assurent juste la saturation de la couche située au-dessus de la strate. Les sels accumulés en été dans la strate rejoignent la nappe au cours de l'hiver.

Ces interprétations émanent d'hypothèses qu'il faut vérifier expérimentalement sur la base des lois hydrodynamiques.

V. CONCLUSION

Selon l'analyse de l'organisations des sols, la répartition des matériaux n'est pas quelconque. Les lois de distribution distinguées confèrent à ces sols une certaine homogénéité et isotropie plus nettes pour certaines propriétés. Selon les tendances moyennes et leur dispersion, nous avons défini le modèle d'organisation de ces sols par une profil-type auquel nous avons juxtaposé les salinités caractéristiques. Ce profil-type et ses caractéristiques présentent une variabilité moyenne pour les paramètres statiques et élevée pour les caractères dynamiques qui seront mieux décrits dans les chapitres suivants.

L'analyse de la morphologie de la strate de matériau grossier, de la nature des matériaux et de la distribution des sels met en évidence sa morphologie lenticulaire et son intervention sur la dynamique ascendante et descendante des sels. Cette analyse révèle le rôle de la stratification dans la salinisation de ces sols qui serait à l'avenir fonction du régime des irrigations.

Dans le chapitre suivant, notre intérêt portera sur le fonctionnement des sols dans le système nappe/sol/parcelle, avant et après irrigation, et sous condition pluviale.

Chapitre II

LE FONCTIONNEMENT DES SOLS DU PERIMETRE IRRIGUE

La mise en valeur des sols salés à nappe superficielle salée consiste en la réalisation d'un ensemble d'aménagements hydro-agricoles d'assainissement et de drainage. Elle est, dans le cas du périmètre de Kalaât, complétée par un réseau d'adduction d'eau d'irrigation et des stations de pompage. Comme conséquence, le fonctionnement de différents systèmes est très profondément perturbé. Dans ce chapitre, nous porterons notre attention sur le fonctionnement de deux interfaces qui conditionnent l'évolution du sol: le système nappe-sol et le système sol-pluie. L'analyse du premier, sol-nappe, nous informe essentiellement sur l'horizon sous-jacent à l'horizon de labour. L'examen porte, à l'échelle du périmètre, sur l'évolution des caractéristiques de la nappe, de la salure du sol et du bilan des sels. Cette analyse est complétée par un bref examen de la variabilité de la qualité et de la quantité des eaux de drainage et des caractéristiques de la nappe dans un système émissaire/collecteur/ drains/parcelle. L'analyse du second système, sol-pluie, met en évidence l'effet des états de surface dans le comportement des sols sous pluies simulées et la conséquence sur le lessivage des sels et sur le mode d'irrigation. Au préalable, nous allons présenter l'approche employée pour cerner le fonctionnement des sols aux échelles du périmètre et de secteurs.

I. METHODES

Notre analyse a porté sur les relations nappe-sol et sol-pluie. Le comportement des sols sous irrigation et drainage est traité à l'échelle du périmètre en se basant sur la salure des sols et les caractéristiques de la nappe par des mesures semestrielles au niveau d'un réseau de 63 piézomètres à proximité desquels la salure du sol est déterminée.

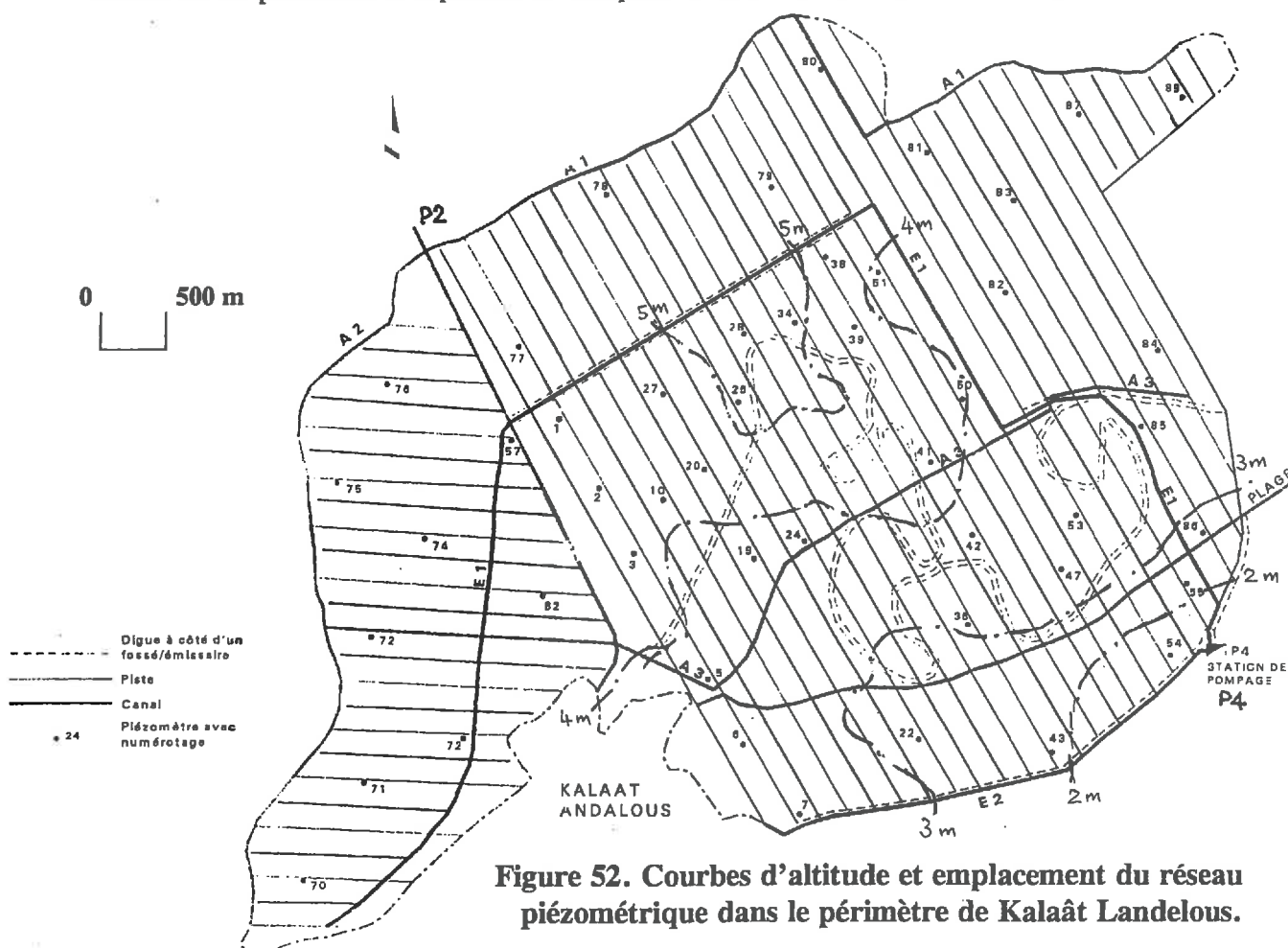


Figure 52. Courbes d'altitude et emplacement du réseau piézométrique dans le périmètre de Kalaât Landelous.

Pour les caractéristiques des eaux de drainage, les mesures ont été entreprises sur la qualité et le débit des eaux de drainage en avril-mai 1993 dans les émissaires E1 et E2, et dans certains collecteurs secondaires et quelques drains tertiaires. Le bilan des sels est déduit du suivi des entrées et des sorties des sels au niveau de la station P2 pour les eaux d'irrigation et de la station P4 pour les eaux de drainage.

Le comportement des sols sous pluie simulée est traité par des essais réalisés en automne sur des parcelles irriguées durant tout l'été permettant de simuler l'effet des pluies automnales sur ces sols en fonction de différentes pratiques agricoles. Comme l'aspersion est le seul mode d'irrigation, nous avons entrepris les essais pour les sols irrigués par submersion au périmètre de Cebalat Borj-Touil, limitrophe de Kalaât du côté sud.

La simulation de pluie consiste à produire des averses à partir d'un infiltromètre à aspersion (Asseline et al., 1989; Floret et al., 1989). La méthode consiste en la description de l'occupation des terres, la caractérisation des états de surface par la méthode des points quadrats, la mesure de l'infiltration et du ruissellement par des averses simulées et le dépouillement des résultats (Martini et al., 1991). Les essais sont réalisés sur des parcelles échantillons de 1 m² soumises à des pluies d'intensités faibles, moyennes et fortes. Trois séquences d'averses ont été testées:

- séquence P1: présentant des averses de 20, 40 et 80 mm/h pendant 15 mn chacune;
- séquence P2: présentant des averses de 30 puis 60 mm/h pendant 20 puis 15 mn, P2 est réalisée 24 heures après P1;
- séquence P3: averse de 120 mm/h pendant 10 mn juste 15 mn après P2.

On définit ainsi certaines variables dont:

- Dr mm: détention superficielle récupérable = fraction du ruissellement mesurée après l'arrêt de la pluie (très souvent négligeable).
- I mm/h: intensité de la pluie
- Pe mm: pluie efficace = hauteur de la pluie ayant effectivement donné lieu à du ruissellement
- Kre (%): coeff. de ruissellement efficace = $[(Lr + Dr)/Pe] * 100$
- Lr mm: lame ruisselée
- E (g/m²): érodibilité ou détachabilité en g pour 1 m²
- Er (g/mm): érosivité d'un mm d'eau ruisselée = E/Lr
- Pi mm: pluie d'imbibition = $Pu - Pe$
- Fn mm/h: infiltration minimale stabilisée = $I - Rx$
- W mm: lame infiltrée = $Pu - Lr$
- Pu mm: pluie utile = hauteur totale de l'averse
- Kru (%): coeff. de ruissellement utile = $[(Lr + Dr)/Pu] * 100$
- Rx mm/h: intensité maximale de ruissellement

Nous avons effectué deux tests à deux répétitions par périmètre (Kalaât et Cebalat) correspondant à deux états de surface sur lesquels se produisent les pluies précoces d'automne. Dans le premier cas, les pluies surviennent juste après la récolte d'une culture irriguée. Dans le deuxième cas, ces pluies se produisent sur un sol récemment labouré. Pour définir l'infiltration de ces sols sous conditions de saturation, nous avons procédé à côté des essais de simulation, à des mesures de la vitesse d'infiltration par la méthode Müntz sous lame d'eau constante de 3 cm (Colombani et al., 1972).

II. LE FONCTIONNEMENT DU SYSTEME NAPPE-SOL

Le fonctionnement du système nappe-sol est analysé d'abord au niveau de l'ensemble du périmètre. Comme l'évolution de la salure des sols est tributaire du régime de la nappe, l'évolution des caractéristiques de cette dernière sera examinée avant le drainage du périmètre (1953), après drainage et avant la mise en eau (1989-1990) et après l'intensification des irrigations (1992-1996). L'évolution du bilan des sels durant les années 93-96 permettra de confirmer les tendances que révélera l'étude de l'évolution des caractéristiques de la nappe et de la salure du sol. Enfin, une analyse sera réalisée sur la variabilité des caractéristiques des eaux de drainage et de la nappe au niveau du système Emissaire/Collecteur/Drains/Parcelle.

II.1. Analyse au niveau du périmètre de l'évolution des caractéristiques de la nappe et des sols

II.1.1. Evolution des caractéristiques de la nappe en fonction des aménagements

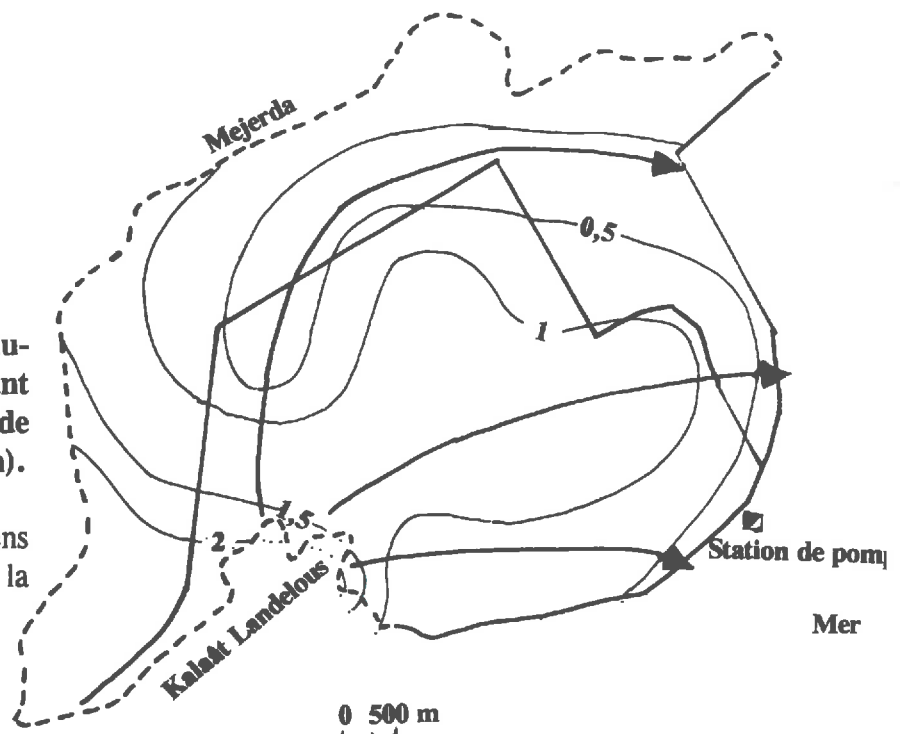
Les aménagements entrepris en 1986 sont achevés en 1991. Ils consistent en un réseau d'assainissement (Emissaires E1 et E2), un réseau de drainage (drains tertiaires enterrés et collecteurs secondaires à ciel ouvert), une station de pompage des eaux de drainage vers la mer (P4), un réseau d'irrigation et enfin une station de pompage des eaux d'irrigation (P2).

II.1.1.1. Evolution du gradient hydraulique avant et après aménagement

Avant l'assainissement, les zones situées près du réseau hydrographique composé des bras morts, étaient bien drainées naturellement. Le gradient hydraulique général était orienté essentiellement vers la mer et vers le lit de la Mejerda (Figure 53).

Figure 53. Gradient hydraulique général de la nappe avant assainissement. Profondeur de la nappe en janvier 1953 (en m).

Les flèches indiquent le sens d'écoulement par rapport à la surface du sol.



Après l'aménagement des drains, l'écoulement a été dévié vers les émissaires principaux (Figure 54). Le drainage des zones des bras morts a été ainsi renforcé. Au gradient hydraulique vers la mer s'est superposé un second gradient qui engendre les niveaux les plus superficiels près des émissaires et près de la station de pompage. Avec la mise en eau, une nouvelle situation s'installe qui s'affirme avec l'intensification des irrigations. Un nouveau gradient hydraulique vers la station de pompage s'instaure. La fonction des bras morts s'estompe progressivement.

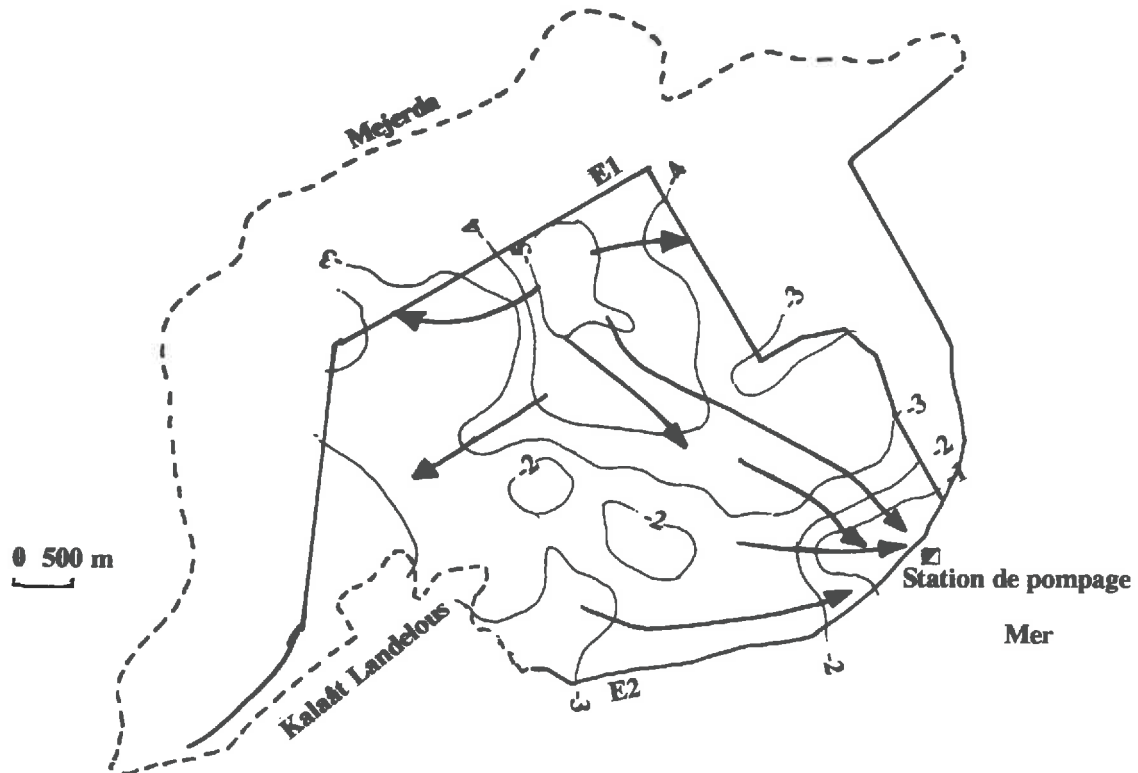


Figure 54. Gradient hydraulique général de la nappe après assainissement et irrigation. Carte d'isopièzes (en -m) en octobre 1994.

Les flèches indiquent le sens d'écoulement par rapport à la surface du sol.

II.1.1.2. Evolution de la profondeur de la nappe

- *Situation avant drainage*: D'après les cartes établies en 1953 par la SCET-Tunisie (1981), le niveau de la nappe fluctuait aux environs de 1 m en hiver (entre 0,5 et 1,5 m) et 1,40 m en fin de l'été (entre 0,7 et 2 m). Dans l'espace, la nappe était très variable (Figure 55).

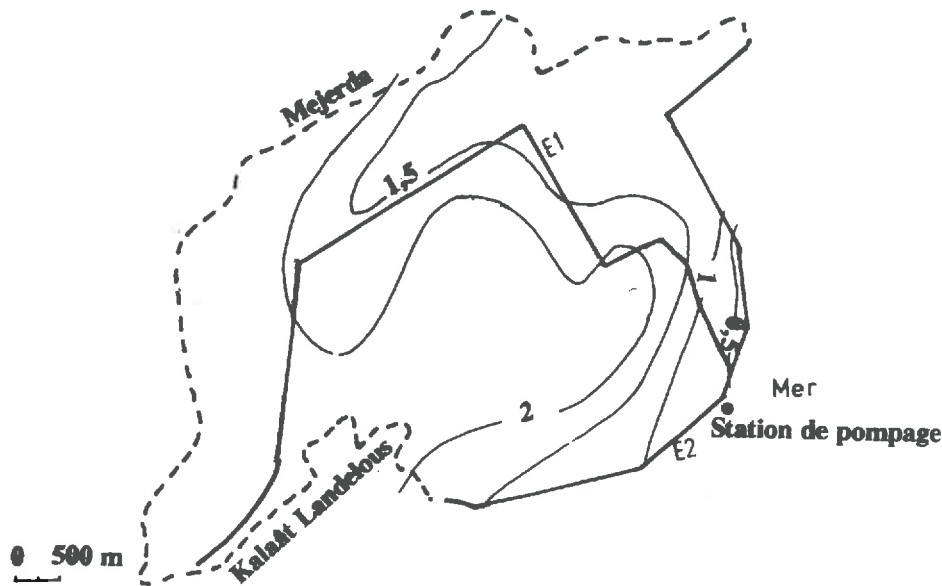


Figure 55. Variabilité spatiale de la profondeur de la nappe en septembre 1953 (en m; d'après SCET-TUNISIE, 1981).

- *Situation après drainage et avant irrigation:* Le réseau d'assainissement et de drainage du périmètre entrepris en 1985 était achevé en 1987. Seule la station de refoulement des eaux de drainage vers la mer a été mise en marche au début de l'année 1990. En novembre 1989, la nappe était en moyenne à environ 2,15 m (Tableau 32). Comme il n'y a pas eu de pluies significatives et encore moins d'irrigations, cette profondeur peut être assimilée à celle de la fin de l'été 89. En hiver, la nappe remontait à environ 1,50 m. La dispersion des valeurs restait toujours moyenne (C.V. compris entre 14 et 15%). Dans l'espace, le niveau de la nappe est bien structuré comme le révèle le variogramme moyen (Figure 56). La portée est d'environ 60 m. La portée assimilée à zéro est concevable (variance nulle à l'origine). Le modèle sphérique+linéaire est celui qui s'ajuste le mieux au variogramme brut (Hachicha et al., 1997a).

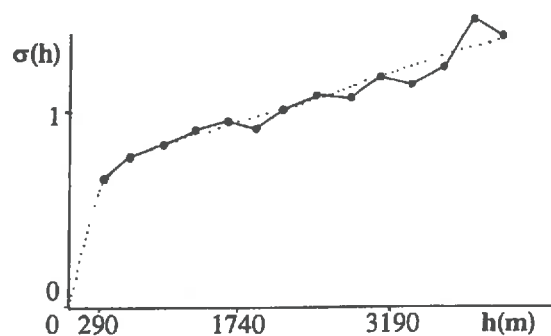


Figure 56. Variogramme moyen brut et modèle ajusté de la profondeur de la nappe déterminés au niveau du périmètre en octobre 1989 (Bach Hamba, 1992).

La variabilité spatiale mise en évidence par la carte, montre un gradient de la profondeur de la nappe. En novembre 1989, elle était à plus de 2,25 m dans le milieu du périmètre près des bras-morts et à moins de 1,75 m à l'ouest, au sud et à l'est du périmètre (Figure 57).

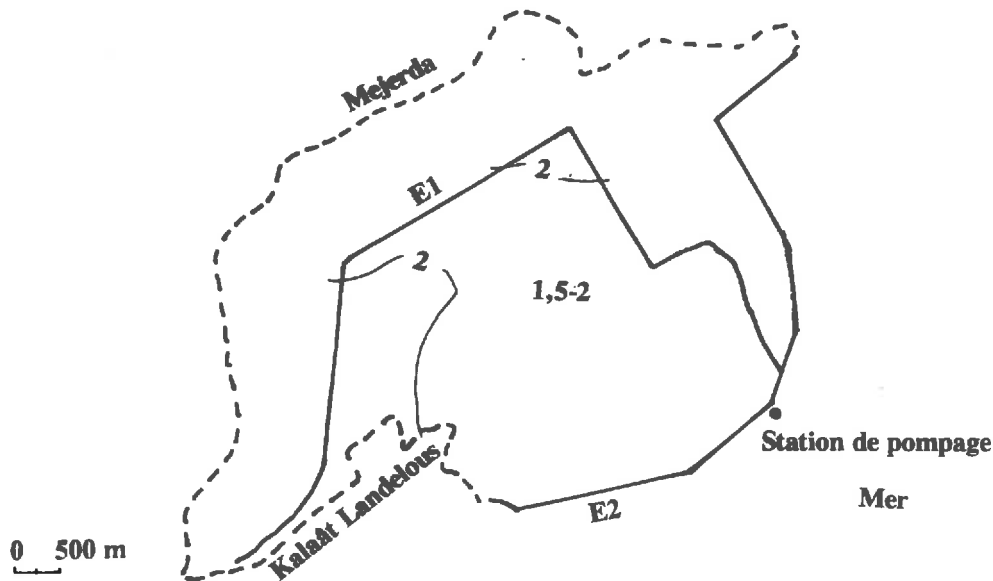


Figure 57. Variabilité spatiale de la profondeur de la nappe en octobre 1989.
(en m; d'après Bouksila, 1992).

- *Situation après irrigation (92-96):* Durant les années 92-94, la nappe se situait entre 1,55 et 1,75 m. Cette valeur a peu varié au cours des saisons. Elle devenait moyennement variable à la fin de l'hiver et plus fortement à la fin de l'été (Tableau 32). La profondeur est maintenue par la côte des drains et des collecteurs. Au cours des années 1995 et 1996, une légère remontée de la nappe est observée. Elle se situe en moyenne à 1,64 m avant le cycle des irrigations et 1,50 m à la fin de ce cycle. Les secteurs situés au nord-est et au sud-est du périmètre sont les plus affectés par la remontée (Figure 58).

Tableau 32. Variabilité de la profondeur de la nappe (en cm).

Année	1953*		1989	1990	1992	1993		1994		1995		1996
Mois	Janv.	Sept.	Nov.	Mai	Oct.	Mai	Oct.	Mai	Oct.	Mai	Oct.	Oct.
N	-	-	60	60	22	30	17	38	31	20	27	44
Moy.	100	140	215	175	160	155	170	170	160	164	150	154
Min.	50	70	114	120	53	110	90	115	70	110	40	70
Max.	150	200	290	220	220	210	220	215	205	208	220	211
C.V%	> 50	> 50	14	15	22	14	26	18	25	18	27	21

* = les valeurs de l'année 1953 sont estimées d'après les cartes de la SCET-TUNISIE (1981).

Ainsi, dans le temps, l'effet du drainage est manifeste. Le rabattement de la nappe est significatif, plus de 1 m entre la situation avant le drainage (1953) et celle après la mise du pompage des eaux de drainage vers la mer (1989-1990). Le régime de la nappe antérieur à l'aménagement comprenait une période hivernale où la nappe remontait et une période estivale durant laquelle elle se rabattait.

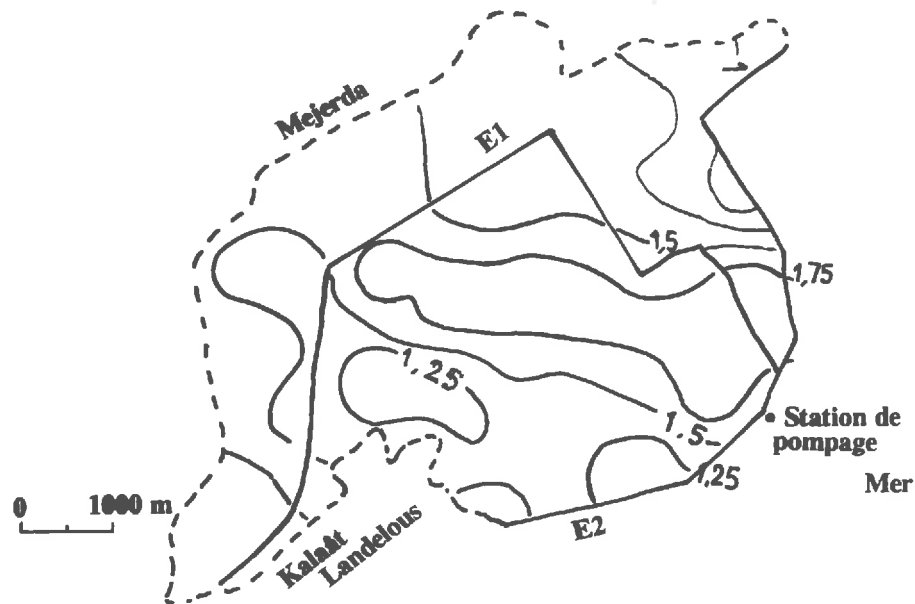


Figure 58. Variabilité spatiale de la profondeur de la nappe en octobre 1996.
(en m; d'après Hachicha et al., 1997b).

Après la mise en eau, les niveaux les plus critiques de la nappe s'observent en fin du cycle d'irrigation. L'irrigation a atténué l'effet du drainage. Le rabattement n'est que d'environ 0,50 m entre la situation avant l'assainissement (1953) et celle après l'intensification des irrigations. L'effet le plus significatif des irrigations est une conservation de la valeur moyenne de la profondeur de la nappe entre le printemps et l'automne et la disparition du rabattement qui se réalisait avant l'intensification progressive des irrigations. Au cours des années 1995 et 1996, l'hydrographe de la profondeur de la nappe (Figure 59) fait apparaître la légère tendance de remontée. Il faut souligner que ces années ne sont pas très pluvieuses et qu'à ce jour, l'irrigation n'est pas totalement généralisée ni à toutes les parcelles, ni à la même intensité.

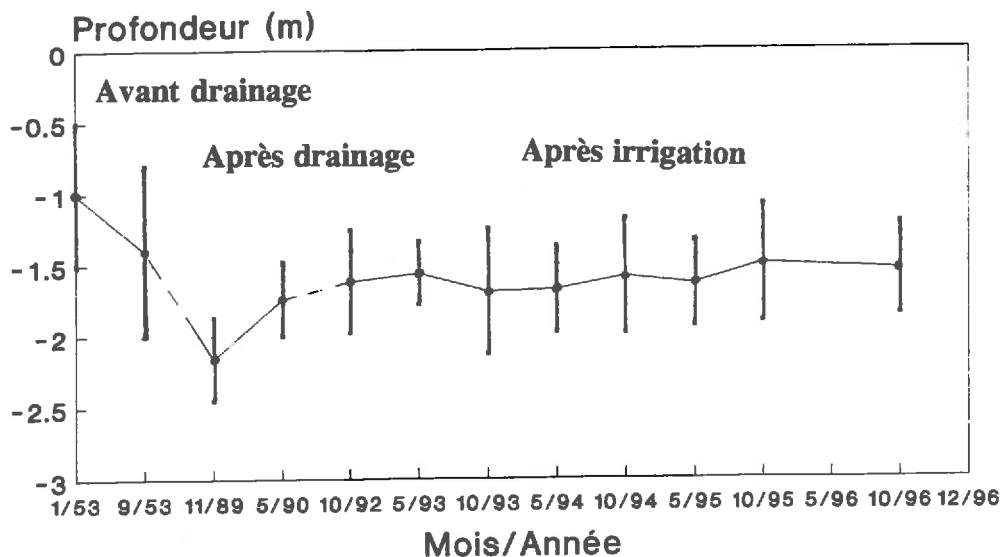


Figure 59. Evolution dans le temps de la profondeur de la nappe,
(moyenne du périmètre).

Dans l'espace, la variabilité initiale du niveau de la nappe a été atténuée après drainage. Mais avec la mise en eau, elle revenait à la hausse. C'est l'effet de la présence de parcelles irriguées et de parcelles qui ne l'étaient pas.

II.1.1.3. Evolution de la salinité de la nappe

- *Situation avant drainage:* Contrairement au niveau de la nappe, on ne dispose pas de données sur la salinité. Mais certainement, elle était plus forte et plus variable qu'après drainage car plus de la moitié du périmètre était un domaine marécageux relié à la mer (moyenne de 25 dS/m soit environ 18 g/l en hiver et 35 dS/m en été soit environ 25 g/l). Des observations récentes réalisées dans la zone non aménagée située au Sud du périmètre confirment ces présomptions.

- *Situation après drainage et avant irrigation:* En novembre 1989, la salinité de la nappe était en moyenne de l'ordre de 19 dS/m soit environ 13 g/l (Tableau 33). Elle peut être assimilée à celle de la fin de l'été 89. A la fin de l'hiver, la salinité était légèrement plus forte, environ 20,6 dS/m. Cependant, elle gardait une forte variabilité, le C.V. est successivement de 53 % et de 43 %.

Dans l'espace, la salinité de la nappe est bien structurée comme le révèle le variogramme moyen (Figure 60). La portée est d'environ 110 m. Le modèle sphérique+linéaire est celui qui s'ajuste le mieux au variogramme brut.

Tableau 33. Variabilité de la salinité de la nappe (en dS/m).

Année	1953*		1989	1990	1992	1993		1994		1995		1996
Mois	Janv.	Sept.	Nov.	Mai	Oct.	Mai	Oct.	Mai	Oct.	Mai	Oct.	Oct.
N	-	-	60	60	22	30	17	38	31	17	27	44
Moy.	25	35	19,0	20,6	14,6	16,1	13,1	14,7	12,2	10,1	12,2	8,8
Min.	15	20	3,0	13,0	5,5	4,4	4,4	4,0	3,9	2,3	4,9	3,1
Max.	50	60	59,0	33,0	27,7	35,0	24,3	36,4	29,1	25,7	27,2	17,9
C.V%	> 50	> 50	53	43	48	48	50	59	53	60	53	48

*: les valeurs de l'année 1953 sont estimées d'après les cartes de la SCET-TUNISIE (1981).

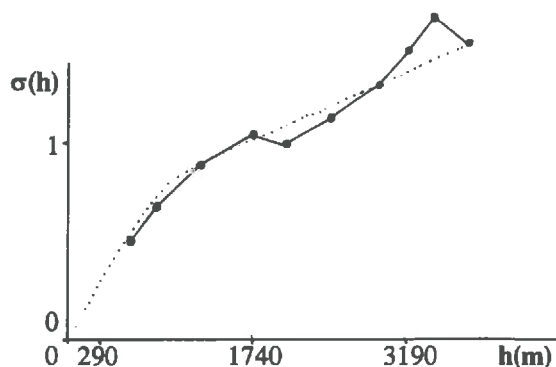


Figure 60. Variogramme moyen brut et modèle ajusté de la salinité de la nappe déterminés au niveau du périmètre en octobre 1989 (Bach Hamba, 1992).

La variabilité spatiale montrait un gradient de la salinité de la nappe. Elle était la moins salée au milieu du périmètre près des bras morts et très salée à l'ouest, au sud et à l'est du périmètre (Figure 61).

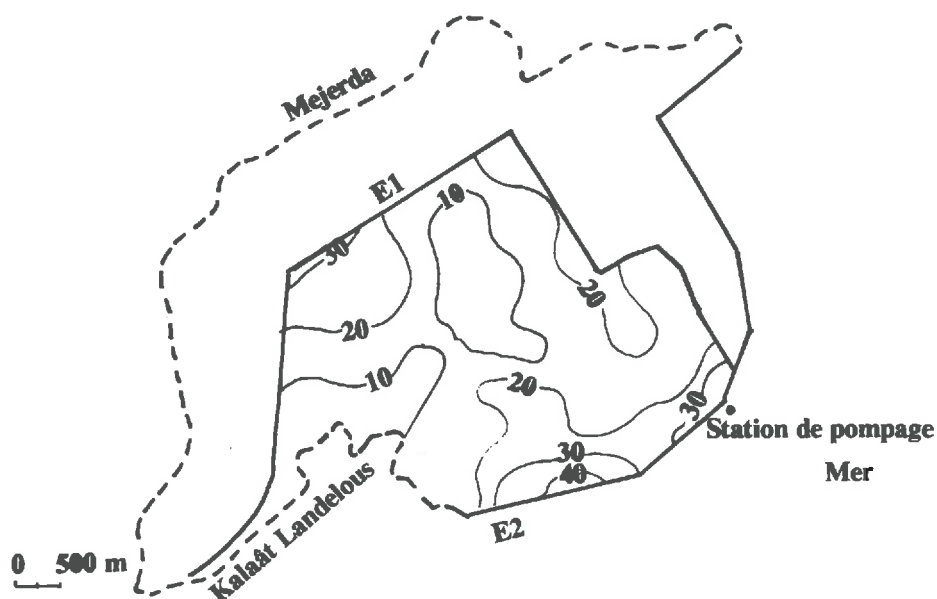


Figure 61. Variabilité spatiale de la salinité de la nappe en octobre 1989 (en dS/m, d'après Bouksila, 1992).

Au niveau de la composition ionique, les eaux de la nappe devenaient près de la mer moins riches en sulfates et plus riches en chlorures (Tableau 34).

Tableau 34. Concentration ionique relative de l'eau de la nappe - Sept. 89. (Moyenne de 4 mesures près de la borne; d'après Bach Hamba, 1992).

Zone	Situation dans le périmètre	Cl (%)	SO ₄ (%)	Na (%)	Ca (%)	Mg(%)
Amont	nord-ouest, borne d'irr. n°41	68	28	49	27	24
Centre	borne d'irrigation n°96	72	20	56	22	21
Aval	sud-est, borne d'irr. n°140	91	4	70	13	14

- *Après irrigation:* Une tendance à la baisse de la salinité est perceptible. La conductivité électrique est en moyenne d'environ 14 dS/m (environ 10 g/l). Elle peut atteindre 36,4 dS/m (environ 26 g/l) comme elle peut descendre à environ 2,3 dS/m. Le C.V. est fortement variable, aux environs de 50%. D'une année à l'autre, une baisse de la salinité est perceptible. Elle résulte certainement de la dilution des eaux de la nappe par les eaux d'irrigation. Dans l'espace, les mêmes tendances de la distribution de la salinité se conservent. Les secteurs situés au nord-est, nord-ouest et au sud-est du périmètre sont les plus affectés par la salinité de la nappe (Figure 62).

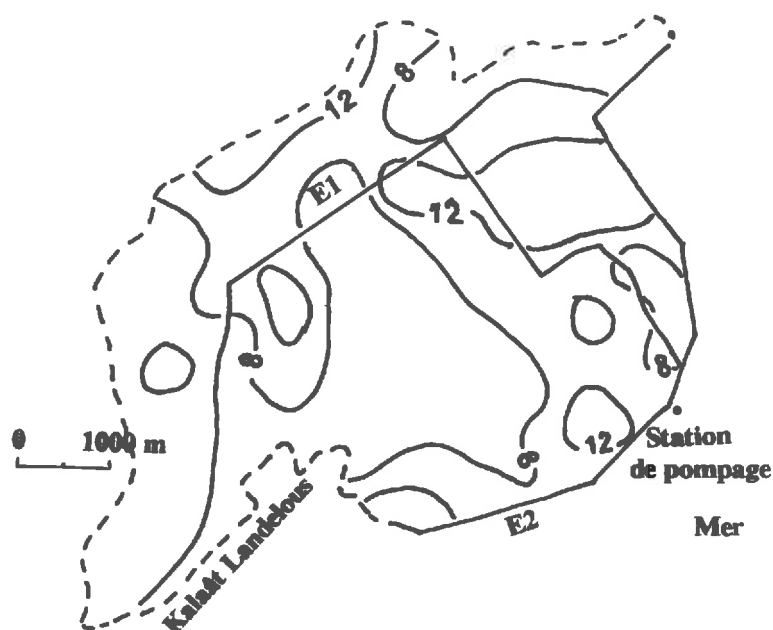


Figure 62. Evolution dans l'espace de la salinité de la nappe (dS/m)- Situation en octobre 1996 (Hachicha et al., 1997).

Ainsi, *dans le temps*, l'effet du drainage s'est exprimé par une baisse générale de la salinité de la nappe. Celui de l'irrigation est perceptible par une certaine homogénéisation de la salinité d'une campagne à l'autre parallèlement à l'augmentation des surfaces cultivées en été. Une tendance à la baisse de la salinité est observable (Figure 63). *Dans l'espace*, la tendance est caractérisée par un gradient, la conductivité variant de moins de 10 dS/m dans le milieu du périmètre, à plus de 30 dS/m près de l'émissaire E1 et 40 dS/m près de E2. Avant l'assainissement de la plaine, la salinité de la nappe était faible près du village, très forte près de la mer. Après drainage, la salinité devenait élevée près des émissaires et de la station de pompage là où se concentraient les eaux de drainage. La mise en eau a eu pour effet une baisse de la salinité d'au moins 10 dS/m.

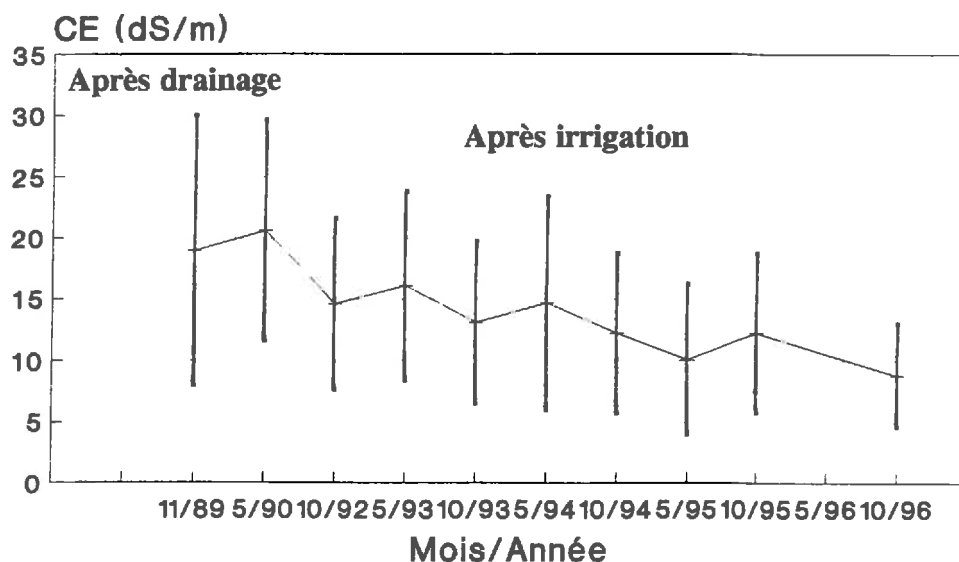


Figure 63. Evolution dans le temps de la salinité de la nappe (moyenne du périmètre).

II.1.2. Evolution de la salure des sols en fonction des aménagements

- *Situation avant drainage:* Avant l'assainissement et le drainage du périmètre, les sols étaient non salins près du village et très fortement salins à la limite du périmètre en direction de la mer (Mori, 1968), (Figure 64). Les profils salins sont de trois types: descendants (salure décroissante de la surface du sol vers la base du profil; type A selon Servant, 1975) les plus fréquents, ascendants (Type D) et à ventre d'accumulation (Type B), (DRES, 1981).

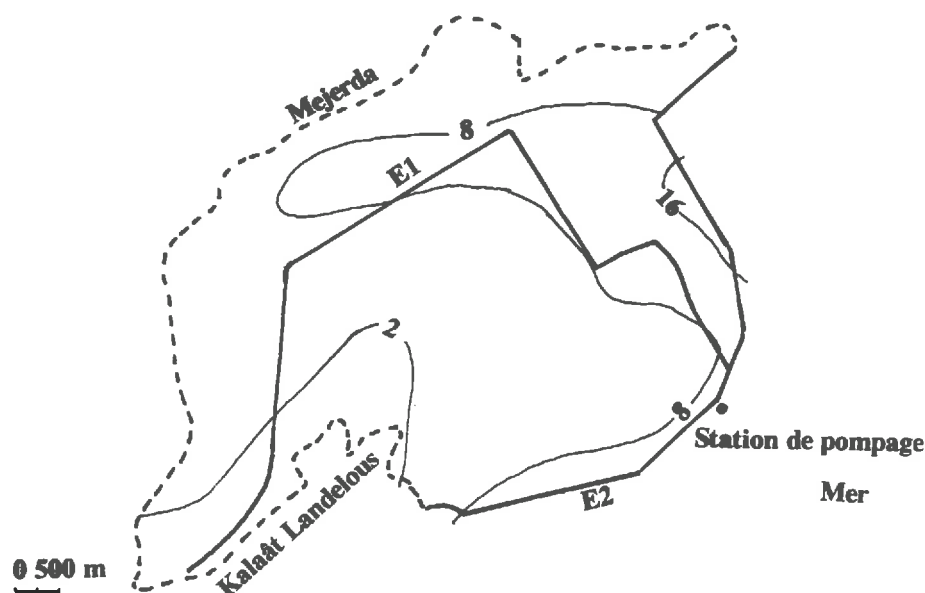


Figure 64. Evolution dans l'espace de la salure des sols sur 1 m d'épaisseur (dS/m) en janvier 1953.

- *Situation après drainage et avant irrigation:* Dans l'étude de caractérisation de la salure des sols en octobre 1989 (Bach Hamba, 1992), la CEe moyenne était comprise entre 6 dS/m en surface et 8,4 dS/m en profondeur. La salure des sols présentait un C.V. élevé (>50%) en particulier en surface (Tableau 35). Entre octobre 89 et avril 90, la salinité du sol a baissé en surface d'environ 3 dS/m. La baisse est perceptible jusqu'à environ 1 m de profondeur.

Tableau 35. Caractéristiques de la salure des sols en octobre 1989.
(CEe en dS/m; Bach Hamba, 1992).

Niveau(cm)	Min.	Max.	Moy.	C.V. %	Nombre
10	1,1	39	6,5	76	144
50	1,6	18	6,0	53	144
100	1,6	23	7,0	55	144
150	2,1	23	8,4	52	144
200	1,3	27	8,4	57	144

La salinité présentait une meilleure structure spatiale en profondeur. La pépité forte en surface s'atténuait dans les horizons sous-jacents. Les zones faiblement salées incluaient les bras morts. A la périphérie du périmètre, la salinité était forte et devenait très forte à proximité de la mer (Figure 65).

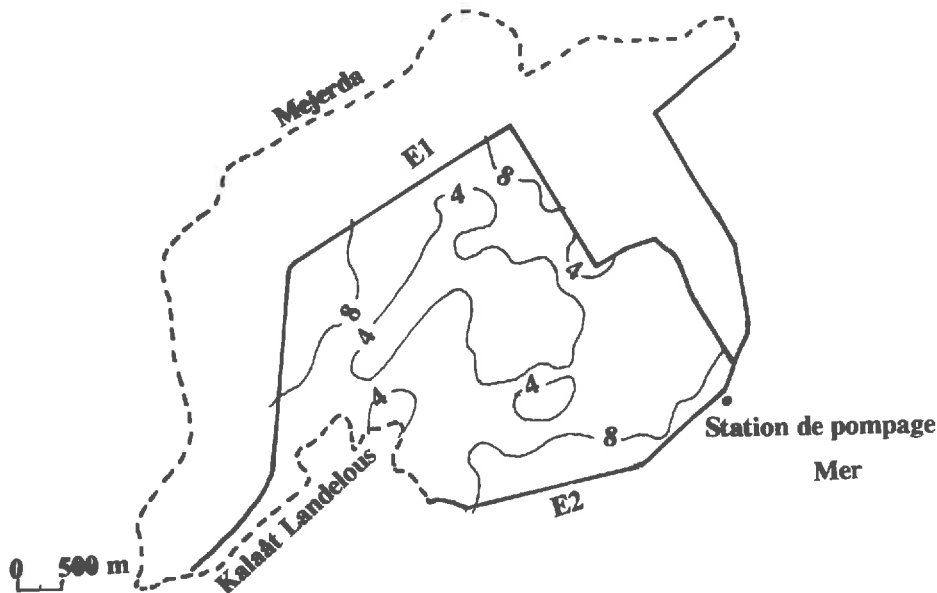


Figure 65. Variabilité spatiale de la salure des sols en octobre 89 entre 0 et 25 cm.
(en dS/m, d'après Bach Hamba, 1992).

- *Après irrigation:* La salure globale des sols entre 0 et 1 m s'est progressivement mise à monter avec l'intensification des irrigations en 1994. Depuis cette date, elle est devenue approximativement de l'ordre de 5,5 dS/m. Cette salure est faible en surface, de l'ordre de 2 dS/m et plus élevée en profondeur (1 m), de l'ordre de 7 dS/m. L'amplitude de la salinisation estivale des sols est en moyenne d'environ 1,5 dS/m. Avec l'irrigation, le C.V. passe d'une forte variabilité supérieure à 65 % à une variabilité moyenne de seulement 22 %.

Après la mise en eau du périmètre, les profils salins de type ascendant (Type D) ou à ventre d'accumulation deviennent de plus en plus fréquents. Dans l'espace, les secteurs situés au sud-est et au nord-est du périmètre sont les plus salinisés (Figure 66). Ailleurs, des parcelles salées commencent à apparaître.

Ainsi, *dans le temps*, une baisse sensible de la salure des sols s'est produite avec le drainage. Cet effet est partiellement contrebalancé par l'irrigation qui salinise de nouveau les sols. La légère salinisation observée depuis octobre 1994 se conserve en 1995 et en 1996 (Figure 67; Tableau 36).

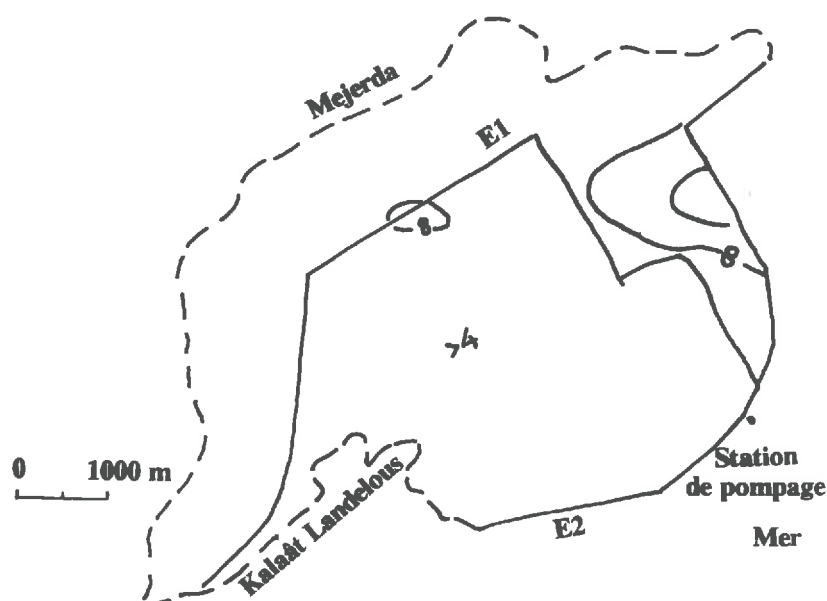


Figure 66. Variabilité spatiale de la salure des sols sur 1 m d'épaisseur en octobre 96. (en dS/m, Hachicha et al., 1997b).

Dans l'espace, les zones les plus salées qui étaient plus fréquentes près de la mer et moins fréquentes près des bras morts, se distribuent d'une manière moins structurée après irrigation.

Tableau 36. Variabilité de la salure des sols (CEe en dS/m de la couche 0-1 m).

Année	1953*	1989	1990	1993	1994		1995	1996
Mois	Sept.	Oct.	Avril	Oct.	Mai	Oct.	Oct.	Oct.
Nb	-	144	144	31	62	38	39	49
Moy.	8	6,3	4,8	3,6	3,9	5,3	5,3	5,5
Min.	2	1,4	1,3	1,3	2,3	3,4	3,2	3,9
Max.	> 16	28,0	19,7	7,8	6,1	7,6	7,1	15,5
C.V%	> 80	65	75	41	23	22	17	33

*: Les valeurs sont estimées d'après la carte de la salure des sols (SCET-TUNISIE, 1981).

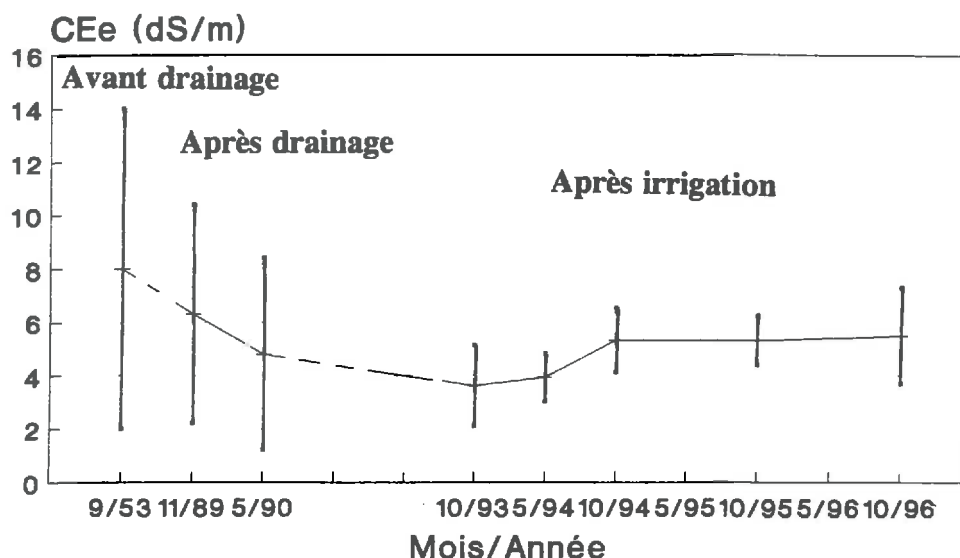


Figure 67. Evolution dans le temps de la salure des sols (moyenne du périmètre).

II.1.3. Relation sol-nappe et zonation des risques de salinisation

La salinité de la nappe et celle du sol sont hautement corrélées en profondeur et faiblement en surface (Tableau 37). Les caractéristiques de la nappe, profondeur et salinité de la nappe, sont sensibles à chaque mise en valeur.

Tableau 37. Relation entre la salinité du sol (CEe) et celle de la nappe (CEn).
(Bach Hamba, 1992).

Z (cm)	Equation de corrélation	r	N
10	non significative	0,11	59
50	$CEe = 0,46 * CEn - 0,91$	0,83	59
100	$CEe = 0,28 * CEn + 1,93$	0,85	81
150	$CEe = 0,36 * CEn + 1,25$	0,90	82
200	$CEe = 0,35 * CEn + 1,67$	0,89	85

Avant la mise en eau, les zones dont le sol est plus salé, sont celles où la nappe est plus superficielle et plus salée. Cette tendance de la variation spatiale est conservée au cours des différentes saisons. Après la mise en irrigation, cette tendance est perturbée par l'introduction des irrigations.

Les faciès géochimiques des solutions des sols chloruré sodiques à chloruro-sulfatés calciques et sodiques, entre 0 et 50 cm, deviennent hyper chloruré sodiques à proximité de la nappe. Plus on se rapproche de la mer, plus les solutions des sols contiennent moins de sulfates et plus de chlorures.

Sur la base des unités homogènes déterminées dans l'étude de la variabilité des propriétés des sols (texture et CEE) et les caractéristiques de la nappe (CE et niveau), on parvient à distinguer trois zones à risque de salinisation. Cette zonation est relative à la période qui précède l'irrigation. Une nouvelle situation sera établie quand on atteindra un équilibre dans la gestion des eaux dans le périmètre.

Les trois zones de risque de salinisation sont (Figure 68):

- au milieu du périmètre et près des bras morts des oueds, une *zone à faible risque de salinisation*: le sol est peu perméable et faiblement salin ($CEe < 4$ dS/m), la nappe est à plus de 2 m et la salinité de la nappe est inférieure à 15 dS/m.

- tout autour de la première, on trouve une *zone à risque moyen de salinisation*: le sol est peu perméable de salinité moyenne ($4 \text{ dS/m} < CEe < 8 \text{ dS/m}$), la nappe est située à 2 m en été et à 1 m en hiver et la salinité de la nappe est comprise entre 10 et 20 dS/m.

- au nord-est, au sud et à l'est, une *zone à risque élevé de salinisation* avec un sol très peu perméable salin et sodique, une nappe variant entre 0,60 et 1,20 m en hiver et 1,20 à 2,20 m en été et dont la salinité varie de 10 à 30 dS/m.

Après irrigation, les limites de ces zones à risque n'ont pas fortement varié. Cependant, l'extension récente des champs sur les bords des bras morts et la disparition progressive de ce réseau hydrographique naturel engendrera certainement une modification des limites de ces zones.

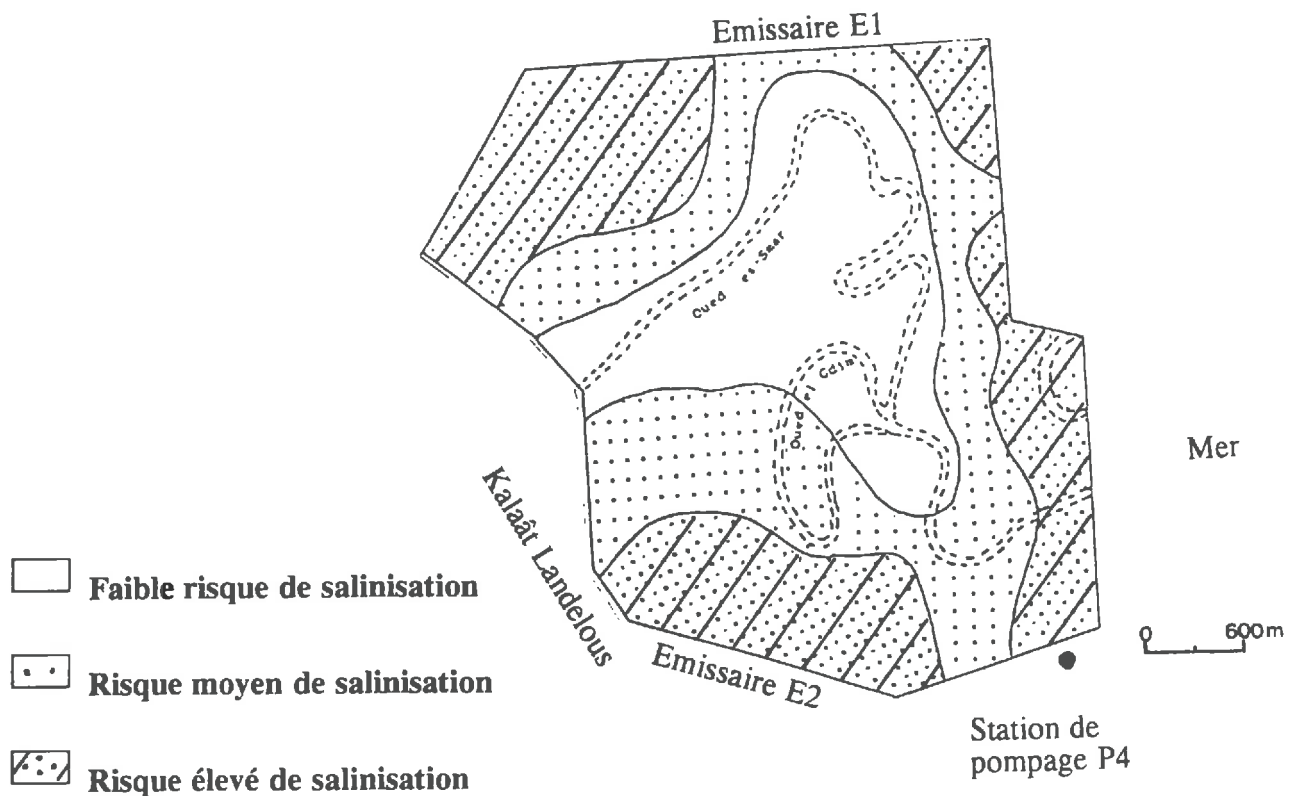


Figure 68. Les zones à risque de salinisation (Bouksila, 1992).

II.2. Evolution du bilan des sels à l'échelle du périmètre: volume et qualité.

Le bilan des sels pourrait constituer un moyen pour évaluer les tendances à la salinisation à l'échelle d'un périmètre. Ce bilan a commencé à être évalué pour le périmètre de Kalaât Landelous depuis janvier 1993 avec le concours de la SOCADENORD, société responsable de l'exploitation des canaux des eaux du Nord (Hachicha et al., 1995a; Hachicha et al., 1995b; SOCADENORD; Hachicha et al., 1997b).

II.2.1. Volumes des eaux d'irrigation et de drainage

Au cours de l'année 1993, environ 1,4 millions de m^3 d'eau d'irrigation ont pénétré dans le périmètre. La moyenne hebdomadaire est de 31 000 m^3 . Le volume d'eau enregistré au cours de l'année 1993 est inférieur à celui de l'année précédente qui est l'année de mise en eau du périmètre, plus de 1,6 millions de m^3 pour seulement huit mois. Les quantités mensuelles de 110 000 m^3 au début de l'été sont passées à 200 000 m^3 en période de pointe. La consommation en eau a quadruplé au cours de l'année 1994, 5,5 millions de m^3 dont plus de 1,1 millions de m^3 pour le mois de juillet seulement. Le volume annuel a régressé en 1995 à 2,9 millions de m^3 puis il a légèrement augmenté en 1996 à 3,6 millions de m^3 (Figure 69).

Les variations du volume traduisent l'accroissement des surfaces irriguées et à titre exceptionnel, la gratuité de l'eau au cours de la saison estivale de l'année 1994. Par ailleurs, durant les années déficitaires en pluie, les agriculteurs procèdent à des irrigations d'appoint pour les cultures d'hiver. Ce comportement est illustré dans la figure 69. Le graphique met aussi en évidence deux modes de gestion très nettement différents qui traduisent une évolution considérable des surfaces irriguées en été et une prise de conscience de l'utilité des compléments d'irrigation en hiver.

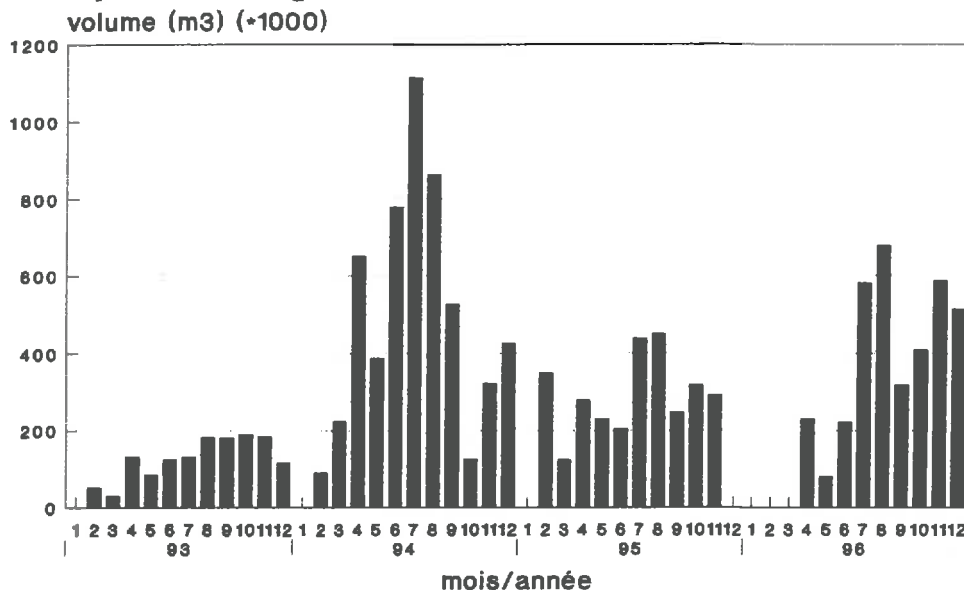


Figure 69. Evolution des volumes d'eau d'irrigation introduits dans le périmètre.

Au cours de l'année 1993, environ 1,6 millions de m^3 d'eau ont été refoulés par pompage vers la mer. Ce volume drainé était de l'ordre de 2,5 millions de m^3 en 1994, 4,1 millions de m^3 en 1995 et environ 4,9 millions de m^3 en 1996. Cet accroissement des

quantités d'eaux évacuées vers la mer est le résultat de l'augmentation des apports d'eau d'irrigation et aussi de périodes pluvieuses exceptionnelles (Figure 70). De ce fait, la moyenne mensuelle peut atteindre plus de 2,5 millions de m³ comme elle peut descendre à seulement 3000 m³ à la fin de l'été.

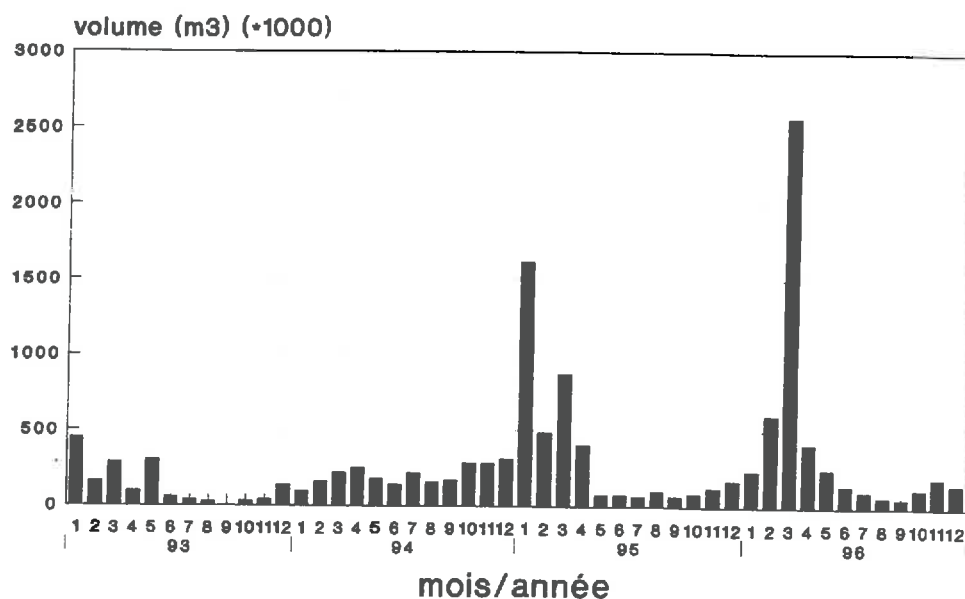


Figure 70. Evolution des volumes d'eau évacuée par pompage à l'extérieur du périmètre.

II.2.2. Qualité des eaux d'irrigation et de drainage

La CE moyenne de l'eau d'irrigation était de l'ordre de 3,7 dS/m en 1993, 4,2 dS/m en 1994, 4,8 dS/m en 1995 et 3,7 dS/m en 1996 (Tableau 38). Le résidu sec variait ainsi entre 2,6 g/l et 3,1 g/l. Des valeurs plus élevées mais aussi plus faibles ont été observées. Les valeurs élevées correspondent aux mois pluvieux de l'hiver et les valeurs faibles aux mois d'été (Figure 71). La variation de la salinité (C.V.) est toujours moyenne (<28%). La salinité reste relativement constante au cours des mois de pointe, autour de 3,5 dS/m. C'est que ces eaux proviennent largement des lâchures effectuées au niveau du barrage de Sidi Salem situé dans la Moyenne Vallée de la Mejerda à plus de 80 Km. Alors qu'au cours des autres mois, les eaux des affluents situés dans la Basse Vallée de la Mejerda ou aussi les eaux de drainage des périmètres irrigués de cette région contaminent les eaux de lâchures.

Tableau 38. Variation mensuelle de la qualité des eaux d'irrigation et de drainage (CE en dS/m).

Nature de l'eau	Irrigation				Drainage			
Année	1993	1994	1995	1996	1993	1994	1995	1996
Nombre	12	12	10	10	12	12	11	12
Moyenne	3,7	4,2	4,8	3,7	23,6	22,6	34,6	22,6
Min.	2,2	3,1	2,9	2,8	14,4	16,2	19,4	15,1
Max.	5,5	5,6	6,8	4,9	34,1	26,7	57,6	29,4
C.V. (%)	20	23	28	21	26	15	39	19

La CE moyenne des eaux drainées était de l'ordre de 23,6 dS/m en 1993 et environ 22,6 dS/m en 1994 (environ 17 g/l). Elle s'est élevée en 1995 à plus de 34,6 dS/m puis s'est redescendue à 22,6 dS/m en 1996. Ainsi, elle peut descendre à 14,4 dS/m à la suite de pluies exceptionnelles comme elle peut remonter à plus de 57,6 dS/m en pleine période estivale. D'une année à l'autre, la variabilité de ces valeurs est grande. Le C.V. peut atteindre 39% comme il peut être seulement égale à 15%.

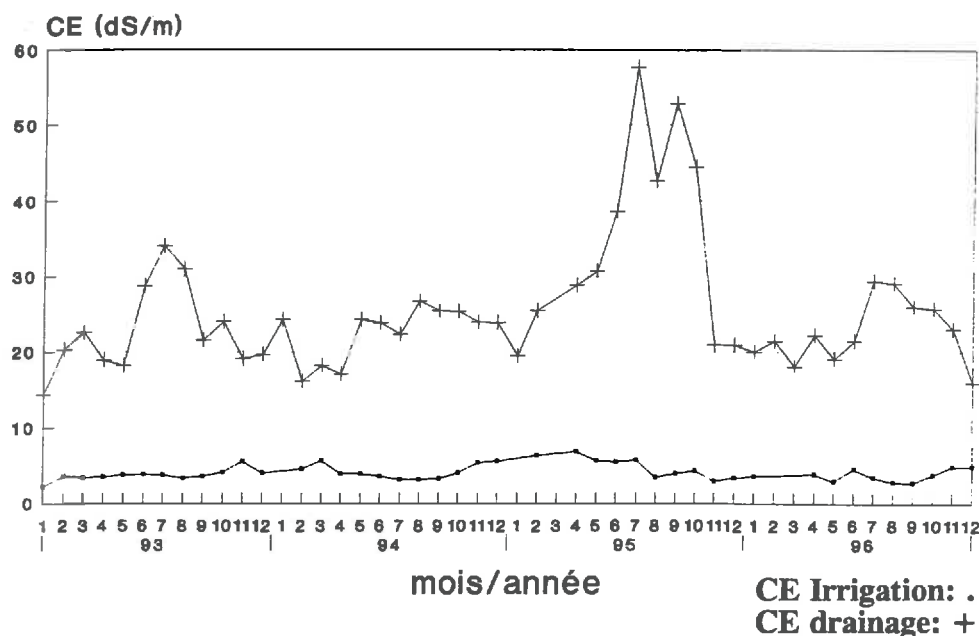


Figure 71. Evolution de la qualité des eaux d'irrigation et de drainage.

Les eaux d'irrigation, comme les eaux de drainage, sont constamment à dominance de chlorure et de sodium ce qui se traduit par un faciès géochimique chloruré sodique pour le premier et hyper chloruré sodique pour le second (Tableau 39). Le rapport eau de drainage/eau d'irrigation varie beaucoup selon l'ion considéré, 1 pour le carbonate et le magnésium, 2 pour le calcium, 3 pour le sulfate, 6 pour le potassium et environ 12 pour le chlorure et le sodium. Ce changement de faciès résulte probablement d'une intrusion souterraine des eaux de la mer et leur contamination des eaux de drainage.

Tableau 39. Composition chimique des eaux d'irrigation et de drainage.
(Avril 1993; les anions et les cations sont exprimés en méq/l).

Eau	pH	CE(dS/m)	R.S(g/l)	SAR	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
Irrigation	7,5	3,0	2,2	6,1	5,0	11,9	16,0	9,8	6,0	17,0	0,2
Drainage	7,8	19,2	14,0	60,4	5,0	29,1	196,0	20,1	6,0	218,3	1,26

II.2.3. L'évolution du bilan des sels

Les mesures effectuées entre novembre 89 et avril 90, avant la mise en eau et juste au cours de la mise en marche du refoulement des eaux de drainage (Bach Hamba, 1992), ont montré que 3,5 millions de m³ d'eau drainée ont exporté 28 000 t. de sels, soit

l'équivalent de 10 t/ha. Cette quantité était à 10% près équivalente à la diminution dans le sol du stock de sels entre 0 et 75 cm (9,5 t/ha). Environ 60% des sels lessivés provenaient de l'horizon 0-25 cm. Les quantités de sels introduites par les eaux d'irrigation sont en croissance, plus de 4135 t. en 1992 (pour environ 500 ha de terres irriguées), environ 3900 t. en 1993, 14750 t. en 1994, 9250 t. et 9500 t (pour environ 1000 ha de terres irriguées) successivement en 1995 et 1996 (Figure 72). La variation des apports de sels est à l'image de la variation des volumes d'eau d'irrigation. Depuis la mise en oeuvre du suivi, les exportations de sels sont évaluées à environ 22000 t. de sels en 1993, 39000 t. en 1994, 57000 t. en 1995 et plus de 68000 t. en 1996 (Figure 73).

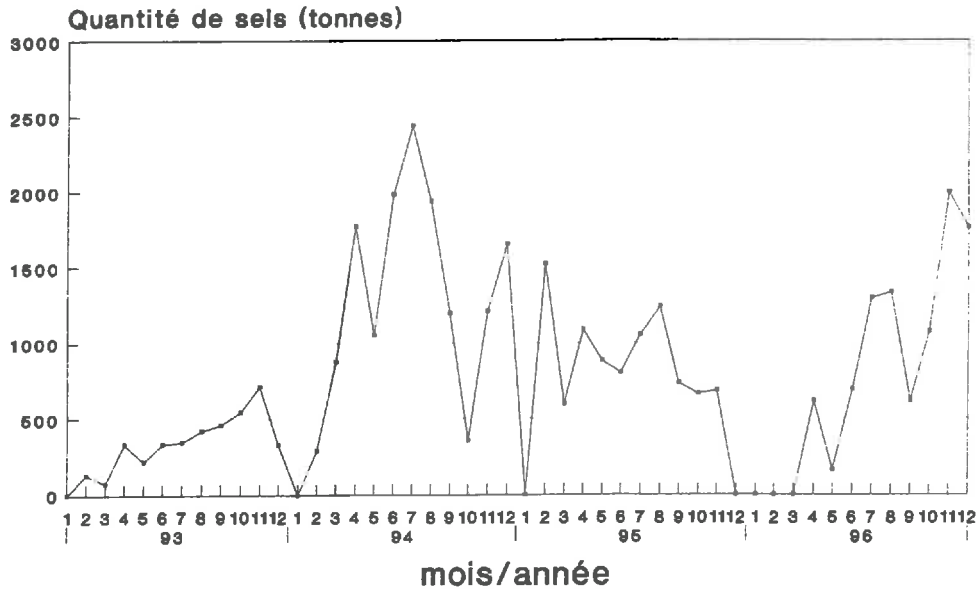


Figure 72. Evolution de la quantité de sels apportée par les eaux d'irrigation.

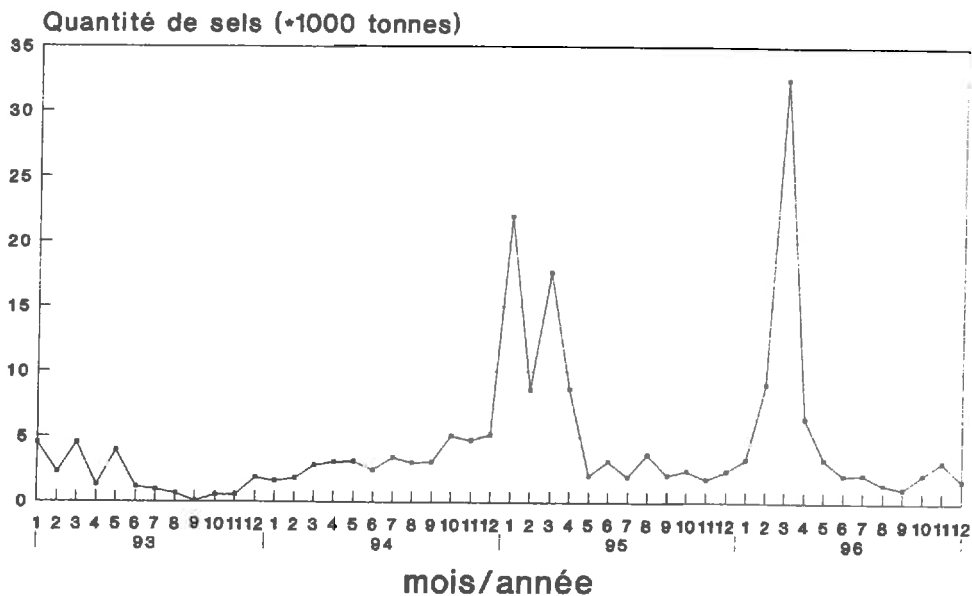


Figure 73. Evolution de la quantité de sels évacuée par les eaux de drainage.

Eu égard aux importations et exportations, le bilan des sels est largement négatif (exportation > importation). Ainsi, il était d'environ -18100 t. en 1993, -24250 t. en 1994, -47750 t. en 1995 et -58500 t. en 1996 (Tableau 40). Pendant de très courtes périodes, les apports étaient supérieurs aux exportations (Figure 74).

Tableau 40. Evolution du bilan du volume des eaux et de la quantité de sels.

Paramètre	Volume d'eau (millions de m ³)				Quantité de sels (*1000 tonnes)			
Année	1993	1994	1995	1996	1993	1994	1995	1996
Eau d'irrigation	1,4	5,5	2,9	3,6	3,9	14,75	9,25	9,5
Eau de drainage	1,6	2,5	4,1	4,9	22	39	57	68
Bilan irr.-drain.	-0,2	+3,0	-1,2	-1,3	-18,1	-24,25	-47,75	-58,5

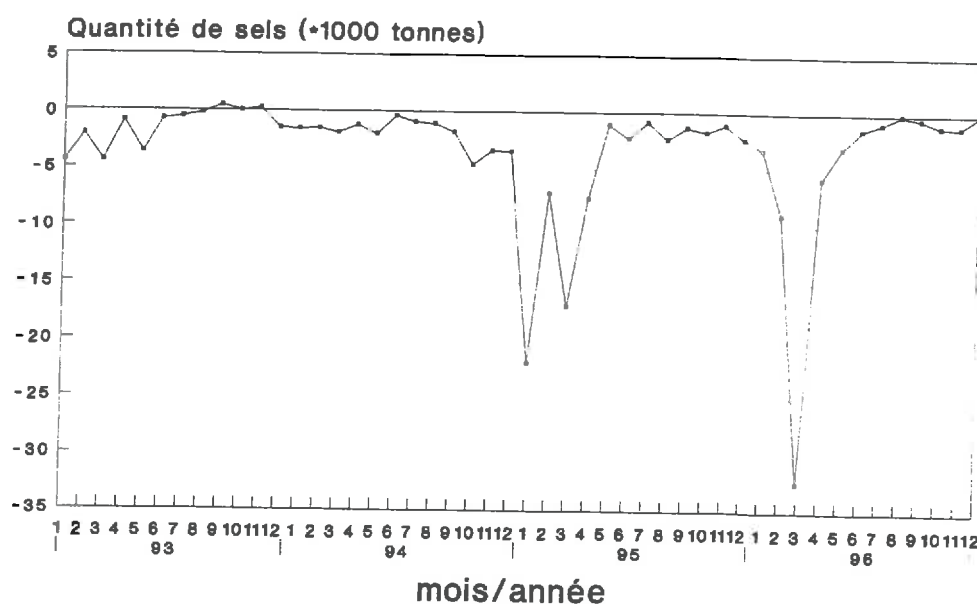


Figure 74. Evolution du bilan mensuel des sels.

Dans notre approche, nous n'avons pas tenu compte des sels qui peuvent remonter de la nappe et ceux qui viendraient latéralement d'en dehors du périmètre. Malgré cela et depuis l'aménagement du drainage (1987), les sols du périmètre sont en cours de désalinisation. Mais ceci masque deux régimes des sels complètement différents qui affectent la couche 0-1 m:

- un régime estival additif essentiellement durant les périodes d'irrigation de pointe. Ce régime se traduit par une salinisation durant août et septembre et s'accroît avec l'augmentation des surfaces irriguées;
- un régime hivernal soustractif qui s'exprime nettement lors des pluies importantes. Il se concrétise par une désalinisation entre la fin de l'automne et la fin du printemps.

La désalinisation indique la prédominance du régime soustractif sur le régime additif. Ces régimes sont induits par deux comportements hydriques. Le régime additif provient des irrigations alors que le régime soustractif est régi par les précipitations, en particulier les pluies intenses qui surviennent trois à cinq fois au cours d'une année normale. La baisse de la quantité de sels exportés malgré une augmentation des apports de sels reflète la salinisation des sols de nouveau qui est amorcée par l'augmentation des surfaces irriguées et l'intensification des irrigations. Elle reste sans gravité pour le moment. La situation peut s'améliorer si les pluies, rares depuis 1992, deviennent plus conformes à la normale.

II.3. Analyse des eaux de drainage et de la variabilité des caractéristiques de la nappe dans un système émissaire/collecteur/parcelle

Dans l'analyse du système sol-nappe, nous avons appréhendé le périmètre dans son ensemble. Nous allons l'examiner à une plus grande échelle et apporter des précisions sur la qualité et le débit des eaux de drainage et sur la variabilité des caractéristiques de la nappe.

II.3.1. Analyse des eaux du drainage dans un système émissaire/collecteur/drain

Des mesures hebdomadaires ont été entreprises sur la qualité et le débit des eaux de drainage en avril-mai 1993 (Figure 75). Pour la mesure du débit pour les émissaires et les collecteurs secondaires, nous avons utilisé un déversoir (Planche 6). Pour les drains tertiaires, le jaugeage est direct (Missaoui, 1993).

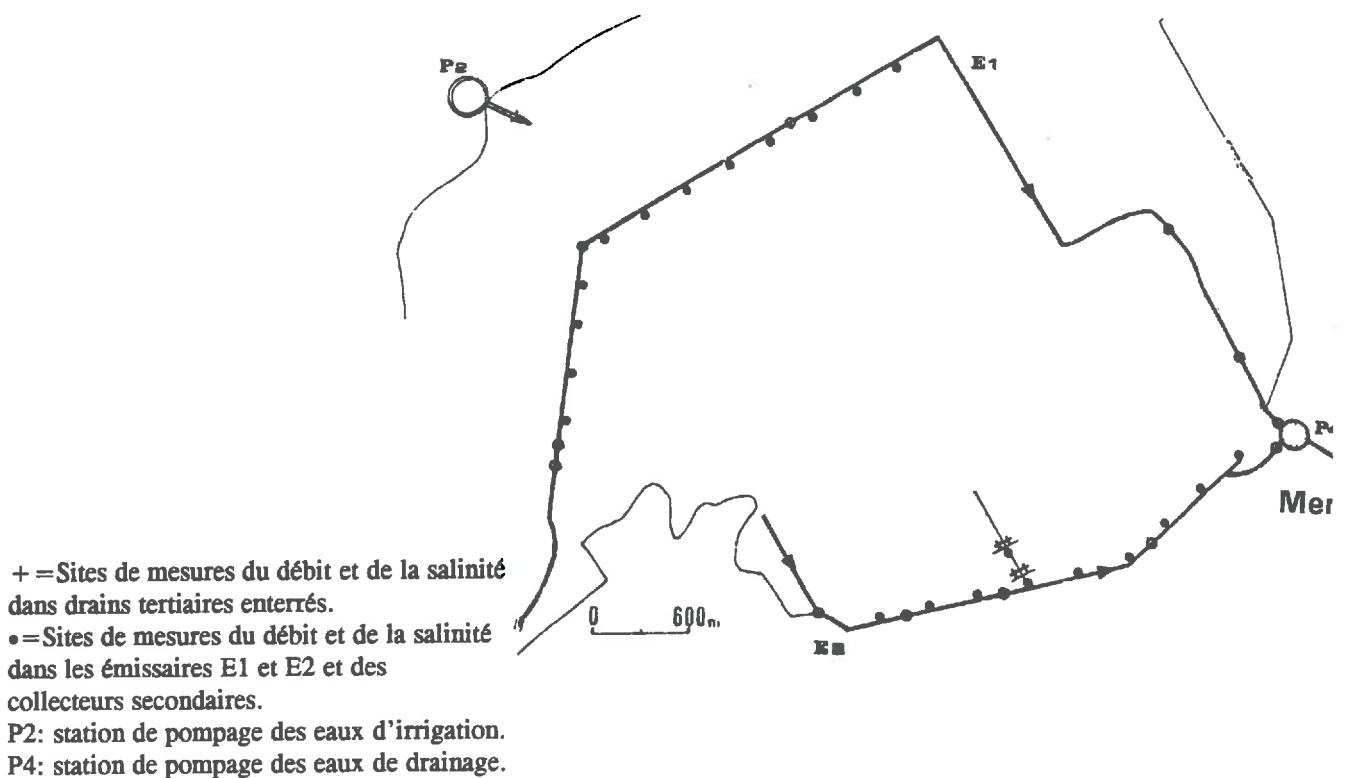


Figure 75. Sites des mesures effectuées sur les eaux de drainage.

Planche 8. Suivi piézométrique de la nappe, de la salure globale des sols et des eaux de drainage.



Suivi de la nappe et de la salure des sols près des piézomètres.



Suivi de la qualité et du débit des eaux de drainage.



Suivi du pompage des eaux de drainage vers la mer au niveau de la station.

Evolution du débit:

Au niveau de l'émissaire E2 (environ 3 km de longueur), à son amont et près du village, le débit était nul. Il n'augmentait sensiblement qu'à 600 m de la station de pompage (1,2 l/s). Il atteignait son maximum à l'entrée du bassin de la station de pompage soit environ 5 l/s. Au niveau du collecteur secondaire (C2.9) qui rejoint E2 à mi-chemin, le débit se situait aux environs de 0,2 l/s. Enfin, au niveau des drains tertiaires enterrés situés sur le collecteur C2.9, les débits étaient faibles voire nuls. Ces débits variaient considérablement. Lors de pluies importantes survenues les 5 et 6 mai 1993, nous avons enregistré un débit de pointe à l'entrée du bassin de pompage (P4) de plus de 21 l/s. Une semaine après, ce débit revenait à sa valeur ordinaire de 5 l/s (Tableau 41).

**Tableau 41. Débits des eaux de drainage dans un ensemble
Emissaire/Collecteur/Drains (en l/s).**

Date	Site	Emissaire E2		Collecteur C2.9/ E2		Drains IIIaires/C2.9	
		Nombre	Débit	Nombre	Débit	Nombre	Débit
21/4/93		5	1,2	4	0,2	4	0,0008
28/4/93		5	3,2	4	0,2	4	0
4/5/93		5	1,1	4	0,2	-	-
7/5/93		2	21,0	2	17,8	-	-
10/5/93		5	5,2	4	1,6	4	0,0190
17/5/93		5	3,1	4	0,3	4	0,0011

Evolution de la qualité:

Simultanément à ces variations du débit, la salinité des eaux de drainage était de l'ordre de 14 dS/m au niveau de l'émissaire E2 et d'environ 11 dS/m au niveau du collecteur (Tableau 42). Les pluies importantes survenues au début du mois de mai (71,5 mm) ont engendré une baisse de la salinité à seulement à environ 8,5 dS/m aussi bien au niveau des collecteurs secondaires qu'au niveau de l'émissaire E2.

**Tableau 42. Qualité des eaux de drainage dans un ensemble
Emissaire/Collecteur/Drains (CE en dS/m).**

Date	Site	Emissaire E2			Collecteur C2.9 / E2			Drains III/C2.9	
		N	CE	C.V. %	N	CE	C.V. %	N	CE
21/4/93		13	16,7	7	7	12,6	17	4	33,5
28/4/93		12	11,4	20	9	11,0	37	-	-
4/5/93		12	16,1	7	6	10,7	22	-	-
7/5/93		5	8,5	24	6	8,7	29	-	-
10/5/93		12	13,5	13	8	12,8	24	4	24,0
17/5/93		9	15,8	8	6	14,6	24	4	39,2

Ces eaux de drainage possèdent des faciès géochimiques chloruré-sodiques qui deviennent hyper chloruré-sodiques près de la station de pompage P4. A titre d'exemple, la composition au niveau de l'émissaire E2 est la suivante (Tableau 43):

Tableau 43. Composition chimique de l'eau de drainage, Emissaire E2.
(Avril, 1993; les anions et les cations sont exprimés en méq/l).

pH	CE(dS/m)	R.S(g/l)	SAR	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
7,5	10,9	7,7	24,3	6,0	29,7	98,0	17,0	12,0	92,4	0,55

Ainsi, les *débits des eaux de drainage* sont fortement variables. Dans les conditions normales, le débit dans l'émissaire (3 l/s) est environ dix fois plus élevé que dans le collecteur secondaire (0,3 l/s) et environ mille fois supérieur au débit du drain tertiaire (0,003). Lors de pluies importantes, le débit de pointe devient sept fois plus élevé (21 l/s). La *qualité des eaux de drainage* est de variabilité moyenne. La salinité est d'environ 16 dS/m dans l'émissaire, un quart de moins dans le collecteur mais trois fois plus élevée dans le tertiaire. Comme les irrigations étaient encore faibles, les eaux dans les tertiaires sont des solutions de sols très concentrées. Celles dans le collecteur et l'émissaire sont les eaux de la nappe qui d'ailleurs présentent une valeur similaire. Les eaux dans les tertiaires, malgré leur forte salinité, sont sans effet notable sur la salinité des eaux du collecteur et de l'émissaire à cause de leur faible débit.

II.3.2. Analyse de la variabilité des caractéristiques de la nappe dans un système émissaire/collecteur/drains/parcelle

Dans les analyses précédentes, que ce soit dans le système sol-nappe ou réseau d'assainissement-drainage (émissaire/collecteur/drain), nous avons considéré une homogénéité des caractéristiques de la nappe et une contribution identique des parcelles. Ainsi, la mesure recueillie au niveau d'un piézomètre a été extrapolée à une unité de surface d'une trentaine d'hectares (63 piézomètres pour 1800 ha). Comme dans le paragraphe précédent, nous allons apporter des précisions sur la variabilité des caractéristiques de la nappe en fonction des aménagements et au cours du temps. Partant des considérations suivantes:

- le niveau de la nappe est connu pour être le plus superficiel entre deux files de drains et le plus profond près des sorties des drains enterrés (ILRI, 1974);
- les variations de la nappe dans le périmètre de Kalaât Landelous s'expliquent par l'occupation des sols et la nature des aménagements (Bouksila, 1992).

Pour étayer ce comportement de la nappe, nous allons l'étudier dans un système émissaire/collecteur/drains/parcelle. Comme les drains enterrés sont placés dans toutes les parcelles d'une manière identique (profondeur et inclinaison), c'est essentiellement l'effet des aménagements (pistes agricoles) et du réseau hydrographique naturel (bras morts) dans le système émissaire/collecteur/parcelle qui est plus perceptible. Pour ce faire, deux batteries de piézomètres ont été installées (Figure 76):

- Pour la variabilité des caractéristiques de la nappe au niveau de la parcelle, une première batterie composée de 9 piézomètres qui vont de l'émissaire E1 au collecteur le plus proche (C2.19) situé à 360 m (une seule parcelle traversée par une piste). Ces piézomètres sont situés à mi-distance entre deux files de drains enterrés distants de 40 m.

- Pour la variabilité liée aux aménagements (pistes agricoles) et au réseau hydrographique naturel (bras morts), une seconde batterie de 10 piézomètres est perpendiculaire à la première. Cette série traverse la piste aménagée entre le village et le port, et le bras mort appelé Oued Oum Eth-Thaaleb. L'altitude est à peu près constante d'environ 2 m par rapport au niveau de la mer. Les mesures ont été réalisées entre janvier 93 et mai 93.

Variabilité des caractéristiques de la nappe au niveau de la parcelle:

Le toit de la nappe atteint son niveau le plus superficiel à mi-chemin entre l'émissaire et le collecteur (Figure 77). Les variations sont fonction du régime hydrique. L'arrêt des pluies en avril se traduit par un rabattement du niveau de 10 à 30 cm alors que l'amorçage des irrigations au mois de mai, engendre une remontée de ce niveau.

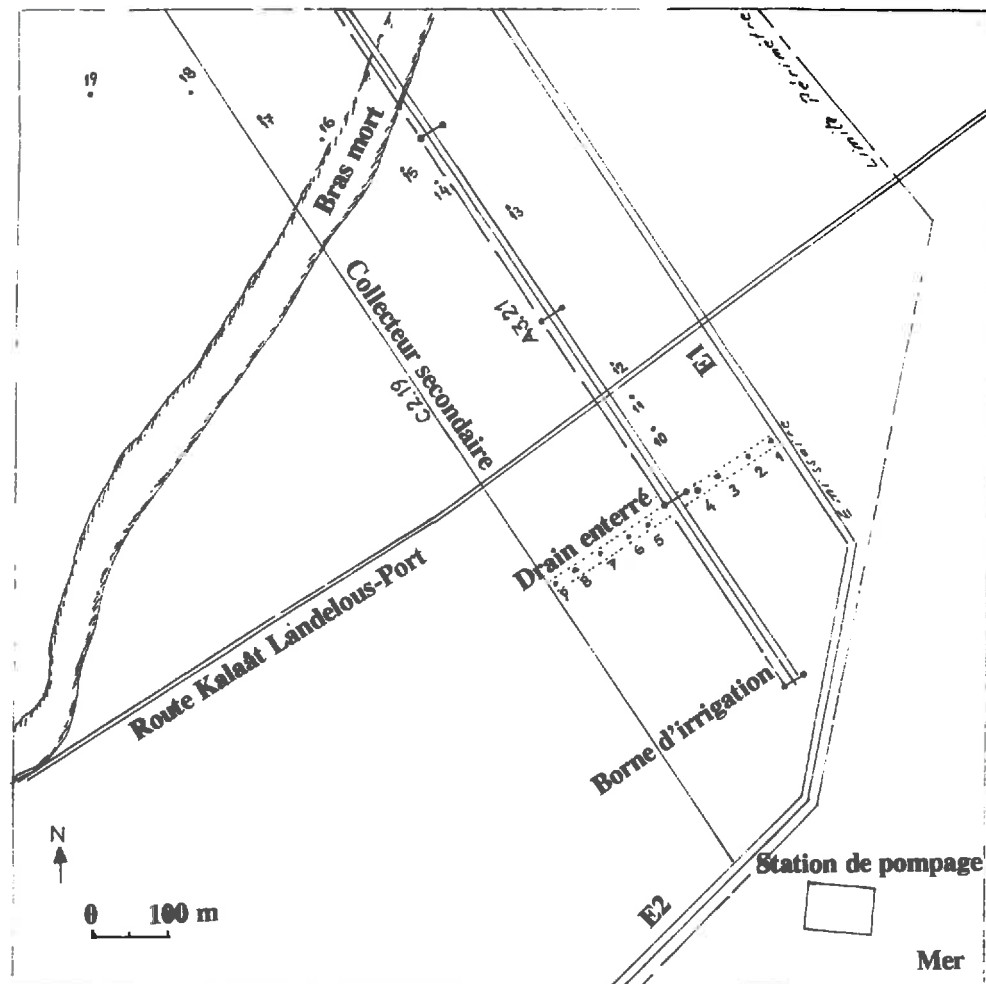


Figure 76. Emplacement des batteries de piézomètres dans le système émissaire/collecteur/drains/parcelle.

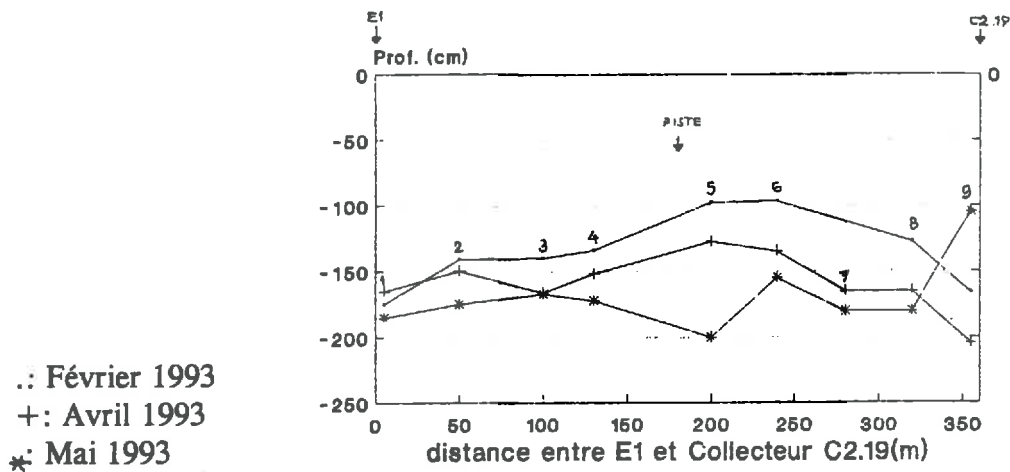


Figure 77. Profondeur de la nappe entre l'émissaire E1 et le collecteur C2.19.

Les salinités de la nappe varient de pair. Elles sont inférieures à 10 dS/m en janvier et s'élèvent à plus de 15 dS/m en avril. Elles s'atténuent en mai et deviennent plus dispersées avec le démarrage des irrigations (Figure 78).

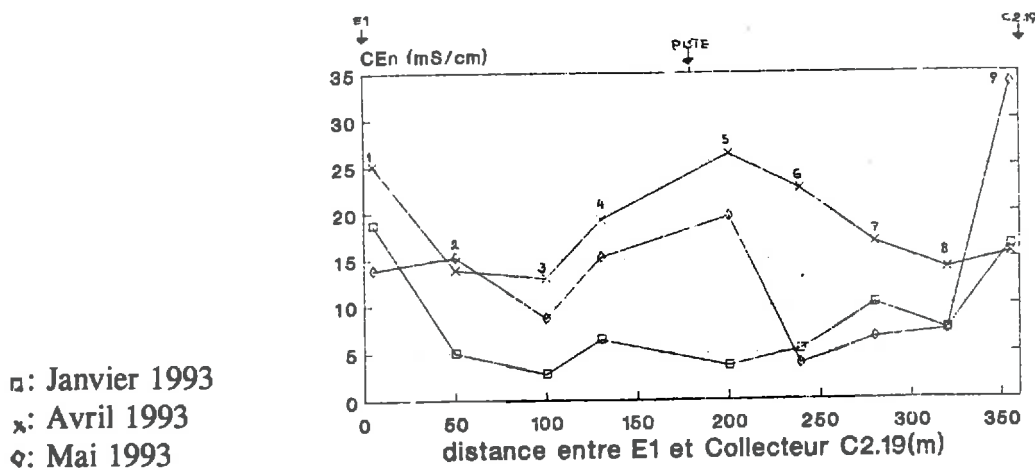


Figure 78. Salinité de la nappe entre l'émissaire E1 et le collecteur C2.19.

Variabilité des caractéristiques de la nappe liées aux aménagements et au réseau hydrographique naturel:

Sur la seconde batterie de piézomètres, la piste agricole aménagée crée une discontinuité dans l'écoulement de la nappe. Celle-ci reste relativement plus profonde qu'au milieu des parcelles (Figure 79). Cette piste dispose de part et d'autre, d'un fossé d'assainissement profond de 50 cm.

Les bras morts constituent l'autre facteur de discontinuité. La profondeur de la nappe dans les parcelles voisines d'un bras mort descend à plus de 2 m. L'analyse de la salinité corrobore l'effet de la piste et du bras mort dans l'efficacité du drainage et aussi dans la discontinuité de l'écoulement de la nappe.

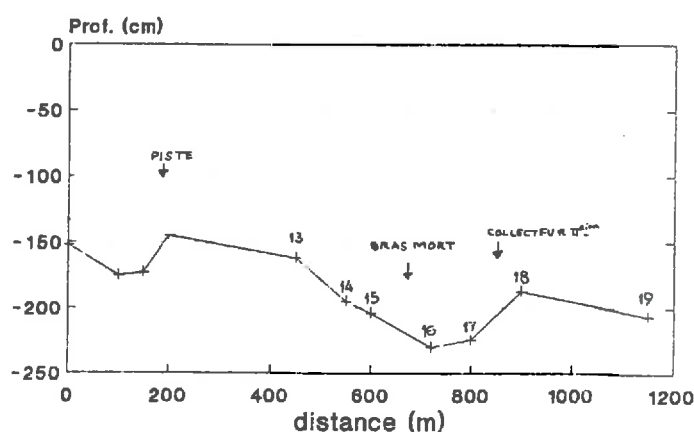


Figure 79. Effet des pistes agricoles et des bras morts sur la profondeur de la nappe.

Nous en déduisons que les mesures réalisées au milieu de la parcelle (piézomètre n°4 dans la figure 76) sont affectées d'une variabilité moyenne d'environ 20% pour la profondeur de la nappe (30 cm sur 150 cm) et 25% pour la salinité (4 dS/m sur 16 dS/m). Cette variabilité est encore plus forte quand la parcelle avoisine une piste agricole ou un bras mort. Ainsi, pour abaisser cette variabilité dans les mesures de terrain extrapolées à des parcelles d'environ 30 ha, le nombre de piézomètres doit être augmenté en fonction des facteurs de variabilité qui agissent sur les caractéristiques de la nappe.

Ainsi, dans le *système sol-nappe*, les évolutions des caractéristiques de la nappe sont relatives à trois périodes: avant l'exécution des canaux d'assainissement-drainage, à la fin de ces travaux et avant l'irrigation et finalement après le démarrage de l'irrigation et de son extension progressive.

Le périmètre de Kalaât constitue un modèle de bonification de sols affectés par une nappe superficielle et par les sels. La désalinisation considérable des sols en témoigne. La mise en valeur n'a été faisable qu'en assurant le refoulement des eaux de drainage vers la mer. Le bilan global des sels dénote des quantités considérables de sels exportés. L'impact du drainage est positif par la désalinisation qu'il a produit. L'impact des irrigations est en cours d'expression mais un amorçage d'une salinisation est manifeste.

Au cours des années 1995 et 1996, les tendances moyennes liées au système sol-nappe-drains du périmètre de Kalaât Landelous sont une profondeur de la nappe située aux alentours de 1,6 m, une baisse de la salinité de la nappe et une salure globale de l'ordre de

5,5 dS/m. Ces tendances reposent sur un équilibre fragile qui dépend de l'accroissement des irrigations et de la maîtrise des fluctuations de la nappe. Mais cette mise en valeur est tributaire de l'efficacité du réseau d'assainissement et de drainage. Les analyses réalisées sur le *système émissaire/collecteur/drain*s ou encore le *système émissaire/collecteur/drain/parcelle* révèlent de fortes variabilités des débits des eaux et des salinités qui leur sont associés et aussi des caractéristiques de la nappe. Ces variabilités sont induites essentiellement par la nature de l'aménagement, le type du micro-relief, le réseau hydrographique naturel subsistant et la gestion de l'eau et des sols au niveau de la parcelle. Ceci met en évidence la vitesse de la désalinisation des sols et de leur bonification. Elle était ainsi très rapide quand les facteurs du milieu étaient favorables, moins rapide quand elle subissait des contraintes liées essentiellement à la nappe.

Par ailleurs, la salinité moyenne de la nappe de l'ordre de 10 dS/m au niveau de la parcelle et la salinité moyenne des eaux pompées à l'extérieur du périmètre de l'ordre de 20 dS/m posent quelques interrogations. Si la désalinisation se poursuit encore dans les périmètres, les analyses de la salure des sols montrent qu'elle concerne plus la couche 0,60-1,40 m. La couche 0-0,60 m est à un stade de désalinisation très avancé surtout quand le sol n'est pas mis en irrigation. Mais ceci à lui seul ne peut expliquer le dédoublement de la concentration des eaux entre la parcelle et la station de drainage. Il y a certainement une concentration des solutions dans les collecteurs et les émissaires surtout dans les lieux de stagnation des eaux et aussi une infiltration diffuse de solutions très chargées en sels depuis les sols très salés riverains non drainés et une intrusion depuis la mer. Quelques mesures réalisées au cours de l'année 1993 (Missaoui, 1993) ont mis en évidence cette contamination. L'emploi d'isotopes tel que O_{18} pourrait aider à comprendre le transfert des solutés.

Dans l'avenir, tant que les drains jouent leur rôle de stockage des eaux excédentaires, les émissaires leur rôle de transport et la station de pompage son rôle de refoulement de ces eaux vers la mer, la salure des sols sera dans les limites tolérables par les cultures. Le dysfonctionnement de l'une de ces composantes se traduira par un déséquilibre qui aboutira inéluctablement à la salinisation des sols.

Enfin, l'évolution de la salure des sols met en évidence une phase pluviale et une phase d'irrigation. Si l'effet du drainage a été traité dans l'analyse du système sol-nappe et le système émissaire/collecteur/drain/parcelle, l'effet de la pluie n'a été qu'indirectement apprécié. Il sera complété dans le sous chapitre qui suit.

III. LE FONCTIONNEMENT DU SYSTEME SOL-PLUIE

Dans la première partie, nous avons mis en évidence la contribution de la pluie dans la bonification naturelle des sols salés de la lunette. Dans cette seconde partie, nous allons examiner le rôle des pluies dans la récupération des sols salés du périmètre de Kalaât Landelous. Mais dans ce cas, l'efficacité de ce rôle est associée à l'état de surface du sol. D'ailleurs, dans une expérience de lessivage artificiel des sels réalisée dans la plaine d'Utique, sol semblable à celui de Kalaât et périmètre limitrophe, l'efficacité du lessivage a été considérablement améliorée quand la surface du sol a été labourée (CRUESI, 1970).

Le fonctionnement du système sol-pluie est analysé au niveau de parcelles représentatives. L'essai de simulation de pluie est réalisé à la fin du cycle d'irrigation (Octobre 1992). L'état de la surface des sols et l'intensité des pluies sont intégrés dans cet essai. L'expérimentation réalisée en automne sur des parcelles ayant été irriguées par aspersion à l'eau saumâtre durant tout l'été permet de simuler l'effet des pluies automnales sur ces sols en fonction des différentes pratiques agricoles. Nous en déduisons les conséquences sur le choix du mode d'irrigation. L'essai réalisé dans les parcelles du périmètre de la Cebalat est employé pour apprécier l'effet du mode d'irrigation sur l'efficacité du lessivage (Hachicha et al., 1996d). Le périmètre de Cebalat est en fait irrigué par submersion. Les autres paramètres eau et sol sont considérés très semblables à ceux du périmètre de Kalaât (même contexte de genèse des sols).

Dans l'ordre, nous caractérisons selon le protocole présenté au début de ce chapitre, l'état de surface des parcelles d'essai puis nous analysons l'évolution du ruissellement, la dégradation de la surface et la conséquence sur l'efficacité lixivante de l'eau de pluies simulées. Nous passons ensuite à l'estimation de la conductivité hydraulique sur sol saturé et enfin nous analysons l'effet du mode d'irrigation sur les organisations de surface. La méthodologie de la simulation de pluie et la terminologie des caractéristiques de cette simulation sont exposées au début du chapitre II (§I. Méthodes).

III.1. Caractérisation des états de surface

Les essais de simulation sont réalisés sur des sols secs en surface environ un mois après l'arrêt des irrigations (Planche 9. Aussi bien à Kalaât qu'au Cebalat, l'humidité pondérale était de l'ordre de 17% en surface et 24% vers 1 m de profondeur (l'humidité pondérale à pF 4,2 est d'environ 17% et 28% à pF 2,7).

Le sol du périmètre de Kalaât est légèrement plus argileux, moins limoneux, moins salé et aussi pauvre en matière organique et sodique que celui de Cebalat (Tableau 44). Son irrigation par **aspersion** conduit à la formation d'une pellicule de battance qui atteint 85% de l'état de surface (moyenne de deux répétitions), (Tableau 45) et au développement d'une rugosité de l'ordre de 8% alors qu'elle est de 3% dans le labour.

Dans le sol du périmètre de Cebalat et après une dizaine d'irrigations estivales par **submersion**, la structure de la surface du sol évolue d'un état de labour rugueux vers un épipédon massif à éléments structuraux polygonaux de l'ordre d'une dizaine de centimètres de côté. Ces éléments sont séparés par des fentes de l'ordre de 3 mm de large qui s'enfoncent à environ 10 cm. Ils sont arrondis au sommet et couverts par une fine pellicule

de matière organique. L'état de surface engendré par les irrigations est à 56% formé par une pellicule de battance et à 21% par des fentes. La rugosité engendrée par les irrigations est plus faible que celle produite par le labour, 5% pour le sol nu et environ 13% pour le labour.

Tableau 44. Caractérisation pédologique de la surface des parcelles (0-10 cm), à la fin du cycle d'irrigation (début octobre 1992) et sans labour.

Périmètre	Granulométrie (%)					Calcaire (%)		M.O. (%)	CEe dS/m	ESP
	A	Lf	Lg	Sf	Sg	Total	Actif			
Kalaât	32	27	23	18	0	38	15	1,2	4	14
Cebalat	27	34	22	13	1	47	23	0,7	3	14

Tableau 45. Etats de surface des parcelles expérimentales de simulation (avant les simulations réalisées entre le 28/9 et le 2/10/1992).

Périmètre / Irrigation	Sites	Occupation du sol	Pente (%)	Etat de surface (%)				
				Vég.	Bat.	Rec.	Nu	Fen.
Kalaât/ Aspersion	KL2 et KD3	Ch. +Pel. battance	1,1	9	85	2	4	0
	KL3 et KD2	Labour	1,3	14	0	0	86	0
Cebalat/ Submersion	CL3 et CF2	Ch. +Pel. battance	1,3	18	56	5	0	21
	CF3 et CL2	Labour	1,3	6	0	0	94	0

Ch. +Pel.battance: Chaume de maïs et pellicule de battance; Vég.:végétation au sol;
Bat.:pellicule de battance; Fen.:Fentes; Rec.:recouvrement sableux; Nu:sol nu sans battance.

III.2. Evolution sous pluies simulées

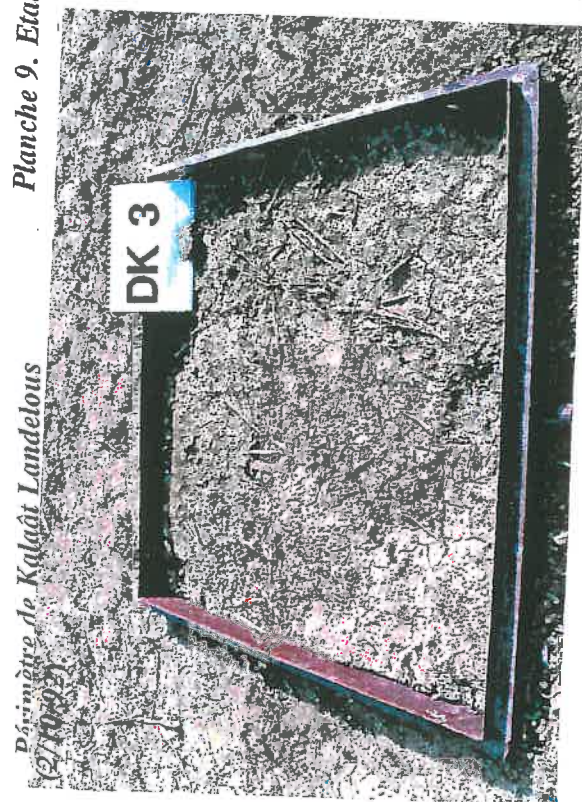
Lors d'une averse, le sol s'humecte puis génère du ruissellement. Ces événements dépendent de l'état de surface et de l'intensité de la pluie. Nous allons examiner cet aspect dans l'efficacité du ruissellement. Sous l'impact des gouttes de pluie, la structure de la surface du sol se dégrade et se réorganise. Cet aspect est aussi fonction de l'intensité de la pluie et de l'état de surface du sol. Il sera abordé en deuxième phase. Une interprétation sur la lixiviation des sels sera tentée au dernier paragraphe.

III.2.1. Efficacité du ruissellement

Le coefficient de ruissellement (Kre) permet de distinguer les différences de comportement pendant cette phase. L'efficacité est abordée pour deux états hydriques et deux états de la surface du sol.

A Kalaât: sur *sol sec* (séquence d'averses P1), le ruissellement est nul jusqu'à une intensité de 40 mm/h. Il ne devient effectif qu'à partir d'une intensité de 80 mm/h dans les parcelles labourées (Figure 80). Sur *sol humide* (séquence d'averses P2 intervenant après une séquence de pluies P1 conduite la veille), le ruissellement se produit même à une intensité de 30 mm/h (durée de l'averse de 15 mn). Ce ruissellement est environ 3 fois plus important quand le sol est humide que quand il est sec et 7 à 20 fois plus élevé dans le sol couvert par *une pellicule de battance* que dans le *labour*.

La signification des symboles utilisés a été donnée à la page 114.



Etat de surface du sol après un cycle d'irrigation par aspersion



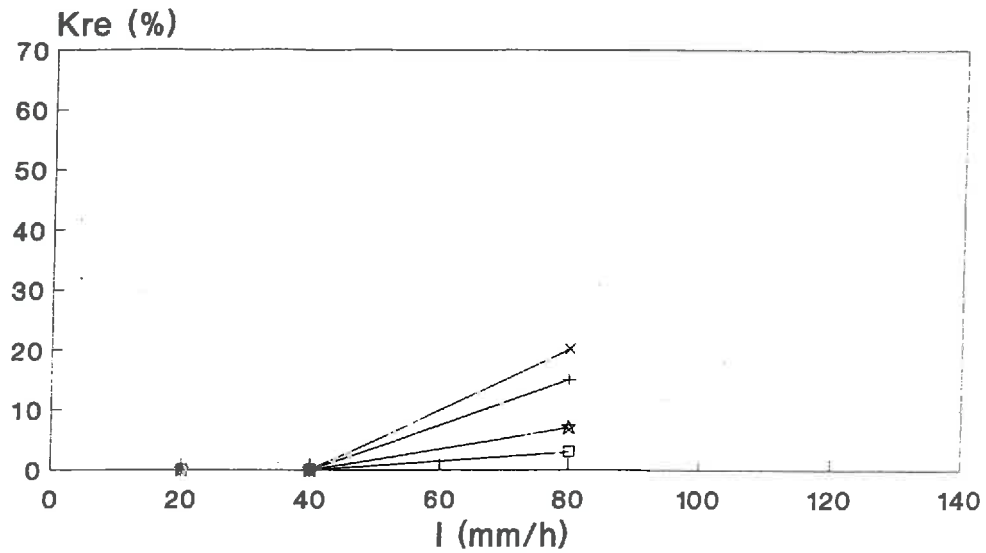
Etat de surface du sol labouré après un cycle d'irrigation par aspersion (2/10/92).



Etat de surface du sol après un cycle d'irrigation par submersion

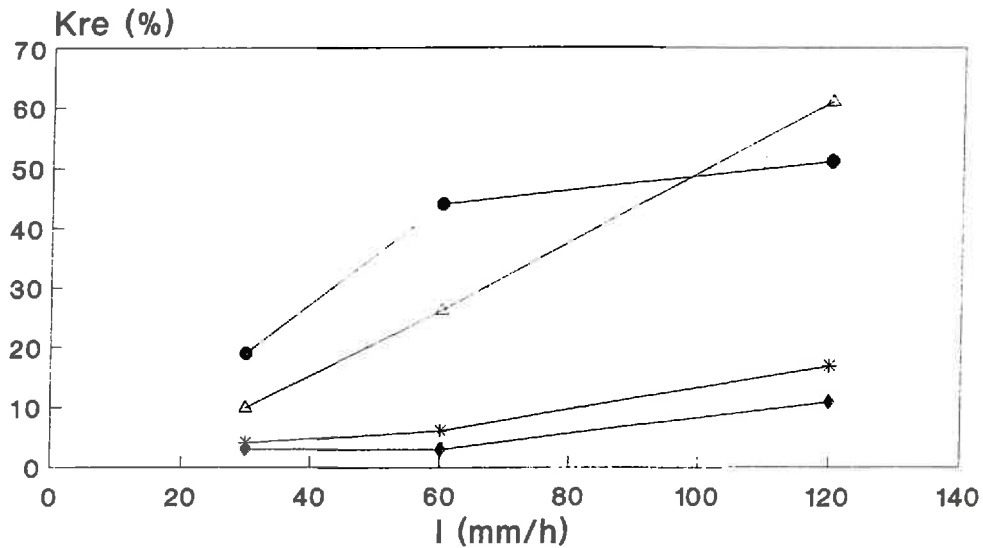


Etat de surface du sol labouré après un cycle d'irrigation par submersion (2/10/92).



Sol sec

—*— C.L/S —+— C.C/S —□— K.L/S —x— K.C/S



Sol humide

—*— C.L/H —●— C.C/H —◆— K.L/H —△— K.C/H

—x— K.C/S	KALAAT:	—*— C.L/S	CEBALAT:
—◆— K.L/H	K.L/S: Labour/sol sec;	—*— C.L/H	C.L/S: Labour/sol sec;
—□— K.L/S	K.L/H: Labour/sol humide;	—+— C.C/S	C.L/H: Labour/sol humide;
—△— K.C/H	K.C/S: Chaume et pellicule de battance/sol sec;	—●— C.C/H	C.C/S: Chaume et pellicule de battance/sol sec;
	K.C/H: Chaume et pellicule de battance/sol humide.		C.C/H: Chaume et pellicule de battance/sol humide.

Figure 80. Variation du ruissellement en fonction de l'occupation du sol et de son état hydrique.

A Cebalat, le ruissellement n'est que 2 à 5 fois plus élevé dans le sol couvert par une pellicule de battance que dans le labour, et 2 à 3 fois quand le sol est humide que quand il est sec.

Eu égard aux mesures réalisées à Kalaât et à Cebalat, le sol de Cebalat comportant des fentes en surface engendre un ruissellement d'environ 30% de moins que celui de Kalaât dépourvu de fentes. Par ailleurs, le sol humecté par l'averse P1 qui précède P2, produit toujours un ruissellement même aux faibles intensités.

Lors d'une averse simulée, le sol s'humecte avant de générer le ruissellement. Ces fractions dépendent de l'état de surface et de l'intensité de la pluie. La réorganisation de la surface sous l'impact des gouttes de pluie est plus importante pour le labour et se traduit par la diminution de l'infiltration au cours des averses successives. L'état de surface tend alors à se rapprocher de celui du sol nu battant non labouré. Les pluies d'intensités faibles s'infiltrant plus qu'elles ne donnent lieu à un ruissellement car elles ne modifient que faiblement l'organisation structurale de la surface du sol contrairement aux pluies d'intensités élevées.

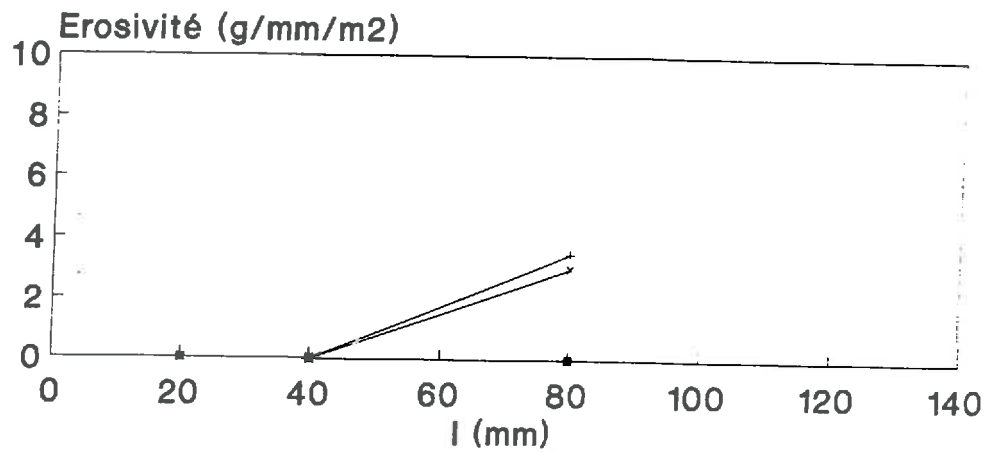
Le ruissellement se déclenche à des moments différents suivant les états de surface. La cohésion des agrégats sur sol sec battant ralentit leur mobilisation. Après humidification, la mobilisation d'éléments fins désagrégés par les pluies précédentes est rapide (Escadafal, 1989). Les fentes qui apparaissent sur alluvions argileuses ne se referment qu'après un certain temps et allongent par conséquent la durée d'imbibition.

Sur labour, la désagrégation des agrégats est très différente suivant leur état d'hydratation initial. Lorsque les agrégats sont secs, la désagrégation est plus importante et un excès d'eau apparaît rapidement en surface. En revanche, lorsqu'ils sont saturés, la croûte se forme lentement et l'infiltrabilité reste élevée (Le Bissonnais et al., 1990).

III.2.2. Dégradation de la structure des sols

Dans le cas où les averses sont conduites sur le sol sec de Kalaât, en fin de culture, couvert d'une pellicule de battance, l'érosion ne se manifeste qu'à partir d'une intensité de 80 mm/h. L'érosivité (détachabilité) du millimètre d'eau ruisselé est d'environ 3,5 g/mm/m² (Tableau 46). Si le sol est humide, cette érosion se produit avec une pluie de 30 mm/h. Dans ce cas, l'érosivité est d'environ 1 g/mm/m² pour une pluie de 30 mm/h et s'élève à 4 g/mm/m² quand la pluie est de 120 mm/h. Quand ces averses surviennent sur un labour qu'il soit sec ou humide, l'érosion ne se manifeste que pour une intensité élevée de 120 mm/h (Figure 81). L'érosivité est du même grandeur que sur sol humide. Elle est d'environ 4 g/mm/m² soit 0,04 t/ha par mm ruisselé.

Dans le cas du sol sec de Cebalat, couvert par une pellicule de battance, l'érosion apparaît à partir d'une intensité de 80 mm/h. L'érosivité est d'environ 3 g/mm/m². Sur sol humide, l'érosivité est d'environ 4 g/mm/m² aussi bien pour 30 mm/h que pour 60 mm/h. Elle double pour une intensité de 120 mm/h. Si les averses sont appliquées à un sol labouré sec, l'érosion est pratiquement nulle jusqu'à une intensité de 80 mm/h. Si le sol est humide, elle se déclenche à partir de 30 mm/h (1 g/mm/m²) et triple à 120 mm/h.



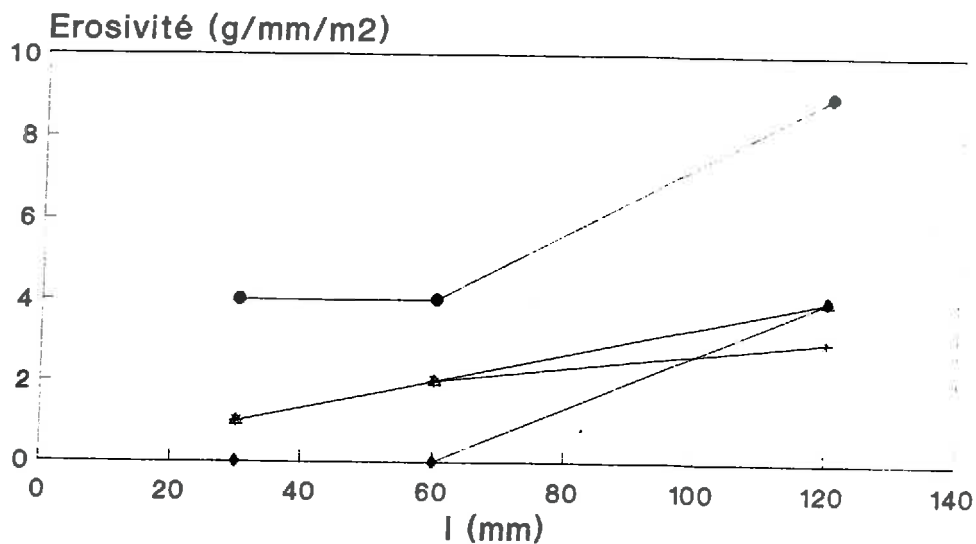
C.L/S

C.C/S

K.L/S

K.C/S

Sol sec



C.L/H

C.C/H

K.L/H

K.C/H

Sol humide

KALAAT:

—* K.C/S K.L/S: Labour/sol sec;
 —♦ K.L/H K.L/H: Labour/sol humide;
 —□ K.L/S K.C/S: Chaume et pellicule de battance/sol sec;
 —△ K.C/H K.C/H: Chaume et pellicule de battance/sol humide.

CEBALAT:

—* C.L/S C.L/S: Labour/sol sec;
 —* C.L/H C.L/H: Labour/sol humide;
 —+ C.C/S C.C/S: Chaume et pellicule de battance/sol sec;
 —● C.C/H C.C/H: Chaume et pellicule de battance/sol humide.

Figure 81. Variation de l'érosivité en fonction de l'occupation du sol et de son état hydrique.

Tableau 46. Ruissellement et érosivité des sols de Kalaât et de Cebalat en fonction de l'intensité de la pluie et l'occupation du sol.
 Simulations réalisées les 29 et 30/9/1992 à Kalaât et 2 et 3/10/1992 à Cebalat.
 (Kre: coefficient de ruissellement efficace et Er: Erosivité).

Périmètre	Occupation du sol	Séquence	I(mm/h)	Kre(%)	Er(g/mm/m2)
Kalaât	Chaume+Pellicules de battance	P1	20	0	0
			40	0	0
			80	20	3,5
		P2	30	10	1
			60	26	2
		P3	120	61	4
	Labour	P1	20	0	0
			40	0	0
			80	3	0
		P2	30	3	0
			60	3	0
		P3	120	11	4
Cebalat	Chaume+Pellicules de battance	P1	20	0	0
			40	0	0
			80	15	3
		P2	30	19	4
			60	44	4
		P3	120	51	9
	Labour	P1	20	0	0
			40	0	0
			80	7	0
		P2	30	4	1
			60	6	2
		P3	120	17	3

Une averse de 30 mm/h sur sol déjà humide apparaît dans certaines parcelles plus érosive qu'une averse de 60 mm/h sur sol sec. En fait, dans une séquence donnée, les averses de faibles intensités qui précèdent une averse plus intense, commencent par humecter les agrégats qui éclatent progressivement. Les éléments fins déliés de leur squelette sont ainsi disponibles à l'entraînement et au transfert horizontal, ce que l'intensité des pluies qui succèdent se charge de faire. Ce raisonnement s'applique également à l'enchaînement des séquences P1, et P2 et P3 qui se réalise le lendemain. Il serait donc hasardeux de voir chaque résultat obtenu en dehors du protocole expérimental. Au cours de chaque averse et aussi au cours de la même averse, les organisations superficielles subissent des modifications morphologiques et physico-hydriques et les couches sous-jacentes se saturent en eau. Cet enchaînement d'événements se traduit par des comportements mécaniques et hydriques en perpétuelles transformations. Les mécanismes des phénomènes de désagrégation apparaissent presque simultanément en début de pluie (Valentin, 1985):

- effet de l'énergie cinétique des pluies sur la désagrégation.
- éclatement des agrégats et fragmentation structurale au cours de l'humidification sous l'effet de la pression de l'air des capillaires;
- gonflement et dispersion des argiles smectiques.

III.2.3. Quelques aspects relatifs au lessivage des sels

D'abord, les eaux employées dans les essais, sont celles utilisées dans les irrigations. C'est le point faible de notre essai (Tableau 47).

Tableau 47. Qualité de l'eau d'irrigation (9/1991; les ions sont exprimés en méq/l).

Périmètre	pH	RS(g/l)	CEe(dS/m)	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	SAR
Kalaât	8,0	2,6	3,8	24,8	8,0	5,6	2,8	22,5	50,1	10
Cebalat	8,1	3,5	5,0	44,4	16,0	9,1	4,4	13,7	13,8	13

La lixiviation des sels est le résultat de la dissolution des accumulations salines et de l'entraînement des sels libres. Dans les périmètres de Cebalat et Kalaât, les chlorures de sodium prédominent largement sur les autres types de sels (Bach Hamba, 1992). Comme ces sels sont très solubles et que la durée des mesures est suffisante pour les dissoudre, on peut considérer qu'une bonne infiltration est la condition sine qua non pour un bon lessivage des sels. Deux contraintes majeures s'opposent à cette hypothèse. D'abord, la tranche de sol humecté dans les essais de simulation est souvent une couche de surface alors que le lessivage des sels concerne tout l'épipédon. Ensuite, le ruissellement de surface contribue à emporter les sels accumulés en surface. Néanmoins, dans les conditions de Kalaât et Cebalat, le ruissellement est faible et local et la présence d'une nappe phréatique à moins de 1,60 m maintient le sol à une humidité élevée. Dans ces conditions, l'efficacité de la lixiviation des sels est très dépendante de l'efficacité de la pluie dans la recharge des réserves en eau du sol. En s'appuyant sur cette approximation (qui ne s'éloigne pas de la réalité), l'efficacité de l'infiltration et par conséquent celle de la lixiviation des sels diminue quand celle du ruissellement augmente et vice versa.

Le mode d'irrigation de ces sols génère une organisation superficielle. L'aspersion produit des pellicules de battance favorables à la formation de flaques et au ruissellement. Le travail du sol et en particulier le labour après la récolte de la culture estivale, sont des mesures anti-érosives efficaces pour le lessivage des sels. Cependant après les premières averses d'automne, le sol humecté devient boueux et un nouvel obstacle à l'infiltration réapparaît.

Par ailleurs, les organisations pelliculaires de surface (O.P.S, Valentin, 1985) réduisent les pertes d'eau par évaporation. Le tassement de l'horizon travaillé et son assèchement conduisent à une "auto-protection" qui ralentit la remontée des sels. La présence d'O.P.S limite considérablement l'entraînement des sels vers les drains.

III.3. Evaluation de la conductivité hydraulique sur sol saturé à la fin de la simulation

Dans la mise en valeur des sols salés, l'amélioration des propriétés hydrodynamiques, en particulier la conductivité hydraulique à saturation, est un préalable à leur récupération. Son estimation permet d'ajuster la gestion des eaux d'irrigation et la conception du drainage des terres. Les données de l'essai de simulation de pluie permettent

de mieux caler les caractéristiques des asperseurs employés dans l'irrigation. Ces asperseurs qui délivrent 6 mm/h, causent souvent des flaques d'eau en surface.

Les conductivités hydrauliques saturées déterminées par le dispositif Müntz (Colombani et al., 1972), calculées par les pluies simulées, ou estimées par le modèle de Green et Ampt (1911) ne sont pas directement comparables, puisqu'elles ne correspondent pas aux mêmes approches. Cependant, plusieurs auteurs ont tenté de faire la comparaison (Lafforgue et al., 1976; Valentin, 1985).

Dans nos simulations de pluies, nous aboutissons à des intensités limites de ruissellement qui se rapprochent assez des conductivités hydrauliques saturées obtenues par la méthode Müntz et celles estimées par le modèle de Green et Ampt (1911), (Tableau 48).

Tableau 48. Comparaison des conductivités hydrauliques saturées à partir des relations de Green et Ampt (Ka), des mesures Müntz (Km) et des valeurs empiriques d'intensité limite de ruissellement (Il).

Périmètre	Sites	Etat de surface après simulation	Km(mm/h)	Il (mm/h)	Ka(mm/h)
				P3	
Kalaât	KL2-KD3	Chaume + Pellicule de battance	24	15	25
	KL3-KD2	Labour + Pellicule de battance induite par les averses	102	107	105
Cebalat	CF2-CL3	Chaume + Pellicule de battance + fentes	54	58	52
	CF3-CL2	Labour + Pellicule de battance induite par les averses	72	70	60

* Les valeurs de Km proviennent de 4 répétitions.

- Par le dispositif de Müntz:

A Kalaât, les mesures faites sous lame d'eau de 3 cm, employant le dispositif de Müntz et réalisées à la fin des séquences de la simulation dans les parcelles labourées, aboutissent à des conductivités hydrauliques à saturation (Km) de l'ordre de 102 mm/h, soit quatre fois plus élevées que dans les parcelles couvertes par des pellicules de battance où elle est de l'ordre de 24 mm/h (Tableau 48).

A Cebalat, sur les labours qui ont subi les averses de la simulation, Km est de 72 mm/h. Pour les parcelles à la fois couvertes par une pellicule de battance et fissurées, Km n'est que de 54 mm/h.

- Par les intensités limites des simulations de pluie:

Valentin (1985) considère que l'intensité limite de ruissellement (Il) de la dernière séquence pluvieuse peut être assimilée à la conductivité hydraulique saturée.

A Kalaât, la valeur de Π de la dernière séquence pluvieuse P3 est d'environ 107 mm/h pour les parcelles labourées et 15 mm/h pour celles couvertes par une pellicule de battance.

A Cebalat, la valeur de Π de P3 est d'environ 70 mm/h pour les parcelles labourées et 58 mm/h pour celles couvertes par une pellicule de battance et fissurées.

- Par le modèle de Green et Ampt:

Partant de l'équation de Green et Ampt, Valentin (1985) parvient à la relation suivante qu'il applique à la fin de la pluie qui survient au temps t :

$$K_a = [F_n * W(t) - \Pi * I] / [W(t) - \Pi]$$

avec K_a : conductivité hydraulique à saturation déterminée par le modèle de Green et Ampt, $W(t)$: lame infiltrée, Π : pluie d'imbibition, et F_n infiltration minimale stabilisée.

Pour appliquer cette équation aux résultats expérimentaux, ceux-ci doivent satisfaire aux deux conditions suivantes: Π différent de $W(t)$, le ruissellement doit se manifester et $F_n > \Pi * I / W(t)$.

Les conductivités hydrauliques saturées (K_a) calculées selon cette équation sont proches à celles précédemment décrites.

A Kalaât, nous retrouvons 105 mm/h dans le labour et 25 mm/h pour le sol couvert d'une pellicule de battance.

A Cebalat, K_a est égale à 60 mm/h dans le labour et 52 mm/h dans le sol couvert d'une pellicule de battance.

- Comparaison de K_m , Π et K_a :

Les résultats sont significativement égaux au seuil 5 %. Ainsi, nous obtenons des estimations assez voisines selon les différentes approches. Il est hasardeux de conclure que les approches pourtant très différentes conduisent dans tous les cas à des résultats voisins, mais il est intéressant de signaler que dans le cadre de ces travaux, ils sont concordants. Les différences de résultats qui peuvent provenir sont causées par des réactions de la surface du sol (Lafforgue et al., 1976), par l'influence des suctions latérales sur le volume humecté (Valentin, 1985), par l'épaisseur de matériaux et par l'évolution des états de surface des parcelles au cours des pluies (Poss et al., 1991).

Les conductivités hydrauliques sur sols saturés provenant des essais de simulation ou des mesures Müntz et basées sur des approches différentes convergent au niveau des valeurs. La désagrégation mise en place sous lame d'eau ou sous pluies simulées donne lieu à des organisations pelliculaires superficielles qui agissent fortement sur les phénomènes de transferts hydriques et des solutés.

Les intensités d'infiltration mesurées par la méthode de Müntz et réalisées en condition de saturation maximale sont pour la plupart similaires aux intensités limites de ruissellement déduites des essais de simulation. Si on peut admettre ces intensités pour estimer les doses d'irrigation par submersion, il est par contre plus exact de se baser sur les essais de simulation de pluies pour concevoir les irrigations par aspersion qui sont mieux reproduites par ces essais.

III.4. Organisations de surface et mode d'irrigation

Nos observations réalisées à la fin des simulations nous ont permis de noter que les microhorizons apparaissent réduits à un premier niveau de 1 mm environ, à dominance de limons, suivi d'un second plus épais de matériaux compacts qui forme ensemble une croûte qui se distingue du microhorizon sous-jacent et se sépare par une zone à gros pores qui préserve quelques caractères des agrégats formés au cours du labour. Ces organisations s'apparentent à celles générées sous irrigation par aspersion. D'ailleurs, plusieurs auteurs ont employé cette technique pour le choix des asperseurs adéquats (Valentin et Ruiz Figueroa, 1987).

Au cours d'un itinéraire d'irrigation, les organisations qui résultent de l'une des deux méthodes d'irrigation sont détruites par le labour. Ce dernier a pour effet de bouleverser la structure de l'horizon de travail. Le labour, suivi des pluies et de la dessiccation, s'accompagne de la formation d'une organisation de surface dont la porosité est nettement plus réduite que l'organisation initiale.

En ce qui concerne le comportement hydrodynamique et la conséquence sur la lixiviation des sels, nous constatons que:

- l'horizon à gros pores situé sous l'organisation de surface à pores plus fins stoppe momentanément la progression du front. L'eau s'accumule à la base du matériau à pores fins jusqu'à ce que le potentiel soit devenu suffisamment bas pour permettre l'entrée de l'eau dans l'horizon suivant (Hillel et Garder, 1969).

- au cours des irrigations, le microhorizon peu perméable en surface expose plus l'eau à l'ensoleillement et à l'évaporation. A la fin des irrigations, cet obstacle hydraulique protège le sol du dessèchement. Le flux ascendant des sels depuis la nappe phréatique superficielle salée se trouve ainsi réduit (Hillel, 1964).

- les organisations de surface qui résultent de l'aspersion limitent l'infiltration. La parcelle irriguée par submersion présente une conductivité hydraulique saturée à peu près double de celle générée par aspersion (24 mm/h). Il faut aussi noter l'effet des fentes qu'on retrouve dans le premier cas et qui disparaissent dans le second. Le rôle des fentes intéresse les chercheurs qui se préoccupent de l'efficience de l'utilisation de l'eau dans les sols gonflants. De notre côté, nous envisagerons l'étude du retrait et du gonflement des sols et leur fonctionnement hydro-structural.

Enfin s'agissant de l'érosivité en fonction des façons culturales, on observe que:

- le labour précoce d'automne est favorable à l'infiltration de l'eau et à la réduction du ruissellement. Ceci conduit au meilleur lessivage des sels, à une amélioration des réserves hydriques et au comblement et à la fermeture des fissures qui peuvent acheminer les eaux pluviales directement vers les drains, les rendant ainsi inefficaces.

- l'érosivité augmente avec l'aspersion. Les mêmes intensités de pluie érodent plus le sol à Cebalat qu'à Kalaât.

Ainsi, dans le *système sol-pluie*, les sols limono-argileux et salins du périmètre de Kalaât Landelous, subissent entre l'automne et l'été, l'impact des pluies qui permettent un certain lessivage des sels et une réorganisation de leur surface. Dans ce système, la réhabilitation des sols peut être rendue plus rapide et moins coûteuse si la gestion des sols et des eaux tient plus compte du régime des pluies.

Le mode d'irrigation conduit la surface du sol irrigué à deux états différents. Les fissures présentes ordinairement dans les sols irrigués par submersion n'existent pas sous aspersion. Plusieurs autres aspects apparaissent liés à l'un ou à l'autre des modes d'irrigation: aspersion et submersion. Il s'agit de la nature des organisations superficielles et du comportement des sols vis à vis de l'eau, des solutés et de la détachabilité des matériaux.

L'efficacité des pluies est fortement augmentée par des façons culturales qui préparent le sol à mieux infiltrer l'eau, à moins être affecté par le ruissellement et par l'érosion. L'aspersion apparaît moins favorable à certains de ces phénomènes. Cependant, ces inconvénients disparaissent complètement par des itinéraires cultureux adaptés. Ainsi, le comportement du sol à la fin d'un cycle d'irrigations est différent dans Cebalat irrigué par submersion et dans celui de Kalaât irrigué par aspersion. Cette différence n'est plus significative une fois la surface du sol labourée.

Cette efficacité des pluies joue positivement sur l'entraînement des sels. Il s'en suit que la mise en valeur des sols salés de la région doit intégrer judicieusement l'apport favorable des pluies.

IV. CONCLUSION

Le périmètre irrigué de Kalaât Landelous constitue un modèle de mise en valeur de sols affectés par une nappe superficielle salée.

Après la caractérisation des sols dans un premier chapitre, nous avons entamé dans ce second chapitre, le fonctionnement des sols dans les deux systèmes nappe-sol et sol-pluie.

La réhabilitation de ces sols entamée par l'assainissement et le drainage de la plaine et poursuivie par l'irrigation s'est concrétisée dans le *système sol-nappe par une* évolution significative et positive par le rabattement de la nappe et par la désalinisation des sols. Les analyses réalisées sur le *système émissaire/collecteur/drain*s ou encore le *système émissaire/collecteur/drain/parcelle* mettent en évidence des unités morpho-pédologiques dont la récupération de leurs sols s'est exprimée plus ou moins intensément. Le fonctionnement du système sol-nappe fait apparaître une phase pluviale et une phase d'irrigation.

L'effet de la pluie a été appréhendé à travers un essai de simulation de pluie limité dans le temps. Tenant compte du *système sol-pluie*, la bonification des sols peut être accélérée.

Comme le mode d'irrigation conduit à la formation d'organisations de surface moins favorable à l'infiltration de l'eau et à la lixiviation des sels auxquelles l'efficacité des pluies est sensible, des façons culturales assez simples sont d'un apport considérable dans l'effort de mise en valeur des sols salés.

Chapitre III

L'EVOLUTION DES SOLS

A L'ECHELLE DE LA PARCELLE

L'évolution du sol lourd salé de Kalaât est étudiée au niveau d'une parcelle située dans la zone à haut risque de salinisation du périmètre (Figure 82). Notre intérêt s'est porté sur les apports en sels par les eaux d'irrigation, à la variation de la salure du sol au cours d'une année entière sous culture estivale irriguée et sous culture pluviale hivernale, à l'espace poral et à son évolution dans un sol ordinairement exploité en sec et enfin au comportement des cultures pratiquées. Au début de ce chapitre, nous exposons plus en détail le protocole expérimental et la méthode utilisée pour cerner l'évolution du sol selon différents modes de gestion du couple sol-eau.

I. METHODES

Les composantes sol-nappe-eau-culture sont prises en compte. L'approche est globale et la salinisation n'est pas isolée de son contexte. Cette approche aborde l'évolution du sol dans les systèmes Sol-Eau d'irrigation-Nappe, Sol-Eau d'irrigation-Saisons et enfin Sol-Eau d'irrigation-Plante et aux échelles macroscopique et micromorphologique.

Dispositif et mise en place de l'essai: La parcelle de 400 m² (20 m x 20 m) est située dans une zone à haut risque de salinisation (Figure 82) entre deux files de drains tertiaires enterrés. Le dispositif a été mis en place au printemps 1992. La parcelle située près d'une piste et d'une borne d'irrigation, a été subdivisée en cuvettes de 25 m². La nappe est contrôlée par un piézomètre installé au milieu de la parcelle.

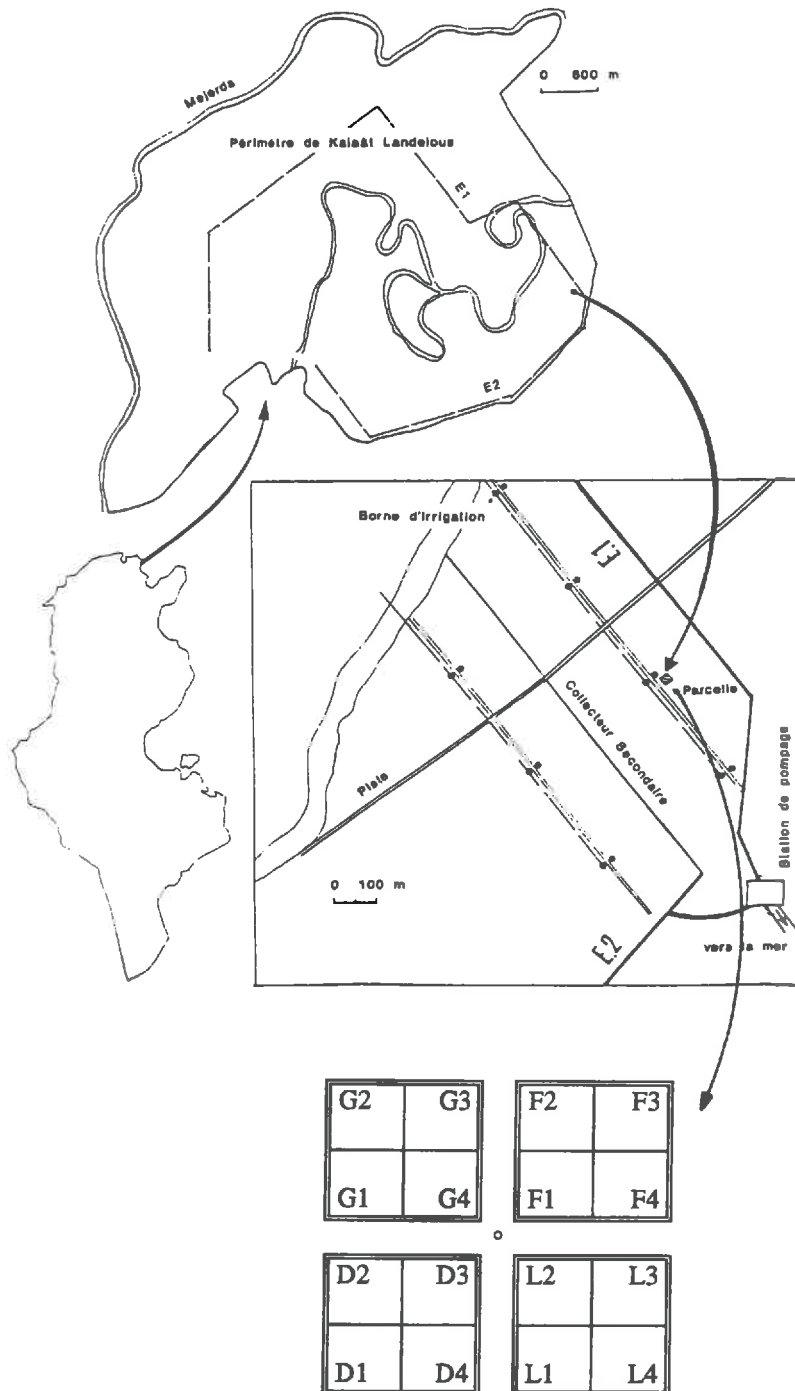
Gestion du sol et suivi des cultures: Durant l'hiver 92, la parcelle avait été occupée par une culture d'avoine. Après sa coupe, le sol a été travaillé (22/05/92) pour recevoir un semis d'une variété de maïs (8/6/92). La récolte a été faite à la mi-septembre (14/9/92).

En septembre 1992, trois quarts des cuvettes ont été labourées, les autres ont été conservées en jachère non travaillée (Tableau 49). Parmi les 12 cuvettes labourées, quatre ont été laissées en jachère travaillée. A la mi-novembre, une culture de triticales a été semée dans huit cuvettes. La récolte s'est faite le 11/04/93. Elle a été suivie par une nouvelle préparation du sol (du 14 au 22/04/93). De nouveau, un maïs fourrager a été semé (12 et 13/05/93). Ce maïs a été récolté le 13/09/93. Le 30/11/93, toute la parcelle a été labourée et elle a été semée en orge le 14/12/93. Les brûlures sur les feuilles nous ont incité à apprécier par des diagnostics foliaires les teneurs des cations majeurs dans la quatrième feuille depuis la base sur les plantes adultes dans les différents traitements 'dose'.

Tableau 49. Occupation des cuvettes de la parcelle.

Cuvettes	Occupation du sol		
	Eté 92	Hiver 92-93	Eté 93
G1, G2, F3, F4	Maïs irrigué	Triticale	Maïs irrigué
G3, F2	Maïs irrigué	Labour	Maïs irrigué
G4, F1	Maïs irrigué	Jachère	Maïs irrigué
D1, D2, L3, L4	Maïs irrigué	Triticale	Jachère
D4, L1	Maïs irrigué	Labour	Jachère
D3, L2	Maïs irrigué	Jachère	Jachère

Gestion des irrigations: Au cours de l'été 92, deux asperseurs assuraient l'irrigation. Le jet des asperseurs a été perturbé par des vents souvent assez forts. Les irrigations se faisaient deux à trois jours par semaine pendant environ quatre heures.



°:piézomètre.

Chaque encadré contient 4 cuvettes de 5 m x 5 m.

Figure 82. Localisation de la parcelle et dispositif expérimental.

Théoriquement, l'asperseur peut délivrer 0,6 l/s (6 mm/h). Le volume d'eau est déterminé au niveau du compteur à la borne d'irrigation. Mais comme l'asperseur ne délivre pas l'eau d'une manière uniforme, un récipient a été placé au milieu de chaque cuvette. Il permettait de connaître la quantité d'eau moyenne par cuvette. Au cours de cette campagne, nous avons eu quatre jours de pluie (1, 2 et 5/7 et 15/8). La quantité est de 54,6 mm. Entre le 9/6 et le 7/9/92, la parcelle a été irriguée une trentaine de fois.

Au cours de l'été 1993, le même matériel d'irrigation a été employé. Cependant, chaque asperseur a été fixé au milieu de 4 cuvettes. Les irrigations ont eu lieu entre 7h30 et 17h et duraient en moyenne 9 à 10 heures. Les deux asperseurs étaient distants de 10 m. Le volume d'eau a été déterminé par un compteur au niveau de la borne d'irrigation et au niveau de chaque cuvette par des récipients placés sur la diagonale à 3,5 m et à 6,5 m de l'asperseur. Le débit d'un asperseur était plus régulier qu'au cours de la campagne précédente. Il se situait vers 0,55 l/s, ceci traduisait une amélioration de la gestion du réseau d'irrigation. En dehors des pluies qui ont précédé le semis et qui étaient exceptionnellement fortes (le 5 et le 6/05/93), les trois jours de pluie se sont traduites par des précipitations insignifiantes. Entre le 12/5/93 et le 13/9/93, la parcelle a été irriguée dix sept fois.

Les eaux d'irrigation à faciès géochimique chloruré sodique, étaient plus chargées en sels au cours de l'été 93 qu'au cours de l'été précédent (Tableau 50). Elles titraient environ 2,5 g/l. Leur teneur élevée en ions Na^+ et Cl^- réduit leur utilisation par aspersion à cause du risque de toxicité par leur absorption foliaire (FAO, 1985).

Tableau 50. Qualité des eaux d'irrigation - Année 1992-1993.

Année	1 9 9 2					1 9 9 3			
Mois	Juin	Juil.	Août	Sept.	Nov.	Juin	Juil.	Août	Sept.
CE(dS/m)	2,7	3,6	3,4	3,5	4,1	3,9	3,8	3,4	3,2

Impact de l'irrigation par aspersion:

- *sur l'uniformité de la distribution de l'eau:* Nous avons déjà signalé que cette distribution n'est pas uniforme. Les vents sont assez fréquents dans la région située près de la mer. Une spatialisation des doses permet de préciser ces perturbations (Figure 83). Plutôt que d'être concentrique autour des deux asperseurs qui ont conservé la même position, les zones iso-doses ont une forme elliptique asymétrique vers l'est et de grand axe nord-sud. Le centre de cette ellipse n'est plus l'asperseur. En conséquence, l'écartement entre les asperseurs et leur alignement doivent être revus.

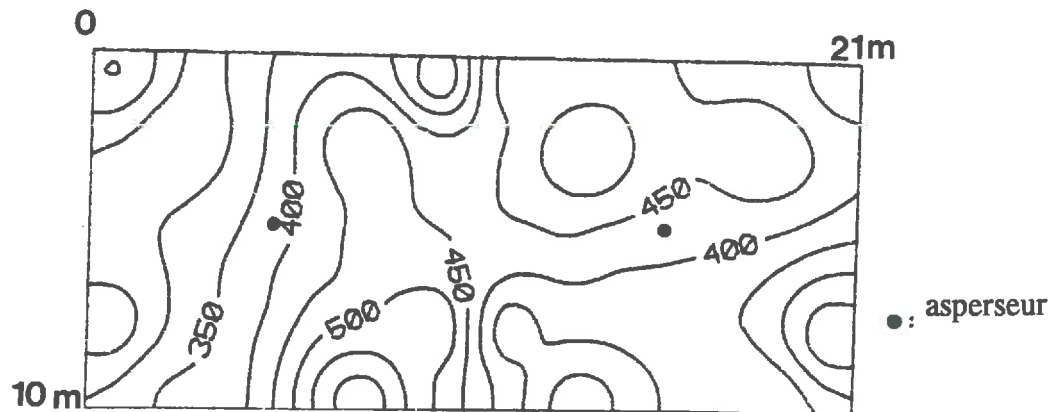


Figure 83. Les zones iso-doses (en mm).

- *sur la répartition des sels*: La distribution de l'eau engendre une répartition des sels identique. A 6,5 m de l'aspersion, on observe un manque d'eau alors que des sols nus au delà de 6,5 m reçoivent l'eau d'une manière régulière (Figure 84). D'où les évolutions de la salure des sols dans les sites non irrigués.

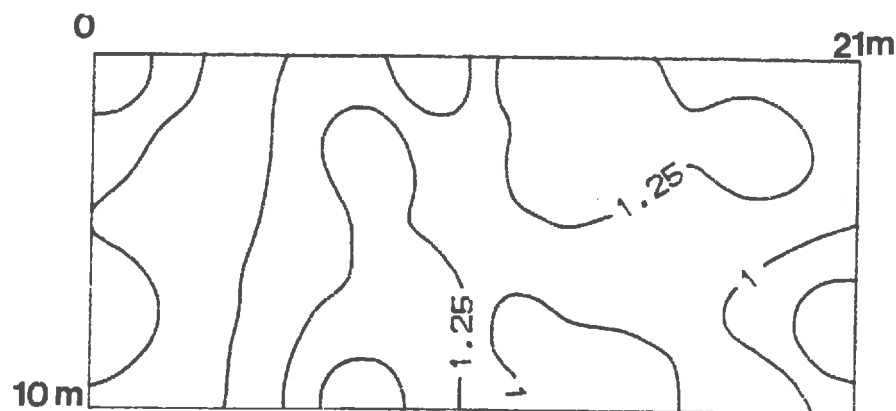


Figure 84. Les zones iso-salines (en Kg de sels).

Suivi des profils hydrique et salin et de l'espace poral:

Le suivi des profils hydrique et salin entre 0 et 1 m de profondeur, a été entamé la veille de la caractérisation initiale de la parcelle au cours du printemps 92. Entre la préparation du sol et la récolte, 8 prélèvements de sol ont été effectués tous avant une irrigation. Pour estimer les bilans hydriques et salins, les prélèvements initiaux ont été comparés aux prélèvements finaux. Le suivi a été poursuivi mensuellement jusqu'au mois de septembre 1993. Au cours de l'hiver 92-93, il a été limité à trois cuvettes qui avaient des occupations de sols différentes. A la récolte du triticale, un prélèvement systématique par cuvette a été entrepris (12/4/93). Il en était de même après la récolte du maïs (14/9/93).

Le suivi de l'espace poral a été effectué avant et après chaque cycle d'irrigation. Quelques échantillons ont fait l'objet d'analyse micromorphologique pour observer l'évolution de la porosité sous irrigation (Pr.G.Stoops, ITC Gand, 1997).

II. L'EVOLUTION DU SOL

L'évolution du sol de la parcelle est fonction des variations subies par son régime hydrique et leurs conséquences sur le régime des sels. Cependant, le facteur eau n'est pas l'unique paramètre. Les modifications qui affectent l'espace poral par le travail du sol ou par l'activité racinaire des cultures et l'activité biologique sont d'une importance capitale.

II.1. Traits généraux

II.1.1. Organisation du sol de la parcelle

La stratification du sol résulte du dépôt des matériaux alluvionnaires des crues de la Mejerda. Les strates sont de la surface du sol à la base du profil (Triangle de texture USDA): limon argileux fin, argile limoneuse, limon argileux, limon fin argileux, limon et enfin sable limoneux (Tableau 51). La discontinuité texturale qui en résulte, perturbe fortement les mouvements de l'eau et des sels. Les eaux de la nappe circulent dans un niveau de sable limoneux qui, à la fois, repose sur une assise imperméable, et se trouve surmonté par une couche à texture très fine de limon et d'argile peu perméable. Malgré leur jeune âge, ces dépôts ont tendance à développer des structures différentes qui traduisent la convergence de plusieurs facteurs dont les principaux sont: la teneur en éléments fins, les contraintes physico-chimiques, le régime hydrique et la végétation. L'association de ces facteurs fait que nous observons une structure polyédrique subangulaire moyenne à fine peu nette en surface et plus nette à 15 cm. A partir de 60 cm, l'effet de la nappe et la saturation en eau qu'elle engendre empêche la différenciation d'une structure nette. Par contre, ce plan d'eau induit la création de manifestations liées à l'hydromorphie qui sont des taches d'oxydation de couleur rouille. Les amas calcaires situés entre 60 et 70 cm indiquent certainement le niveau antérieur de fluctuation de la nappe. Chaque fois que les eaux de la nappe subissent une concentration, la calcite précipite, ces eaux étant sursaturées en cet élément. La teneur en calcaire actif varie dans le même sens que la fraction d'argile et limon fin. Cette tendance a été observée par Claude et al.(1976) dans leur étude des alluvions déposées par les crues de 1973 de la Mejerda. Enfin, la richesse de l'horizon de surface en matière organique est un caractère acquis secondairement et résulte de la végétation qui a colonisé ce milieu. A partir de 15 cm, le matériau originel conserve sa pauvreté initiale en carbone organique (Claude et al., 1976).

Tableau 51. Caractérisation du sol au niveau du profil de la parcelle (21/7/92).

Horizon (cm)	Granulométrie (%)					Calcaire (%)		M.O. (%)
	A	Lf	Lg	Sf	Sg	Total	Actif	
0-15	32	27	23	18	0	47	23	0,7
15-30	45	43	9	3	0	39	23	0,7
30-60	47	37	12	3	1	40	31	0,7
60-70	35	34	24	7	0	43	27	0,5
70-100	24	32	29	12	2	46	21	0,4
100-105	21	20	19	28	12	45	18	0,2
105-140	7	3	3	53	32	33	5	0,2

Le profil pédologique de la parcelle, décrit le 21/07/1992, avait une nappe à 165 cm, et comportait les horizons suivants:

0-15 cm: horizon de labour, sec, texture limono-argileuse fine, couleur brun-jaunâtre (10 YR5/4, humide), structure polyédrique subangulaire moyenne à fine; forte effervescence au HCl, porosité inter-agrégats, nombreuses racines.

15-30 cm: idem mais légèrement plus frais, texture argilo-limoneuse, moins de racines, structure plus nette, moins poreux, présence d'amas calcaires brun-jaunâtres.

30-60 cm: idem mais plus frais, disparition des amas, texture limono-argileuse, couleur plus claire, racines moins nombreuses.

60-70 cm: plus frais, texture limono-argileuse, amas calcaire localisés, porosité tubulaire, même couleur, chenaux fréquents.

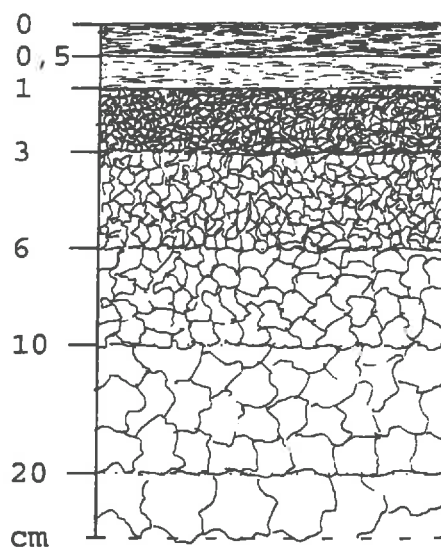
70-100 cm: humide, texture limoneuse fine argileuse, structure polyédrique peu nette, porosité tubulaire, absence de racines.

100-105 cm: plus humide, texture limoneuse, structure polyédrique subangulaire peu nette à fondue (massive) à débit anguleux, porosité tubulaire.

105-140 cm: très humide, texture sablo-limoneuse, nombreux débris de coquilles.

II.1.2. Observations macromorphologiques

La couche perturbée a fait l'objet d'observations macroscopiques et d'analyses granulométriques (Figure 85). L'impact des gouttelettes d'eau conjugué à celui de la chaleur estivale s'atténue de la surface vers le bas. Une mince couche continue sans structure apparaît entre 0 et 0,5 cm suivie d'une seconde qui se prolonge jusqu'à 1 cm où on observe une très légère agrégation. Entre 1 cm et 3 cm, un matériau se détache nettement des couches en dessous. Il s'aggrave en une structure micro-grenue qui s'agrandit entre 3 cm et 6 cm puis encore jusqu'à 10 cm. Entre 10 cm et 20 cm, les mottes qui résultent de la préparation du lit de semences sont plus ou moins conservées. La semelle de labour est visible vers 20 cm de profondeur.



**Figure 85. Organisation du matériau superficiel sous irrigation -
Forme et taille des structures.**

Dans le site non irrigué (L2; Tableau 52), la différenciation granulométrique est faible entre les couches situées entre 0 et 10 cm. Dans G1, près de l'asperseur, un granulo-classement vertical inversé est perceptible. Des matériaux plus grossiers se superposent à des matériaux plus fins. A la limite de la portée de l'asperseur, un granulo-classement vertical habituel est décelable. On ne peut expliquer cette différenciation texturale que par l'intensité de l'asperseur et par l'énergie cinétique des gouttelettes d'eau. Plus près de l'asperseur, l'érosivité est plus forte et l'apport en eau est plus élevé favorisant l'éclatement des mottes et l'illuviation des particules fines vers la base de la couche travaillée. A 6,5 m de l'asperseur, l'effet des gouttes est moins destructeur.

Tableau 52. Granulométrie de l'organisation de surface (9/10/93; en %).

Emplacement/Traitement	Niveau (cm)	A	Lf	Lg	Sf	Sg
G1 à 3,5 m de l'asperseur	0-0,5	26	36,5	19,5	17	0,5
	0,5-1	24,5	36	31,5	6	0,5
	1-3	27	36,5	29	4,5	1,5
	3-6	28	37	28	3,5	0,5
	6-10	27,5	36,5	27,5	3	0,5
G1 à 6,5 m de l'asperseur	0-0,5	15,5	46,5	29,5	5	0,5
	0,5-1	20	40	31	7	1
	1-3	18	22	54	1	0,5
	3-6	13,5	17	48	18	1,5
	6-10	21	40,5	11	22	2
L2, non irrigué (9/93-IN)	0-0,5	21,5	35	24,5	17	0,5
	0,5-1	25,5	32,5	23	16	1
	1-3	28	31,5	23	15	1
	3-6	28,5	29,5	24,5	14,5	1
	6-10	30	28,5	17,5	21,5	1

II.1.3. L'espace poral

La porosité initiale déterminée au niveau du profil de la parcelle était de l'ordre de 40%, légèrement plus élevée dans les niveaux argileux de surface et plus faible dans les niveaux sableux profonds (Tableau 53).

**Tableau 53. Densité apparente et porosité totale au niveau du profil (23/06/92).
(Méthode des cylindres, 3 répétitions; Da varie à plus ou moins 0,03)**

Niveau prélevé (cm)	Densité apparente	Porosité Totale (%)
0-20	1,54	42,0
20-40	1,57	40,6
40-60	1,69	36,2
60-80	1,70	35,7
80-100	1,70	35,7
100-120	1,60	39,6
120-140	1,63	38,5
140-160	1,61	39,0

Avec: Porosité Totale = $(1 - Da/Dr) \times 100$ et Dr : densité réelle = 2,65.

Avant le semis, le sol a été labouré entre 0 et 20 cm. Depuis, le sol n'a fait l'objet d'aucune opération de travail du sol. Au cours des irrigations, une structure fondue qui résulte de l'éclatement des agrégats par les gouttelettes d'eau projetées par l'asperseur, s'instaure. Progressivement, les agrégats polyédriques subanguleux se réorganisent en un matériau sans structure, battant, de quelques millimètres d'épaisseur, imperméable induisant une stagnation d'eau durant les irrigations. En dessous de cette couche, le sol garde son organisation initiale à tendance polyédrique rendue plus poreuse par la préparation du sol (Tableau 54). Nous avons observé que la saturation du sol par des apports massifs en eau d'irrigation suivie de périodes de dessiccation prolongées amène le sol à une compacité néfaste pour la circulation de l'eau et l'aération du sol particulièrement dans ces sols limono-argileux battants.

Mathieu et al.(1987) ont montré l'influence marquée de l'irrigation intensive sur la morphologie des 50 premiers centimètres du sol: le système poreux est fortement modifié. La microporosité est diminuée de 0 à 45 %. Les transformations du sol irrigué sont fonction du nombre d'années d'irrigation, des types de culture et de préparation du sol, des modes d'irrigation et des types de sols.

Tableau 54. Evolution de la porosité totale au cours du premier cycle d'irrigation (du 23/6 au 17/9/92).

Niveau (cm)	Densité apparente		Porosité totale (%)	
	Profil	Moyenne = (L3 + D2)/2	Profil	Moyenne = (L3 + D2)/2
0-5		1,23		53,8
5-10	1,54	1,39	42	47,5
10-15		1,58		40,5
20-25		1,55		41,4
25-30	1,57	1,51	41	43,1
30-35		1,54		42,0

Avec:

- L3 et D2 sites de prélèvements (voir figure 82).
- Densité apparente du profil réalisée le 23/6/1992.
- Densité apparente dans les sites L3 et D2 effectuée le 17/9/1992.

Les valeurs de la densité apparente obtenues à la fin du premier cycle d'irrigation (été 92, Tableau 54) sont assez semblables à celles que nous retrouvons à la fin du second cycle (été 93, Tableau 55-irrigation continue).

A côté de l'irrigation, deux autres facteurs interviennent dans la genèse de cette nouvelle porosité. Il s'agit du pouvoir des racines à défaire une structure polyédrique subangulaire moyenne et à faire évoluer le sol vers une structure grenue. Le maïs possède des racines particulièrement pénétrantes de deux types: des racines d'ancrage et des racines fasciculées. Le second facteur est l'activité biologique (vers de terre et insectes) très

développée au pied des plantes de maïs, où l'humidité est élevée et la chaleur est très forte. L'activité biologique qui prospère au cours des irrigations développe une porosité biologique sous forme de chenaux, galeries et cavités. Ce type de porosité structurale et biologique est certainement différent de la porosité qui prédominait avant les irrigations. Seule la porosité texturale peut être supposée invariable. A côté des variations de la porosité dans la couche perturbée entre le début et la fin du cycle des irrigations, la nature de l'espace poral qui règne pendant ces deux phases est différente.

Ainsi, l'observation du profil cultural permet de mettre en évidence la complexité des organisations morphologiques qui dépendent de la succession des interventions au cours d'un itinéraire technique. On procède par la combinaison de mesures visant à caractériser l'espace poral et d'observations pour mieux prévoir les conséquences de l'état physique de la parcelle sur le comportement des plantes et les conditions d'exploitation au champ.

L'influence du système de culture sur l'état du profil cultural comporte les effets à court terme qui s'inscrivent dans la campagne culturale et les effets cumulatifs liés aux effets de campagnes précédentes successifs (Coulomb et al., 1990).

Dans le volume poral du sol existent deux ensembles de pores d'origines différentes (Stengel, 1979; Monnier et al., 1982). La porosité texturale qui est l'assemblage des particules constituant le sol et leur hydratation et la porosité structurale qui est générée par le travail du sol, les facteurs climatiques et les organismes vivants.

Poursuivies au cours de l'hiver et l'été 1993, les observations montrent une évolution de la porosité totale liée à deux régimes hydriques. Sous régime pluvial et sans irrigation estivale, le sol régénère progressivement sa porosité initiale plus rapidement que sous régime pluvial suivi de l'irrigation estivale (Tableau 55).

Tableau 55. Evolution de la porosité du sol sous irrigation (G2 et G4) et sans irrigation (L2 et L4) au cours du second cycle d'irrigation (5/10/93).

Site	Niveau (cm)	Densité apparente	Porosité totale(%)
G2 et G4 (9/93-I) Irrigation continue	0-5	1,32	50,1
	10-15	1,59	40,0
	20-25	1,62	39,0
L2 et L4 (9/93-IN) Arrêt de l'irrigation	0-5	1,40	47,3
	10-15	1,50	43,4
	20-25	1,58	40,5

II.2. Observations micromorphologiques de la couche perturbée

Après l'observation macromorphologique, nous avons eu recours à l'observation micromorphologique pour examiner l'évolution de la structure du sol sous irrigation. Les observations sont relatives à trois sites mais deux occupations. Les sites G2 et G4,

proviennent de parcelles irriguées par aspersion. Dans le site L2, le sol n'a fait l'objet d'aucune intervention (Planche 10).

Ces observations concernent la couche 0-15 cm et la couche 15-30 cm qui sont plus exposées à des modifications de la structure au cours d'un cycle estival d'irrigation pour une culture de maïs.

Le sol du profil K-3 entre 0 et 40 cm est identique à celui de la parcelle. En conséquence, les observations réalisées au niveau du profil K-3 nous ont servi comme référence comparative pour le sol en fin de culture hivernale pluviale. Les échantillons non perturbés de 10 cm de large sur 15 cm de long ont été prélevés le 30/3/93 pour le profil K3 et vers le 5/10/93 pour les sites G2, G4 et L2.

Les observations réalisées par Pr. Dr. G.Stoops (ITC-INAT, 1997), ont porté sur des lames minces de 30 μ m dont l'interprétation s'est basée sur les concepts et la terminologie établis par Bullock et al. (1985) qui distinguent les trois parties suivantes: la microstructure, la masse basale et les pédotraits. Les observations sont résumées dans le tableau 56. Quelques microstructures et pédotraits sont illustrés dans les planche 11 et 12. Ce tableau nous révèle:

- des caractères qui n'ont pas été affectés ni par les opérations de travail du sol et d'irrigation, ni encore par l'activité racinaire de la culture ou encore par l'activité biologique. Il s'agit de caractères intrinsèques au sol.
- des caractères qui ont été très fortement modifiés par l'ensemble des facteurs cités précédemment. Il s'agit de caractères extrinsèques au sol.

Nous allons examiner ces caractères et accorder à la porosité plus d'importance.

- Les caractères intrinsèques:

Ce sont certains caractères qui constituent la masse basale mais aussi des pédotraits qui sont plutôt hérités des alluvions. Il s'agit toujours d'une masse homogène de calcaire polymicritique (taille petite à moyenne) avec des fragments d'argile (de taille différente) et de coquilles, et d'une micromasse constituée d'argile brun-grisâtre tachetée et de calcite et ayant une biréfringence cristallitique. Les zones de fragments grossiers d'argile orientée, présentes souvent mais d'une manière irrégulière, sont plutôt des morceaux arrachés de leurs sols d'origine et apportés au cours des crues. En conséquence, ces zones sont associées aux caractères intrinsèques du sol.

Planche 10. Les profils de la parcelle irriguée (5/10/1993).



Planche 11. Evolution de la structure dans le profil G2.

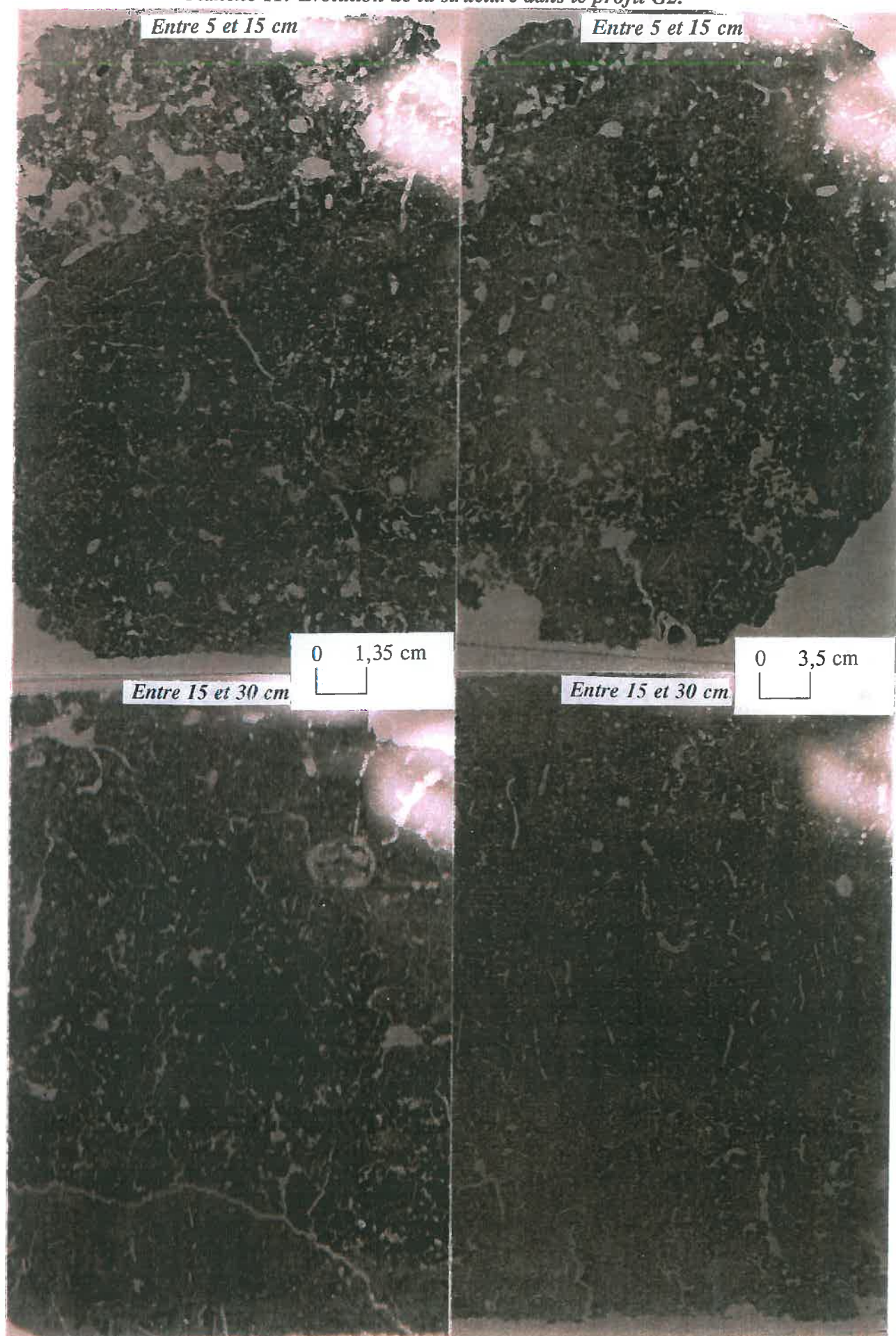
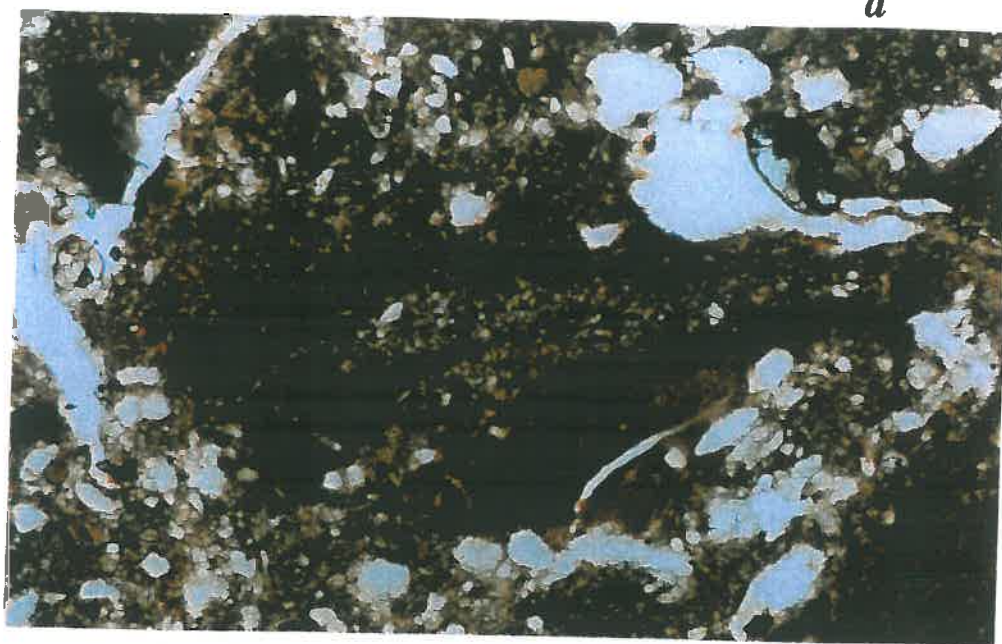
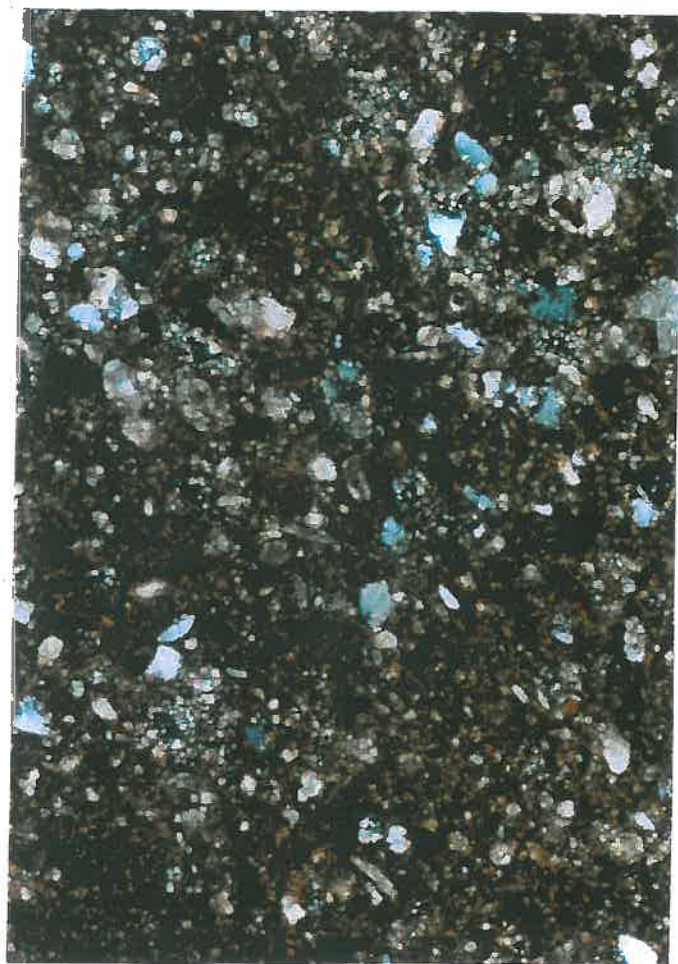


Planche 12. Microstructures et pédotraits du profil G2.

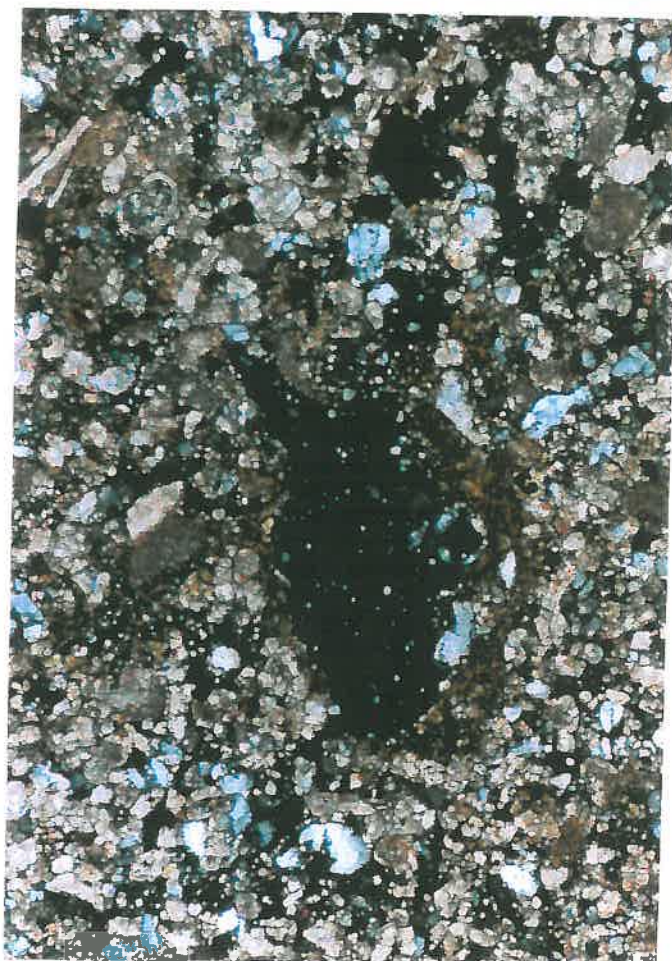
*a. Morceau de croûtes de sol labouré.
(Entre 15 et 30 cm; 6,3 XP).*



*b. Micromasse.
(Entre 5 et 15 cm; 6,3 PL).*



*c. Masse basale et revêtements d'argile.
(Entre 15 et 30 cm; 6,3 XP).*



b

c

Tableau 56. Comparaison des observations micromorphologiques.

(s.f.:sable fin, s.m.:sable moyen).

Occupation		Avril 93		culture pluviale de blé			
		Eté 93		sol non irrigué (jachère)		culture irriguée de maïs	
Site		Profil K3 (30/3/93)		L2 (5/10/93)		G4 et G2 (5/10/93)	
Profondeur (cm)		0-20	20-30	0-15	15-30	0-15	15-30
Microstructure et Porosité		0-10: cavités (4 mm). porosité 5%. 10-20: polyédrique angulaire (3 cm) avec des chenaux intrapédiaux(400 µm).	chenaux verticaux (tubulaire); (400 µm).	cavités et chenaux, très poreuse. porosité:25%.	moins poreuse; cavités (700 µm)et chenaux verticaux (300 µm; tubulaire).	0-5: cavités et chenaux, porosité:15%. 5-10: cavités (5 mm) et chenaux porosité: 30%. 10-15: zone compacte, micro-structure polyédrique angulaire fine (1 cm) avec elongation horizontale, de larges chenaux (100 µm) et cavités (1 mm)	polyédrique angulaire (2-3 cm), subdivisée en une polyédrique angulaire modérément développée (0,5-1 cm), avec beaucoup de chenaux (100 µm)
Masse	Type	homogène	hétérogène: fragments (2 mm) de matériau fin; plusieurs zones de grosse taille.	homogène	homogène	homogène	hétérogène: zones de petite et de grande taille.
	grains grossiers	calcaire polymicritique (s.m.). + entre 10-20: fragments de coquilles et grains de glauconite.	calcaire polymicritique (s.f. à s.m.).	calcaire polymicritique (s.f.).	calcaire polymicritique (s.f.) avec forte dominance de la calcite.	calcaire polymicritique (50%, s.m.). avec fragments de coquilles.	plus de matériau calcaire polymicritique (s.f. à s.m.); beaucoup de fragments de coquilles.
Basale	micromasse	argile brun-grisâtre tachetée et calcite avec biréfringence cristallitique					
	matière organique	quelques sections de racines	non observée	quelques sections de racines.	résidus de cellules dans la micromasse; sections de racines.	quelques sections de racines; résidu de tissu humidifiée dans la micromasse.	quelques résidus de cellules brun rougeâtres.
	distribution relative g/f	0-10:porphyrique simple à double espacement. Rapport g/f= 1/2 10-20: porphyrique à double espacement Rapport g/f= 1/3 à 1/4	chitonique et géfurique Rapport g/f= 2/1	porphyrique fermée. Rapport g/f= 1/2.	porphyrique fermée à porphyrique à simple espacement. Rapport g/f= 2/1.	porphyrique à simple espacement à porphyrique fermée. Rapport g/f= 1/2.	porphyrique à simple espacement. Rapport g/f= 1/3.
Pédotraits		0-10: rares hyporevêtements rouge-jaunâtres dans les chenaux. 10-20: nodules ferriques brunes arrondies (s.m.)	- zones locales avec une matrice porphyrique fermé à simple espacement -quelques revêtements d'argile et de calcite grossiers à la base de cavités ou coiffe de grains	zones irrégulières de fragments grossiers d'argile (1-2 mm).	revêtements d'argile (grosse taille) à la base de quelques pores.	zones irrégulières de fragments grossiers (300 µm) d'argile orientée.	-accumulations irrégulières d'argile calcaire brune de grosse taille (2 mm); morceaux de croûtes calcaires. -quelques petites nodules ferriques.

- Les caractères extrinsèques:

- **quelques caractères de la masse basale:** Il s'agit de caractères dépendants de la culture (constituants organiques) ou du travail du sol et de l'irrigation (distribution relative des grains grossiers par rapport aux grains fins, g/f).

La matière organique observée est souvent sous forme de sections de racines ou de résidus de tissu végétal dans la micromasse. Dans le sol intensivement irrigué, le tissu de la couche de surface (0-15 cm) est plus humidifié, et les cellules végétales de la couche en dessous (15-30 cm) sont de couleur brun-rougeâtre.

Il n'est pas possible de comparer les distributions relatives g/f pour des matériaux hétérogènes. Le paragraphe suivant constitue une simple tentative. La distribution relative g/f, initialement (Profil K-3) porphyrique simple entre 0-10 cm, porphyrique à double espacement entre 10-20 cm et chitonique et géfurique entre 20 et 30 cm, devient:

- dans le sol non irrigué laissé en jachère, porphyrique fermée en surface et porphyrique fermée à porphyrique à simple espacement en dessous.

- dans le sol travaillé et irrigué, porphyrique à simple espacement à porphyrique fermée en surface et porphyrique à simple espacement en dessous.

Les rapports g/f associés à ces distributions initialement 1/2 entre 0-10 cm, 1/3 à 1/4 en dessous puis encore 2/1, deviennent:

- dans le sol non irrigué laissé en jachère, 1/2 en surface et 2/1 en dessous.

- dans le sol travaillé et irrigué, 1/2 en surface et 1/3 en dessous.

- **quelques pédotraits:** Nous ne considérons que les traits acquis au cours de la période estivale aussi bien quand le sol est cultivé et irrigué que quand le sol est laissé en jachère à la fin de la culture pluviale. Ces traits sont peu nombreux et même secondaires dans le processus évolutif du sol. Certains traits observés au niveau du profil K3 ont disparu au cours de l'été. C'est le cas des nodules ferriques dans le sol non irrigué laissé en jachère alors que les revêtements d'argile présents à la base de quelques pores sont conservés. Ces derniers ne sont pas dépendants de conditions particulières comme pour les nodules qui ne se forment que par la mobilisation du fer en milieu réducteur. Ce contexte d'oxydo-réduction n'existe que dans le sol irrigué d'où la présence de nodules ferriques de petite taille dans la couche sous jacente à la couche de surface, et plus compacte.

- **la microstructure et la porosité:** Ce sont les indicateurs de la dynamique saisonnière du sol selon différents itinéraires agronomiques. La microstructure de base est toujours une microstructure polyédrique angulaire fine avec des élongations horizontales, des chenaux et des cavités. La différenciation concerne la taille des polyèdres qui varient de 1 cm à 3 cm pouvant se débiter en polyèdres plus petits, la fréquence et la taille des chenaux et des cavités.

A la fin de la culture hivernale (Profil K3), le sol possède une microstructure cavitaire en surface, polyédrique angulaire et de plus en plus avec des chenaux intrapédiaux (tubulaire) en dessous, mais de diamètre de plus en plus réduit. La porosité est d'environ 5 % en surface et vers 15 % vers 30 cm.

Quand le sol est laissé en jachère, nous observons une augmentation de la fréquence des chenaux dans la couche superficielle engendrant une augmentation de la porosité à plus de 25 %. La couche en dessous conserve sa microstructure et sa porosité initiales. Dans le sol en jachère, la fréquence des chenaux augmente au détriment des cavités ce qui donne une apparence compacte du sol alors qu'il se trouve réellement plus poreux. La préservation de la couche de surface, semble favoriser le développement de l'activité biologique.

Si le sol est travaillé et irrigué, la couche 0-15 cm se différencie en trois sous-couches. De 0 à 5 cm, la microstructure cavitaire présente plus de chenaux et devient assez poreuse, de l'ordre de 15 %. De 5 à 10 cm, la microstructure ressemble assez à celle que nous observons en surface dans le sol en jachère toutefois elle renferme plus de cavités. La porosité de cette sous-couche est d'environ 30 %. Enfin de 10 à 15, le sol est compact. La microstructure est polyédrique angulaire fine (1 cm) avec des élongations horizontales, de larges chenaux (100 μm) et des cavités (1 mm). En dessous (15-30 cm), les polyèdres sont de plus grande taille, de 2 à 3 cm. Ils se subdivisent en polyèdres moins développés de 0,5 à 1 cm avec beaucoup de chenaux fins (tubules). La porosité est plus réduite. Cette couche est presque identique à la couche que nous observons aussi bien au niveau du profil K3 que dans le sol en jachère. L'effet du travail du sol, de la culture et de l'irrigation semble se limiter à la couche 0-15 cm tout au plus.

- Filiation entre structures macro et micromorphologiques:

Nous avons repris dans le tableau 57 les observations macro et micromorphologiques réalisées au niveau des sites irrigués (G2 et G4). Les sous couches situées entre 0 et 1 cm (mince sous couche continue en surface, et légère agrégation en dessous) n'ont pas fait l'objet d'observation micromorphologique. La couche située entre 1 et 5-6 cm, de structure grenue de plus en plus nette vers sa base correspond à une microstructure formée de cavités et de chenaux et une porosité d'environ 15 %. Entre 5-6 cm et 10 cm, de plus en plus la structure grenue est de taille plus grande, de plus en plus la fréquence des cavités et des chenaux augmente et leur taille aussi, se traduisant par une porosité de l'ordre de 30 %.

Les mottes initiales plus ou moins conservées entre 10 et 15 cm correspondent à une zone compacte de microstructure polyédrique angulaire fine (1 cm) avec des élongations horizontales, de larges chenaux (100 μm) et des cavités (1 mm). Cette couche est moins poreuse que la précédente.

Au niveau de la semelle de labour située vers 20 cm, le sol initial est conservé. Il constitué d'une microstructure polyédrique angulaire (2-3 cm), subdivisée en une sous microstructure polyédrique angulaire modérément développée (0,5-1 cm), avec beaucoup de chenaux (100 μm).

Tableau 57. Correspondance entre les observations macro et micromorphologiques.

MACROMORPHOLOGIE	Limites des couches (cm)		MICROMORPHOLOGIE
Mince couche continue. Très légère agrégation. Structure micro-grenue fine.	0 0,5 1	0	cavités et chenaux; porosité: 15 %.
Structure micro-grenue plus grande.	3	5	
plus grande encore.	6		cavités (5 mm) et chenaux; porosité: 30 %.
Mottes initiales plus ou moins conservées.	10	10	zone compacte, microstructure polyédrique angulaire fine (1 cm) avec élongation horizontale, larges chenaux (100 µm) et cavités (1 mm)
Semelle de labour.	20	15	
		30	structure polyédrique angulaire (2-3 cm), subdivisée en une microstructure polyédrique angulaire modérément développée (0,5-1 cm), avec beaucoup de chenaux (100 µm)

Ainsi, les caractères extrinsèques du sol subissent dans l'horizon travaillé, des modifications soit directement par le labour, l'aspersion de l'eau ou encore la pénétration des racines, et indirectement, par le développement des racines et d'une forte activité biologique. L'expression de certains de ces agents est progressive au cours du temps et dans l'espace: verticalement, par une stratification des indices de différenciation et horizontalement, par une homogénéisation de ces strates.

L'expression de cette mise en valeur en irrigué, est plus nette vers la surface du sol que vers les couches sous jacentes, plus protégées de facteurs de compaction du sol. Dans l'horizon travaillé, les activités racinaires et biologiques sont plus manifestes. Alors qu'à la base de cet horizon et à l'interface avec l'horizon non travaillé (semelle de labour), le contexte oxydo-réducteur qui y règne favorise la formation de nodules ferriques rougeâtres.

Le matériau initial constitué d'une structure polyédrique angulaire de 1 à 3 cm de taille se débite, sous labour en une microstructure polyédrique de 0,5 à 1 cm, et sous activité racinaire et biologique en microstructure grenue (cavités et chenaux), ou encore sous irrigation par aspersion, en une couche continue sans structure.

Sur le plan physique, le sol laissé en jachère en été est plus poreux en surface que le sol irrigué par aspersion. Cependant, cette porosité de nature tubulaire est un facteur qui accroît la remontée des sels en présence d'une nappe superficielle salée. Sous l'angle de système poral, le sol travaillé et irrigué au cours de l'été est moins exposé à la salinisation per ascensum.

La nature de la microstructure, la forme et la taille des cavités et des chenaux, la distribution relative g/f semblent être les indicateurs pertinents pour le suivi des variations physiques du sol selon une forme de gestion eau-sol-plante donnée. Selon le système poral qui se crée, la circulation de l'eau est plus ou moins favorisée et par voie de conséquence celle des sels. Il apparaît fondamental de définir le système poral dans la mise en valeur des sols salés et de cerner ses variations saisonnières pour assurer la réussite de l'aménagement du drainage et de la pratique de l'irrigation.

Enfin, l'irrigation par aspersion agit sur les propriétés du sol en surface. La nature limono-argileuse des sols favorise la formation de croûtes de battance sous l'effet de l'énergie cinétique des gouttelettes larguées par l'asperseur. La formation de flaques est fréquente après un temps d'irrigation de plus de trois heures. Un ruissellement vers les micro-dépressions s'ensuit induisant une dynamique analogue des sels et une micro-régionalisation des accumulations par voie de conséquence.

Ainsi, l'espace poral est un caractère fondamental en particulier pour les sols d'apport récent. A la porosité texturale, nous observons une porosité dynamique et dont les variations saisonnières sont importantes. L'itinéraire technique, le labour, l'irrigation par aspersion et le développement des racines agissent sur la forme et la taille de la structure dans l'horizon superficiel. La structure de l'horizon profond reste peu variable et sous la dépendance directe de la nappe. Dans l'horizon superficiel, le labour agit sur une couche d'une trentaine de centimètres, l'irrigation par aspersion agit en particulier sur l'organisation de la couche 0-5 cm alors que les racines sont plus actives dans la couche 5-20 cm.

La porosité initiale conditionne le comportement des cultures mais dans une irrigation à l'eau saumâtre et par aspersion, la qualité de l'eau, sa distribution et le mode d'arrosage sont d'importants facteurs de rendement. Leur incidence est immédiate sur la culture en place, directement sous forme de brûlures des feuilles et d'absorption élevée de chlorure de sodium et indirectement par la création de croûte de battance réduisant l'infiltration et induisant la salinisation du sol. Cette dégradation des propriétés du sol porte atteinte aux cultures suivantes.

III. L'EVOLUTION DU SOL DANS UN SYSTEME SOL-NAPPE-EAU D'IRRIGATION-ITINERAIRE AGRONOMIQUE

L'évolution du sol dans la parcelle est le résultat des apports d'eau d'irrigation, du travail du sol et de la capacité des drains à maîtriser les fluctuations de la nappe. Ainsi, nous allons caractériser le régime de la nappe dans la parcelle qui doit être perçue comme un affinement du fonctionnement des sols dans le système sol-nappe précédemment analysé. En fonction de la gestion de l'eau et du sol et selon la saison, le sol acquiert des états hydriques et de salure différents. C'est ce que nous tentons d'apprécier dans le suivi de la teneur en eau et en sels dans le sol selon différents itinéraires agronomiques.

III.1. L'évolution du régime de la nappe phréatique

Avant irrigation:

Dans le secteur sud-est du périmètre où se situe la parcelle, Bach Hamba (1992) a observé un rabattement de la nappe et une concentration des solutions à la fin de la période estivale, consécutifs à une remontée de la nappe et une dilution de ses solutions à la fin de la période hivernale. Le régime de la nappe était essentiellement régi par l'efficacité des drains et du pompage vers la mer (voir chapitre fonctionnement des sols du périmètre).

Après la mise en eau du périmètre:

Le rabattement de la nappe est perturbé par l'intensification progressive des irrigations. Dans la parcelle irriguée et à l'approche de l'été, la nappe en cours de rabattement se situait à 163 cm avec une salinité de l'ordre de 28,6 dS/m (Tableau 58). Sans les irrigations, ce processus aurait continué dans le même sens, mais l'alimentation de la nappe en eau plus douce se traduit par une élévation du niveau de la nappe et une diminution de la conductivité.

Plus les volumes d'eau d'irrigation augmentaient durant les périodes de pointe (juillet-août), plus la profondeur de la nappe baissait et la conductivité diminuait. En août 1992, la nappe n'était qu'à 138 cm pour une salinité d'environ 9,7 dS/m.

Tableau 58. Variations saisonnières des caractéristiques de la nappe dans la parcelle.

année	jour/mois	CE(dS/m)	Niveau(cm)	année	jour/mois	CE(dS/m)	Niveau(cm)
1992	9/6	28,6	163	1993	2/2	14,4	134
	24/8	13,1	150		16/4	24,0	160
	31/8	9,7	138		14/5	18,9	150
	7/9	10,6	151		27/5	12,4	170
	20/9	16,8	172		9/6	17,3	166
	4/10	19,1	170		17/6	9,2	154
	19/11	18,7	170		7/7	8,8	160
	15/12	20,3	160		3/8	9,6	161
	30/12		80		30/9	12,2	180

III.2. L'évolution du régime hydrique des sols

Le sol nu a servi comme référence comparative pour les sites cultivés et irrigués.

III.2.1. Le régime hydrique du sol non irrigué

Au niveau d'un site avec trois répétitions, nous avons suivi pendant environ deux mois le profil hydrique du sol après d'importantes pluies survenues le 1, 2 et le 5 juillet 1992 (44,8 mm). Au cours de cette période du 8/7/92 au 4/9/92, la température journalière se situait aux alentours de 30-40°C et le sol était compact avec des chaumes clairsemés en surface.

Les profils hydriques du 8/7/92 et du 4/9/92 révèlent un assèchement du sol en surface accompagné d'une diminution de la réserve hydrique essentiellement entre 0 et 30 cm (environ 48,6 mm, tableau 59). La différence est insignifiante au delà de 60 cm (< 1 mm).

Tableau 59. Humidités volumiques du sol nu en été entre le 8/7/1992 et 4/9/1992.

Couche (cm)	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
Hvi (%)	30,1	31,3	32,7	33,2	36,2	37,8	39,1	41,8	39,4	39,7
Hvf (%)	8,0	15,9	21,6	30,1	33,8	36,8	38,8	41,5	39,1	39,6
R.U (mm)	-22,1	-15,4	-11,1	-3,1	-2,4	-1,0	-0,3	-0,3	-0,3	-0,1
R.U (mm)	-48,6			-6,5			-1,0			

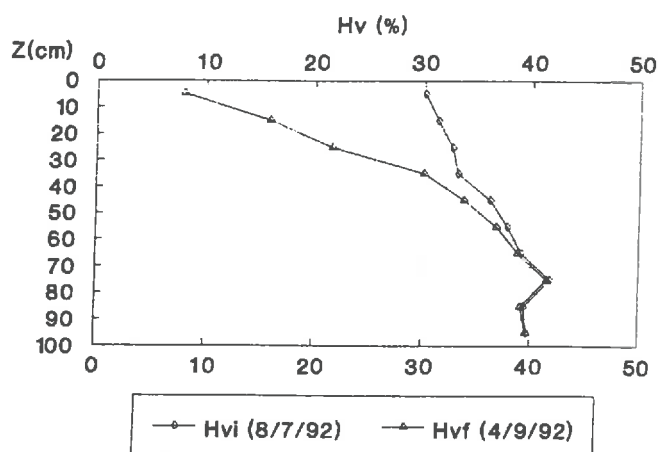
Avec:

- Hvi et Hvf, les humidités volumiques respectivement au 8/7/1992 et 4/9/1992;
- R.U., la réserve utile: $R.U. = (Hvf - Hvi) * Da * E$;
- Da = la densité apparente déterminée au niveau du profil de la parcelle;
- E = épaisseur de la couche.

Tenant compte des caractéristiques hydriques déterminées sur des échantillons prélevés dans le profil (Tableau 60), le sol après les fortes pluies du début de l'été, était très humide en surface et assez saturé en profondeur. Après deux mois d'évaporation soutenue, il est devenu très sec entre 0 et 10 cm ($Hv < Hvpfp$), sec entre 10 et 60 cm environ et frais au delà de cette profondeur (Figure 86).

Tableau 60. Humidités volumiques caractéristiques pour pF 2,7 et pF 4,2.

Couche(cm)	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
pF 4,2	15,6	34,5	35,7	27,2	20,4
pF 2,7	38,5	45,5	47,6	42,5	39,1
R.U. (mm)	33,8	22,0	23,8	30,6	37,4

**Figure 86. Profils hydriques du sol nu non irrigué (du 8/7/92 au 4/9/92).**

III.1.2. Régime hydrique du sol sous irrigation

- Régime estival:

Durant l'été 92, nous avons suivi le profil hydrique au niveau de trois sites. A la veille de la première irrigation, l'humidité du sol était à environ 16% en surface, 28% vers 60 cm et 32,5% à 100 cm (Tableau 61). Elle s'élève au mi-cycle des irrigations (15/7/1992) et légèrement plus encore à la fin du cycle (7/9/1992). En profondeur, le sol est saturé ($H_v > H_{vcc}$, Figure 87).

Tableau 61. Humidités volumiques du sol irrigué au cours du cycle d'irrigation de l'été 1992.

Couche(cm)	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
Hv0 (%)	16,3	25,4	28,0	30,7	32,5
Hvi (%)	20,3	37,0	36,4	39,5	39,5
Hvf (%)	27,9	39,9	38,3	45,3	44,8

Avec:

- Hv0: moyenne de 4 prélèvements du 8/6/92;
- et Hvi et Hvf, respectivement la moyenne de trois prélèvements du 15/7/92 et la moyenne de trois prélèvements du 7/9/92.

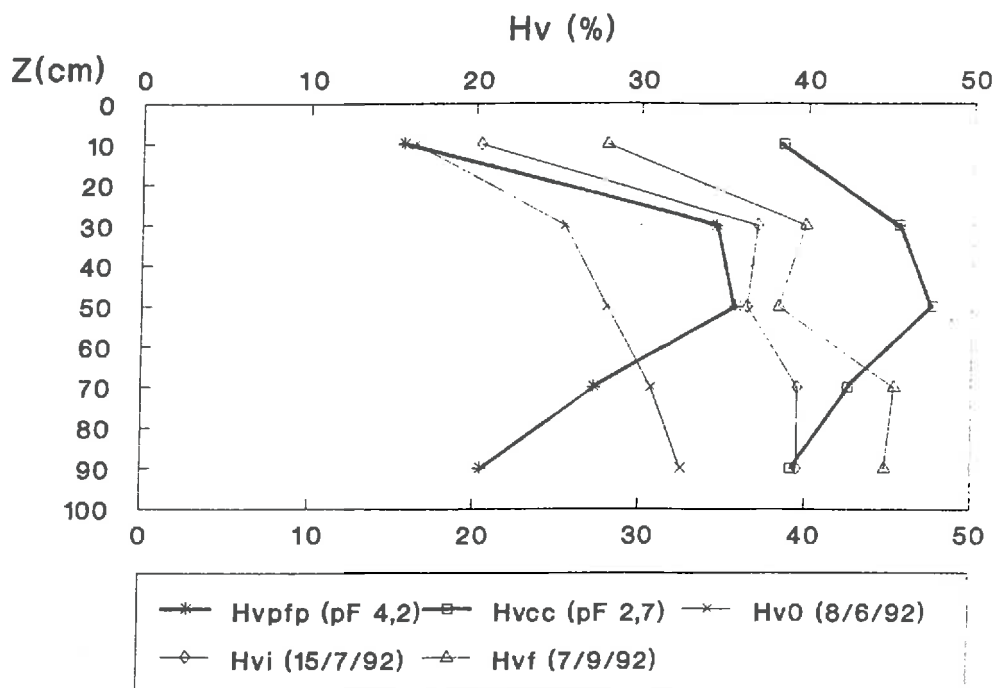
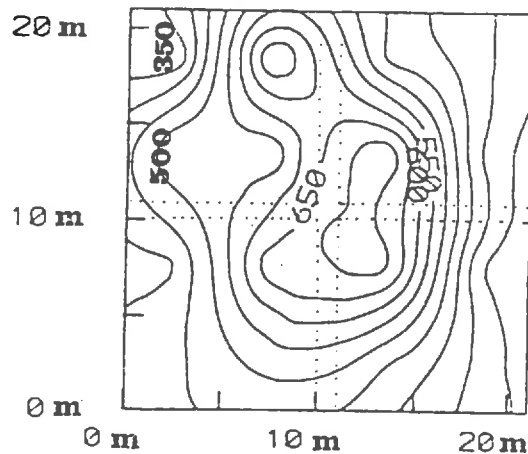


Figure 87. Evolution du profil hydrique au cours d'un cycle d'irrigation - Eté 1992.

Le bilan hydrique est estimé à partir de 4 prélèvements initiaux et de 16 prélèvements finaux effectués après la récolte du maïs, à raison d'un par cuvette. La dose totale en eau d'irrigation est très variable, entre 300 mm et 760 mm (Figure 88). Plus de 75% de cette dose a été apportée irrégulièrement au cours des mois de juillet et août. Elle reste en dessous des besoins du maïs, plante très exigeante en eau, vers les 900 mm pour la région. Pendant certaines phases critiques du cycle de la plante, en particulier la floraison, la dose était insuffisante.



**Figure 88. Répartition des volumes d'eau pour le cycle d'irrigation.
Été 1992 (en mm).**

Durant l'été 1993, l'état hydrique du sol au cours des irrigations est semblable à celui observé l'été précédent. Les irrigations étaient plus régulières. La dose totale en eau d'irrigation variait entre 200 mm et 600 mm (Tableau 62). Elle restait en dessous des besoins de la culture.

Tableau 62. Doses totales au cours du cycle d'irrigation de l'été 1993.

Cuvette (25m ²)	G1	G2	G3	G4	F1	F2	F3	F4
Dose (mm)	350	200	380	600	300	520	450	300

- Régime hivernal:

Après une légère baisse de l'humidité en surface en automne, le sol rejoint son état hydrique en irrigué et le dépasse même pour atteindre un profil assez saturé de la surface à la base (Tableau 63). Cet état dure de décembre jusqu'à janvier. Une baisse sensible apparaît vers mi-janvier qui s'aggrave jusqu'à la récolte vers mi-avril.

Tableau 63. Humidités volumiques du sol en hiver (30/12/1992).

Couche (cm)	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
Hv (%)	34,4	38,0	41,0	39,6	40,6

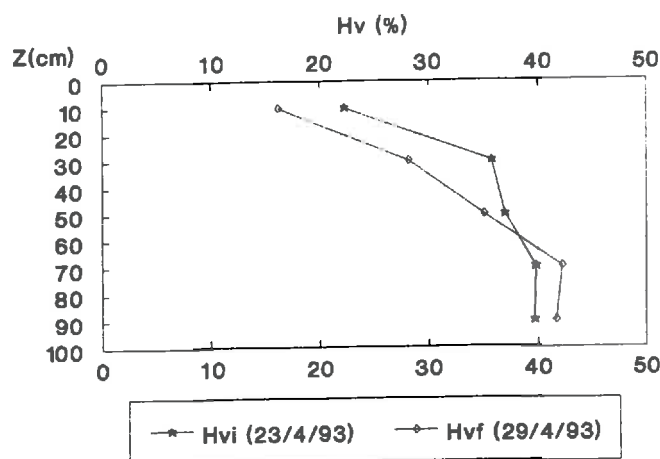
avec Hv: moyenne de trois prélèvements du 30/12/92.

- Régime printanier:

La réserve hydrique au cours du mois d'avril 1993 était déficitaire. La période était relativement chaude. Le sol a subi un dessèchement plus important en surface (Tableau 64 et Figure 89). Sur 60 cm de profondeur, la perte hydrique est d'environ 15,6 mm. L'élévation de la teneur en eau en profondeur est attribuée à une légère remontée de la nappe engendrée par des irrigations de complément dans le périmètre.

Tableau 64. Humidités volumiques du sol au printemps entre le 23/4/1993 et 29/4/1993.

Couche(cm)	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
Hvi (%)	22,3	35,8	37,0	39,8	39,7
Hvf (%)	16,2	28,2	35,1	42,2	41,7
R.U (mm)	-6,1	-7,6	-1,9	+3,6	+2,0



**Figure 89. Profils hydriques d'un sol nu non irrigué.
Régime printanier (du 23 au 29/4/93).**

Ainsi, le sol présentait:

- **verticalement**, une couche de 0 à 60 cm qui est le lieu de variation importante de la teneur en eau et une couche de 60 à 100 cm dont la variation de la teneur en eau est faible;
- **au cours de l'année**, une variation saisonnière de la teneur en eau en fonction de la température et de la pluie.

L'évolution du régime hydrique du sol a porté:

- **verticalement**, sur une interruption de l'assèchement estival de la couche 0-60 cm suite à l'irrigation du sol;
- **au cours de l'année**, sur une teneur en eau du sol variant dans une amplitude moins extrême et plus proche de la capacité au champ (pF 2,7) que du point de flétrissement (pF 4,2).

III.3. L'évolution du régime des sels

Simultanément au suivi de la teneur en eau du sol, nous avons déterminé la teneur en sels du sol.

III.3.1. Le régime des sels du sol non irrigué

Durant les deux mois du suivi du ressuyage du sol après les pluies de juillet, la nappe qui se situait à environ 160 cm, avait une salinité de 28,6 dS/m le 8/7/92 et 13 dS/m deux mois plus tard. L'assèchement du sol en surface s'est accompagné d'une perte en eau et d'une salinisation de la couche comprise entre 0 et 60 cm (Figure 90). Le stock de sels s'est accru d'environ 30,5 g/m² soit 0,305 tonne/ha (Tableau 65).

Tableau 65. Evolution du stock de sels dans un sol nu non irrigué.

Couche (cm)	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
CEi (dS/m)	2,7	3,2	3,9	5,5	6,7	7,5	9,7	10,8	11,5	11,6
CEf (dS/m)	3,1	3,5	4,2	6,3	7,8	8,3	9,8	10,9	11,5	11,6
Da	1,54	1,54	1,57	1,57	1,69	1,69	1,70	1,70	1,70	1,70
PS(%)	56	56	61	61	85	85	85	85	73	73
Sf-Si (g/m ²)	2,4	1,8	2,0	5,3	11,0	8,0	1,0	1,0	0,0	0,0
Sf-Si (g/m ²)	30,5						2,0			

Avec:

CEi et CEf, les conductivités électriques respectivement au 8/7/1992 et au 4/9/1992.

Sf-Si, le stock résiduel en sels (stock final-stock initial)=

$$(CEf-CEi)*0,7*Da*E*PS \text{ (CRUESI, 1970).}$$

Da est la densité apparente déterminée au niveau du profil de la parcelle.

E est l'épaisseur de la couche.

PS le pourcentage de saturation du sol.

Le coefficient 0,7 permet de transformer la CE en résidu sec exprimé en g/l (CRUESI, 1970).

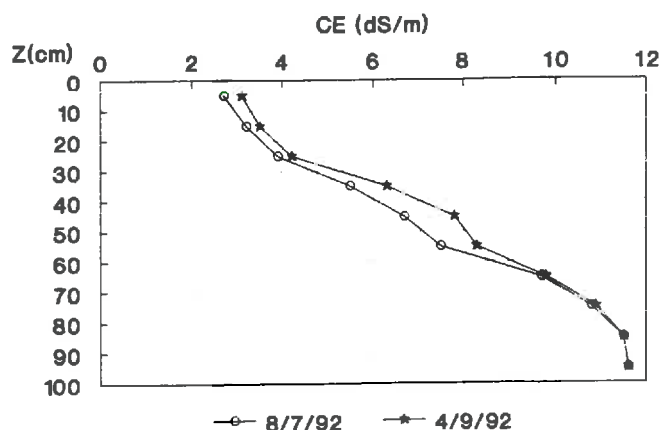


Figure 90. Evolution de la salinité d'un sol nu non irrigué.

III.3.2. Régime des sels pour un sol sous irrigation

- Régime estival:

Au début de l'été 1992, le profil salin moyen de la parcelle (moyenne de 4 prélèvements) avait environ 1,3 dS/m en surface et 9,1 dS/m à 150 cm, à peu près le niveau des drains. Les analyses du sol au niveau du profil sont consignées dans le tableau 66. Les valeurs élevées de pH, particulièrement en surface, traduisaient la sodicité encore présente dans le sol. L'élévation de la CEE va de pair à une augmentation du SAR qui résulte d'un enrichissement en chlorure de sodium. Le faciès géochimique est très nettement chloruré sodique.

Tableau 66. Caractérisation chimique du sol au niveau du profil de la parcelle (21/7/92).

(les cations et anions sont exprimés en méq/l dans l'extrait à saturation).

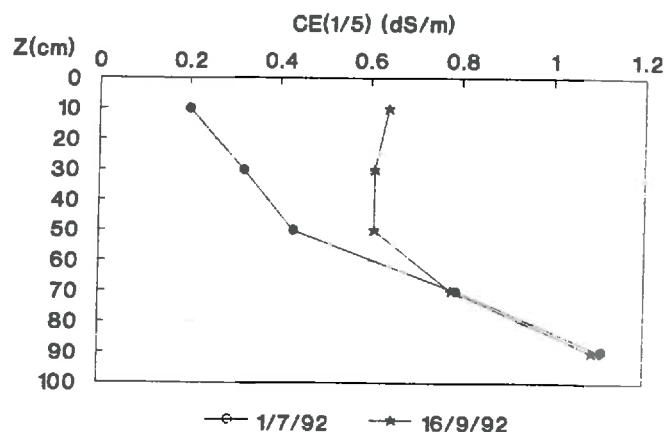
Horizon (cm)	0-15	15-30	30-60	60-70	70-100	100-105
pH 1/2,5	9,0	9,3	9,1	8,8	9,1	9,4
SAR	13	16	25	26	30	28
CE (dS/m)	2,5	2,2	4,4	6,8	8,8	6,6
CO ₃ ²⁻	0	0	0	0	0	0
HCO ₃ ⁻	6,0	9,0	6,0	5,0	5,0	5,0
SO ₄ ²⁻	7,1	6,2	2,4	10,2	9,4	9,8
Cl ⁻	19,4	12,0	49,0	72,0	98,0	79,8
Ca ²⁺	6,6	3,3	5,0	8,7	10,2	7,9
Mg ²⁺	1,3	0,8	2,6	6,0	9,0	7,0
Na ⁺	25,4	23,4	49,8	69,7	92,4	77,2
K ⁺	0,2	0,2	0,2	0,3	0,5	0,4
Σ (Anions)	32,5	27,2	57,4	87,2	112,4	94,6
Σ(Cations)	33,5	27,7	57,6	84,7	112,1	92,5

Une relation entre la CEe de l'extrait de pâte saturée et celle de l'extrait au cinquième (CE(1/5); Servant, 1975), nous a permis d'alléger les analyses:

$$CEe = 0,085 + 4,705 * CE(1/5) \quad \text{avec} \quad r = 0.933 \quad n = 28$$

A la veille de la première irrigation, le sol était non salé en surface. La salinité s'élevait d'une manière linéaire en profondeur (Figure 91). Dès la première irrigation, la salinisation du sol est manifeste depuis la surface jusqu'à la base du profil. Au cours du temps, un équilibre s'établissait entre les apports de sels par l'eau d'irrigation et les exportations de sels vers la nappe. Le profil d'équilibre d'allure linéaire, possède environ 3 dS/m en surface (CE de l'extrait de pâte saturée), 6 dS/m à 50 cm et environ 12 dS/m à 100 cm. La salure en surface est ainsi à peu près équivalente à celle de l'eau d'irrigation (3,5 dS/m).

Eté 92



Eté 93

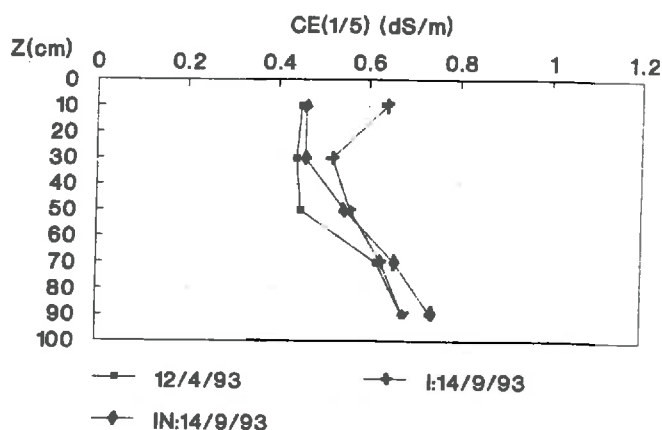


Figure 91. Evolution du profil salin au cours d'un cycle d'irrigation - été 92 et été 93.

Les quantités totales de sels apportées par les eaux d'irrigation variaient entre 15 et 42 Kg/25 m² soit environ 6 à 16,8 tonnes/ha (Figure 92). Les cuvettes situées au milieu, plus arrosées que les autres, ont enregistré les apports en sels les plus importants. D'après les 4 prélèvements initiaux et les 16 finaux, le stock de sels dans la couche 0-40 cm où se concentrent toutes les racines du maïs était initialement de 1 Kg de sels/cuvette (0,4 tonne/ha). A la fin du cycle des irrigations, le stock résiduel était en moyenne de 2 Kg (0,8 tonne/ha); (Figure 93). La salinisation des sols est manifeste, environ 1 kg de sels accumulés (0,4 tonne/ha). La quantité drainée moyenne était de 25 Kg (10 tonnes/ha) pour plus de 26 Kg (10,4 tonnes/ha) apportés soit plus de 96 % de sels ont été évacués au delà des 40 premiers centimètres.

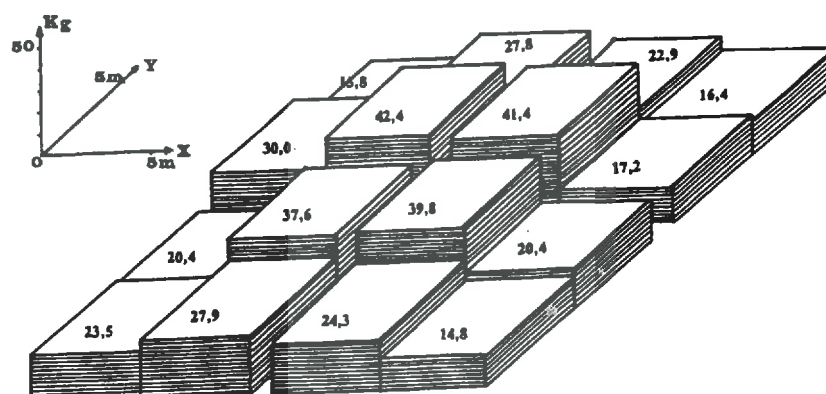


Figure 92. Apports totaux en sels (en Kg/25 m²).

La numérotation des sites D, L, G, F et de 1 à 4 n'a pas de signification particulière.

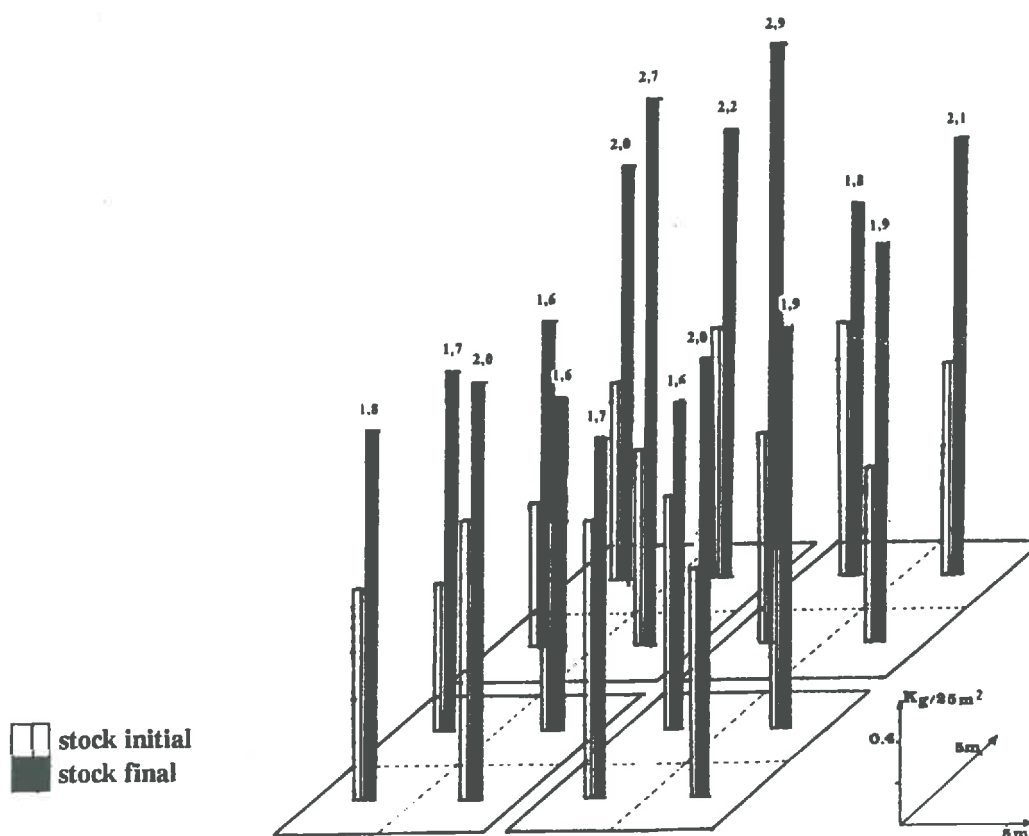


Figure 93. Evolution du stock salin (en Kg/25 m²).

L'irrigation ayant été poursuivie au cours de l'été 93, les accumulations en sels ont été en moyenne de 1 Kg/25m² (0,4 tonne/ha) avec un minimum de 0,4 Kg (0,16 tonne/ha) et un maximum de 1,7 Kg (0,68 tonne/ha). La quantité s'élevait près des asperseurs et diminuait lorsqu'on s'y éloignait avec les mêmes tendances de la distribution de l'eau. A la fin du cycle d'irrigation, sur un apport moyen de 26 Kg/25m² (10,4 tonnes/ha), 25 Kg (10 tonnes) ont été lessivés soit plus de 96%.

Durant la période estivale, le sol se salinise d'environ 30 g/m² soit 0,3 tonne/ha, s'il n'est pas irrigué et 25% de plus (0,4 tonne) s'il l'est. Cette salinisation est d'origine différente, par la remontée des sels de la nappe dans le premier cas, essentiellement par les sels contenus dans l'eau d'irrigation dans le second. Entre deux irrigations, même si une salinisation par remontée peut avoir lieu, elle serait négligeable.

- Régime hivernal:

L'évolution de la salinité entre septembre 92 et avril 93 (Figure 94) montre que pour un stock initial d'environ 2 Kg (0,8 tonne/ha), la quantité lessivée est de 0,9 Kg. Le stock résiduel de 1,4 Kg (0,56 tonne) est légèrement supérieur à celui qu'on avait en juin une année auparavant, 1 Kg (0,4 tonne).

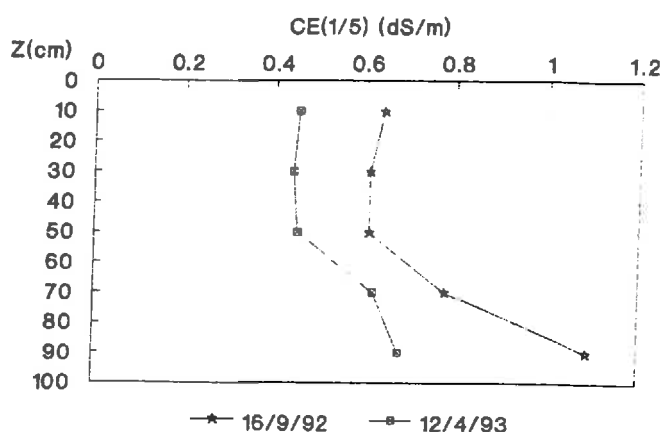


Figure 94. Evolution de la salinité du sol en hiver.

- Régime printanier:

Vers le mois d'avril, le dessèchement du sol en surface a provoqué la perte hydrique d'environ 32 mm et une remontée des sels d'environ 10 g/m² (0,1 tonne/ha) pour les 40 premiers centimètres. Cette quantité est environ trois fois plus faible que celle qu'on observe en plein été (0,3 tonne).

III.3.3. Régime des sels selon différents itinéraires agronomiques

- Régime annuel:

Après la mise en eau de la parcelle au cours de l'été 1992, nous avons suivi l'évolution de la salinité sous deux formes d'occupation du sol:

- le sol a été labouré et occupé par une culture hivernale pluviale puis irrigué de nouveau au cours de l'été 1993;

- le sol a été abandonné à la suite de sa salinisation dès le premier cycle d'irrigation.

Dès ce premier cycle d'irrigation (été 92), la salure du sol augmente. Une quantité de sels s'ajoute au stock initial. Une bonne partie est lessivée en hiver. Les irrigations engendrent un profil salin de plus en plus équilibré entre 0 et 1 m. Compris entre 0,6 et 1,2 dS/m à la fin du premier cycle, il devient entre 0,5 et 0,7 dS/m à la fin de l'été 93 (Tableau 67).

Tableau 67. Evolution de la salinité et du stock salin selon un itinéraire d'irrigation continue (I) et un itinéraire d'arrêt d'irrigation(IN).

Variable	CE(1/5) (dS/m)					Stock salin (g/m ²)				
Pr.(cm)	7/92	9/92	4/93	9/93-I	9/93-IN	7/92	9/92	4/93	9/93-I	9/93-IN
0-10	0,26	0,65	0,50	0,68	0,44	7,9	17,4	14,9	18,6	12,7
10-20	0,26	0,58	0,38	0,60	0,44	7,9	16,8	11,1	19,0	12,7
20-40	0,39	0,64	0,39	0,53	0,46	25,8	41,5	25,8	35,1	28,1
40-60	0,49	0,63	0,49	0,56	0,58	48,1	61,8	37,0	54,0	56,7
60-80	0,85	0,88	0,44	0,63	0,72	82,8	85,6	43,2	61,8	69,9
80-100	1,17	1,18	0,80	0,69	0,82	97,3	98,8	59,4	57,2	68,2

Avec:

- Chaque valeur est la moyenne de 16 sites sauf pour 9/93-I et 9/93-N où la moyenne provient de 8 sites.

- pour 9/93-I, les irrigations sont poursuivies.

- pour 9/93-IN, les irrigations sont arrêtées.

Sur un stock initial de 270 g entre 0 et 1 m (2,7 tonnes/ha), les irrigations ont amené plus de 52 g mais plus de 131 g ont été lessivés au cours de l'hiver 93. Le deuxième cycle des irrigations a apporté autant de sels que le cycle précédent, 55 g/m².

Dans l'ensemble, le sol se désalinise. Ceci ne l'est cependant que pour les niveaux profonds. En surface (0-60 cm), la salinisation est très nette et significative (Tableau 68). C'est la couche profonde (60-100 cm) qui accuse une désalinisation considérable. Le stock salin tend à un équilibre.

Si l'été suivant l'irrigation est arrêtée, la salure du sol ne serait pas pour autant abaissée. Une salinisation par remontée des sels équivalente à celle provoquée par l'irrigation risque de se reproduire.

Tableau 68. Evolution du stock de sels par couche et par itinéraire (en g/m²).

Pr.(cm)	7/92	du 7/92 au 9/92	9/92	du 9/92 au 4/93	4/93	du 4/93 au 9/93-I	9/93-I	du 4/93 au 9/93-IN	9/93-IN
0-100	270	+52	322	-131	191	+55	246	+57	248
0-60	90	+48	138	-49	89	+38	127	+21	110
60-100	180	+4	184	-82	102	+17	119	+36	138

Au cours du premier cycle d'irrigation (du 7/92 au 9/92), le sol s'est salinisé et 92% des sels accumulés (48 g sur 52 g) sont dans la couche 0-60 cm et 8% seulement entre 60 et 100 cm.

L'hiver (du 9/92 au 4/93), un lessivage considérable s'est produit, ce qui a permis de rétablir l'équilibre dans la couche 0-60 cm (-49 g) et provoquer une désalinisation d'environ 45% de la couche profonde (-82 g/184 g).

Le deuxième cycle d'irrigation (du 4/93 au 9/93) s'est traduit par une salinisation dont plus de 40% des sels accumulés dans la couche profonde et 60% dans la couche 0-60 cm. Si les irrigations ne sont plus poursuivies, une quantité totale de sels équivalente à celle provoquée par l'irrigation s'ajoute au stock initial (+57 g) mais elle serait répartie différemment, 60% en profondeur et 40% en surface. Les cycles d'irrigations intermittents sont autant salinisants que les irrigations intensives.

- Régime pluriannuel:

Après cinq années d'irrigation (1992-1996), la différence de salinisation est très nette entre un sol continuellement irrigué, celui où elle a été interrompue durant l'été 1993 et celui qui n'a jamais été irrigué (Tableau 69).

Tableau 69. Evolution de la salinité du sol entre 7/92 et 9/96 (CE (1/5) en dS/m).

Date	Traitement	Variable	CE(0-20)	CE(20-40)	CE(40-60)	CE(60-80)	CE(80-100)
7/92	avant 1ère irrigation	N	4	4	4	4	4
		Moy.	0,20	0,32	0,43	0,79	1,11
9/92	à la fin de la 1ère irrigation	N	16	16	16	16	16
		Moy.	0,64	0,61	0,61	0,78	1,09
		C.V.(%)	17	14	9	29	26
4/93	avant 2ème irrigation	N	16	16	16	16	16
		Moy.	0,45	0,44	0,45	0,62	0,68
		C.V.(%)	62	61	44	73	63
9/93-I	à la fin de la 2ème irrigation	N	8	8	8	8	8
		Moy.	0,64	0,52	0,56	0,63	0,68
		C.V.(%)	31	18	12	17	23
9/93-N	irrigation interrompue en 93	N	8	8	8	8	8
		Moy.	0,56	0,46	0,55	0,66	0,74
		C.V.(%)	15	17	14	16	27
9/96-I	irrigation continue entre 92 et 96	N	8	8	8	8	8
		Moy.	0,57	0,73	0,74	0,78	0,89
		C.V.(%)	13	23	30	27	43
9/96-IN	irrigation continue entre 92 et 96 mais interrompue en 93	N	8	8	8	8	8
		Moy.	0,46	0,60	0,65	0,63	0,64
		C.V.(%)	13	18	21	16	15
9/96-N	pas d'irrigation entre 92 et 96	N	4	4	4	4	4
		Moy.	0,23	0,26	0,37	0,44	0,54

Avec CE(0-20): CE(1/5) entre 0 et 20 cm de profondeur; pareille pour CE(20-40), CE(40-60), CE(60-80) et CE(80-100).

Depuis l'été 1992, le sol s'est désalinisé en surface. Ce sont les niveaux intermédiaires et profonds qui ont été l'objet d'un départ de sels au cours de ces 5 années (Figure 95).

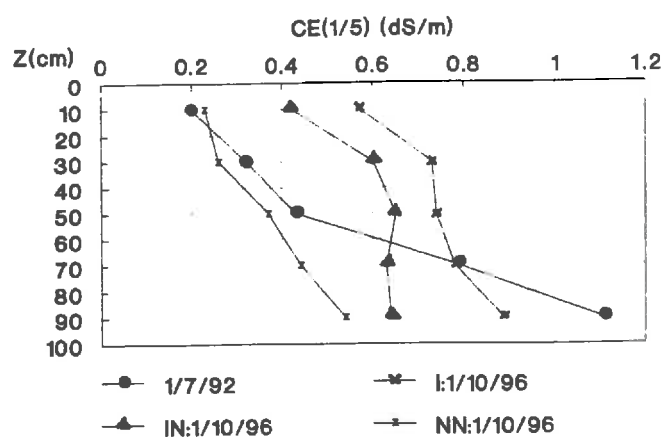
Prélèvement du sol:

7/92: avant la première irrigation.

I: au 9/96 dans sites irrigués depuis 1992.

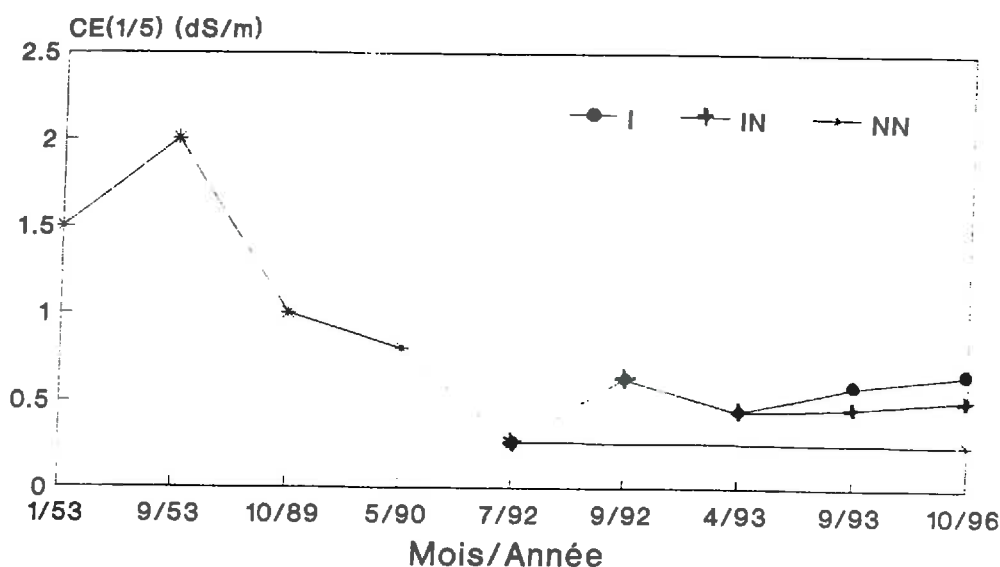
IN: au 9/96 dans sites irrigués depuis 1992 sauf en 1993.

NN: au 9/96 dans sites jamais irrigués.

**Figure 95. Evolution de la salinité du sol selon le régime des irrigations.**

La salinité du sol de la parcelle est passée par trois phases: avant l'aménagement du périmètre, après aménagement mais avant la mise en eau, et après la mise en eau (Figure 96). Ainsi, nous obtenons une confirmation de l'évolution de la salinité observée à l'échelle du périmètre (voir chapitre fonctionnement du sol).

Avant l'aménagement (1953; SCET-Tunisie, 1981), le régime des sels présentait une variation de la salinité entre 1,5 en hiver et 2 dS/m en été (CE(1/5) de la couche 0-40 cm). Après assainissement-drainage mais avant la mise en eau, la variation n'est plus qu'entre 0,8 et 1 dS/m Elle atteint sa valeur la plus basse en 1992. Depuis et selon la fréquence des irrigations, la salinité du sol est assez stable ou en légère augmentation.



I: sol irrigué depuis 1992.

IN: irrigation interrompue en 1993.

NN: sol non irrigué.

Figure 96. Evolution de la salinité du sol de la parcelle en fonction des aménagements et de la fréquence des irrigations.

Ainsi, selon son régime salin, le sol présente deux couches qui sont les lieux de phénomènes différents:

- la couche 0-60 cm qui se salinise dès le premier cycle d'irrigation.
- la couche 60-100 cm dont la salinisation est reportée aux années suivantes.

Le lessivage hivernal est assez efficace. La bonification des sols salés dans les conditions de Kalaât Landelous est ainsi très faisable par la contribution des pluies même sous irrigation aux eaux saumâtres.

IV. INCIDENCES SUR LES CULTURES ET EFFICIENCE DE L'UTILISATION DE L'EAU

IV.3.1. Culture d'été

Au cours de l'été 92, le maïs semé tardivement et irrigué irrégulièrement et insuffisamment n'a jamais pu croître normalement. Depuis la fin du mois de juillet, nous avons constaté le flétrissement de quelques plantules, résultant d'un stress hydrique et d'une brûlure des feuilles par les sels contenus dans les eaux d'irrigation. Les attaques par les pyrales ont endommagé la récolte. Pour ces raisons, les rendements en grains ont été très faibles et très variables. Le développement des racines était limité verticalement aux vingt premiers centimètres du sol, il s'agit des racines d'ancrage, et latéralement à environ 20 cm de part et d'autre de ce pied, il s'agit de racines fasciculées. Ces racines colonisent ainsi un volume global de 32000 cm^3 ($20 \text{ cm} \times 40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$). La distribution verticale de la densité racinaire du maïs est fortement affectée par l'état structural de la couche labourée (Tardieu, 1987). Elle est fortement affectée par le tassement du sol. Lorsque l'état structural des couches non travaillées est favorable, les racines prennent une direction quasi-verticale dans ces couches. Les systèmes racinaires affectés par l'état structural présentent un fonctionnement hydrique différent d'où les conséquences sur la croissance. Le bilan hydrique des cultures au champ est affecté par le tassement du sol et inversement, le travail du sol a un effet positif sur l'alimentation hydrique du maïs. Le tassement a pour conséquence la réduction de la croissance des parties aériennes et souterraines liées à l'état structural du sol. Ces observations bibliographiques nous ont conduit à considérer la détermination du stock initial et final des sels seulement dans la couche 0-40 cm.

Etant donné que la production d'une culture est fonction, entre autres facteurs, de sa consommation en eau et de la salinité du sol, nous avons cherché les relations susceptibles d'exister entre les productions du maïs, matière sèche et grains, et la salure initiale, la salure finale des sols et les doses globales en eau d'irrigation.

Tout d'abord, nous constatons que le rendement en grains n'est pas proportionnel à la production de matière sèche. En effet, les facteurs qui agissent sur la croissance de la plante ne sont pas identiques à ceux qui interviennent dans la formation des grains. Le maïs traverse une période particulièrement critique pour ses besoins en eau de quinze-vingt jours avant la floraison mâle à quinze jours après (stade laiteux), un manque d'eau durant cette période peut entraîner une réduction très importante du rendement (jusqu'à 50%). Il en résulte qu'un apport rationnel d'eau par irrigation est nécessaire en juillet-août.

Les productions de matière sèche et de grains ne peuvent être expliquées dans nos essais uniquement par les apports en eau. La production est en moyenne d'environ $6,6 \text{ Kg}/25\text{m}^2$ (2,64 tonnes/ha) en matière sèche et $0,2 \text{ Kg}/25 \text{ m}^2$ (0,16 tonne/ha) en grains (Figure 97). La dispersion de la production est moyenne, d'environ 29%. Elle double et devient forte pour les grains, environ 56%. Selon Tardieu (1987), les matières sèches des parties des plantes de maïs sont inférieures de 30 à 50% dans le sol tassé par rapport au sol à agrégats grossiers.

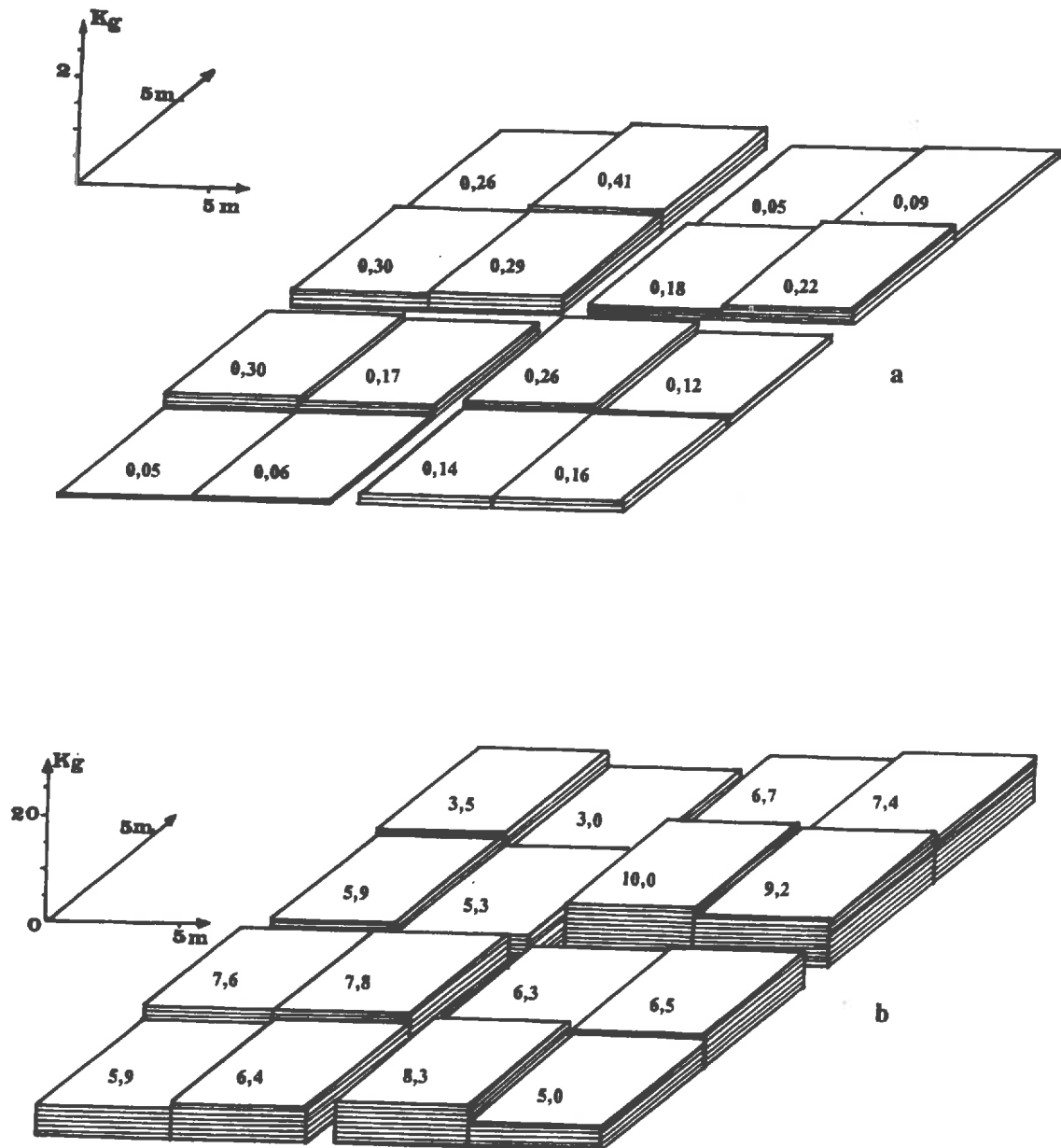


Figure 97. Variation de la production du maïs, en grain (a) et en matière sèche (b).
(en Kg/25 m²).

Parmi les autres paramètres explicatifs, nous avons cherché les relations entre ces productions et la salure initiale et la salure finale. Les productions de matière sèche et de grains n'apparaissent pas liées ni aux stocks initiaux en sels, ni même aux stocks finaux, même à travers une spatialisation des rendements.

Nous observons une homogénéisation des stocks de sels contenus dans la tranche 0-40 cm. Les stocks finaux autour de 2 kg/25 m² sont moyennement dispersés. Initialement, ces stocks étaient de l'ordre de 1 kg/25 m². La production en matière sèche est plus faible dans les cuvettes situées dans les coins de la parcelle, particulièrement celles sur la diagonale ouest-est. Leur irrigation par les asperseurs a été fortement perturbée. L'efficacité de l'utilisation de l'eau (FAO, 1975) est très faible, de l'ordre de 0,17 Kg/mm/ha.

Les défaillances au niveau de la gestion de la culture ont été évitées au cours de l'été 93. D'abord, le semis du maïs a été précoce. Les irrigations ont été menées d'une manière régulière (Planche 13). La croissance du maïs a été convenable jusqu'à la fin de juillet avant les attaques des pyrales. Les traitements aux insecticides n'ont pu que partiellement, sauver la culture. Vers le début du mois d'août, des brûlures sont apparues sur les feuilles des plantes intensivement irriguées. Vers la fin du mois d'août, les plantes apparaissaient très asséchées par le triple effet:

- des pyrales; leur attaque aux collets empêche la circulation de la sève vers la partie aérienne,
- des sels contenus dans l'eau d'irrigation,
- et d'une chaleur élevée et d'une dose d'irrigation inférieure au besoin des plantes.

La production reste toujours de loin meilleure que pour la campagne précédente. La production en matière sèche a en moyenne doublé, 10,1 Kg/25m² (4 tonnes/ha) et celle en grains a été multipliée par dix 1,9 Kg/25m² (0,76 tonne/ha). L'efficacité de l'utilisation de l'eau a été améliorée pour atteindre 1,83 Kg de matière sèche/mm/ha. En dépit de nos résultats, la chute de rendement due à la salinité de l'eau d'irrigation est d'environ 50% (selon les normes FAO, 1985; C_{Ee}=5,9 dS/m et C_{Ew}=3,9 dS/m), le maïs étant une culture modérément sensible aux sels. Les rendements sont affectés par la salinité de l'eau d'irrigation et la salure du sol: absorption directe des chlorures et du sodium par les feuilles et absorption indirecte des sels par les racines. La production est plus faible dans les cuvettes situées dans les coins ouest et est.

IV.3.2. Culture d'hiver

Les productions obtenues par cuvette ne présentent pas une différence que l'on peut attribuer aux stocks résiduels de sels. Si on se réfère à une production de 36 tonnes de matière sèche (obtenue pour une coupe réalisée au stade grain laiteux avec la même triticale et au cours du même hiver dans la région de Mornag (20 Km au sud de Tunis) et sur des sols limono-argileux bien structurés non salins; Néji (1994); communication orale), nous avons eu une baisse de rendement de 70% pour un rendement moyen de 11 tonnes/ha (environ 27 Kg/25m²). Une proportion importante de cette baisse est due à la salure du sol qui a pourtant diminué au cours de l'hiver.



26/5/1993: Un mois après la mise en place du maïs - irrigation par aspersions.



1/9/1993: Brûlures des feuilles du maïs par les sels.



2/3/1993: Céréale (triticale) pluviale infestée de mauvaises herbes.



21/7/1993: Début de brûlures des feuilles du maïs par les sels.

Planche 13. Evolution de l'occupation de la parcelle.

IV.3.3. Absorption foliaire des sels

Bouaziz (1993) a procédé au cours de l'été 1993 à un diagnostic pour déterminer les causes d'apparition des brûlures sur les cultures dans trois secteurs du périmètre de Kalaât Landelous. L'analyse minérale a été entreprise sur les organes des plantes de tomate, courgette et sorgho. Ces cultures sont irriguées par aspersion par des eaux titrant en moyenne 2,5 g de sels par litre. Plus de la moitié des sels est composée de chlorures de sodium ce qui les rend nocives, agressives et toxiques pour les plantes.

Par rapport aux organes normaux, ceux atteints de brûlures présentent une augmentation très nette des teneurs en sodium et une diminution systématique des teneurs en potassium, correspondant au phénomène d'antagonisme sodium- potassium. En pénétrant dans les tissus végétaux, l'ion Na^+ chasse les autres éléments, notamment le K^+ perturbant ainsi l'alimentation minérale du végétal, sa croissance et sa production.

D'autre part, l'irrigation par aspersion d'une eau chargée pendant le jour engendre une toxicité en ions Na^+ et Cl^- qui se concrétisent par les brûlures sur les extrémités des feuilles des cultures. L'augmentation de la salure du sol accentue encore l'absorption racinaire du sodium. Absorption et toxicité des sels se manifestent durant les périodes chaudes et sèches. Elles sont aggravées par les vents surtout quand il s'agit de l'aspersion. Ces conditions se trouvent réunies dans la région de Kalaât Landelous.

Le seuil de toxicité du sodium de 0,25 % du poids de la matière sèche (FAO, 1985) est atteint dans les feuilles du maïs quelle que soit la dose en eau (Tableau 70).

Tableau 70. Diagnostic foliaire sur maïs. Été 93. Moyenne des sites G1, G4 et F4.

Distance / Asperseur (en m)	en % pour 100 g de M.S.						en méq/100 g de M.S.					
	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	N^+	PO_4^{2-}	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	N^+	PO_4^{2-}
1	0,3	0,4	1,6	0,5	1,7	0,1	1,4	10,0	78,1	41,1	123,8	13,2
3	0,3	0,4	1,6	0,6	1,6	0,1	1,2	10,5	79,8	46,9	114,8	13,9
6	0,3	0,5	1,6	0,6	1,7	0,1	1,4	12,4	81,5	45,2	118,6	13,6

Enfin, l'effet de l'irrigation par aspersion ne se faisait sentir que vers la floraison sous forme de brûlures. Ces brûlures se manifestent plus nettement avec la mauvaise distribution de l'eau et la richesse des eaux en chlorure de sodium.

V. CONCLUSION

L'étude de l'organisation et du fonctionnement du sol du périmètre irrigué de Kalaât Landelous (Chapitre I et II) est un préalable à l'analyse de l'évolution du sol à l'échelle de la parcelle. Certes, dans l'organisation et en particulier dans le fonctionnement du système sol-nappe, plusieurs caractères de bonification des sols salés de Kalaât ont été appréhendés. Cependant, la mise en valeur des sols ne pourrait être cernée sans mettre en évidence l'évolution de la porosité de la couche arable, le rôle et le comportement des cultures, l'impact du mode d'irrigation et l'effet des pratiques culturales. Ces paramètres qui expriment une dynamique saisonnière ne pourraient être perçus qu'à l'échelle de la parcelle. C'est aussi à ce niveau que la contribution de l'agriculteur devient significative. La mise en valeur des sols salés est, de prime abord, un aménagement hydro-agricole qu'entreprend l'Etat. A cet effort, l'agriculteur doit s'associer pour orienter la récupération des sols dans le sens positif par un ensemble de pratiques. C'est ce que nous avons tenté d'élucider.

A l'échelle de la parcelle, l'agriculteur peut agir sur l'évolution du sol:

- **dans le système sol-nappe-eau d'irrigation-itinéraire agronomique:** ce qui lui permet de modifier le régime hydrique de la couche 0-60 cm et de maîtriser les variations de sa teneur en eau et en conséquence d'agir sur la teneur en sels en améliorant le lessivage des sels. Plusieurs options de gestion conservatoire des sols permettent à l'agriculteur de contenir la salinisation de sa parcelle et de rentabiliser au mieux la mise en valeur du sol amorcée par l'assainissement et le drainage des terres.

- **dans le système sol-eau d'irrigation-plante:** l'intervention de l'agriculteur est capitale dans l'amélioration de la porosité du sol. Son effort doit être permanent pour régénérer mécaniquement (labour et façons culturales) les propriétés qui se dégradent sous l'effet des irrigations par aspersion. Ce mode d'irrigation doit être examiné de plus près car il nous apparaît assez destructeur pour les agrégats de surface réduisant considérablement l'infiltration de l'eau et conduisant à la salinisation. Ce mode d'irrigation affecte aussi considérablement les cultures, feuillage et production. De ce fait, les critères techniques du choix de l'aspersion doivent être revus. Il incombe à l'Etat de l'entreprendre avant d'imposer ce mode à l'agriculteur.

L'évolution du sol à l'échelle de la parcelle met en évidence le rôle de l'agriculteur. C'est tout à fait notre conception de la bonification des sols salés où le couple plante-agriculteur doit se substituer à la plante qui a constitué souvent l'unique cible des chercheurs dans la récupération des sols salés et la salinisation.

DISCUSSION ET CONCLUSION

Dans le grand système hydro-pédologique de la Mejerda, l'hydromorphie et l'halomorphie affectent à des degrés divers les sols peu évolués d'apport alluvial. Les formations alluvionnaires de la Basse Vallée de la Mejerda situées en bordure de mer et qui évoluent sous l'effet d'une nappe phréatique salée proche de la surface du sol sont plus concernées par ces phénomènes. Ces terres étaient initialement exploitées extensivement pour la production de cultures céréalières et fourragères et comme parcours. Elles ont fait l'objet d'une mise en valeur, pour le développement de cultures maraîchères et fourragères irriguées d'été, par l'installation d'un réseau d'assainissement-drainage et d'un réseau d'irrigation. Cet aménagement des sols salsodiques de la région de Kalaât Landelous demande à être bien étudié afin de maîtriser l'évolution des sols et améliorer leur gestion. L'anthropisation et les perturbations apportées à ce milieu assez fragile rendent les risques de dégradation des sols par salinisation considérables. C'est dans ce contexte de préservation des ressources en eau et en sol que se situe notre étude dont l'approche et les résultats peuvent être utiles à différents niveaux.

Au niveau de l'approche

Le périmètre est l'un des observatoires du réseau de surveillance de la salinisation. Il est aussi l'entité située le plus en aval d'un système comprenant plusieurs périmètres aménagés dans la Vallée de la Mejerda au nord de la Tunisie. Dans la conception de l'approche, nous avons tenu compte des composantes hydro-pédologiques. Aussi, la méthode de travail a-t-elle été basée sur une étude morphologique assez détaillée réalisée à différentes échelles d'organisation des sols. Ceci nous a permis de formuler la conséquence de la superposition de matériaux de texture différente sur la dynamique des sels. L'organisation des sols a été le préalable à l'étude de leur fonctionnement dans différents ensembles, le système sol-nappe et le système sol-pluie. Ces systèmes traduisent les régimes saisonniers des sels. Quant à l'évolution des sols, amorcée dans la genèse des organisations des sols et leur fonctionnement à l'échelle du périmètre, elle a été précisée à l'échelle de la parcelle. Elle a fait l'objet d'un chapitre à part axé sur l'évolution des régimes hydrique et salin mais aussi sur l'évolution de l'espace poral et sa dynamique saisonnière sous différents itinéraires techniques. Les conséquences agronomiques ont également été abordées sur les rendements des cultures estivales irriguées. L'approche s'est basée sur un suivi pluri-annuel, d'étude comparative entre milieu irrigué et milieu exploité en conditions pluviales. Pour ce faire, les outils employés ont été les analyses habituelles de sol et d'eau, le suivi des rendements des cultures et les observations macro- et micromorphologiques de l'espace poral de la couche arable.

Au niveau des résultats

Les principaux traits de la mise en valeur des sols salés du périmètre de Kalaât Landelous sont:

- Caractères d'organisation:

La texture, la structure et la salure du sol analysées à différentes échelles révèlent une forte variabilité spatiale, même à de courtes distances. Pour les paramètres liés à la granulométrie, la variabilité est plus forte en surface. Pour les paramètres chimiques, la variabilité est plus faible en surface et en profondeur mais plus forte aux niveaux intermédiaires soumis à la fois aux effets des précipitations et à celui de la nappe. Cependant, le mode de répartition des matériaux confère à ces sols une certaine homogénéité et isotropie plus nettes pour certaines propriétés et dans certaines directions, comme pour la fraction argile+limon fin et dans la direction perpendiculaire au lit de la Mejerda.

Selon une analyse des tendances moyennes et de leur dispersion, nous sommes parvenus à un modèle d'organisation caractérisé par un profil d'organisation-type auquel nous avons associé un profil salin-type. Ils se résument en un horizon argilo-limoneux à structure polyédrique angulaire en surface, plus argileux à structure prismatique en dessous reposant vers 1 m de profondeur sur un horizon limono-sableux à structure fondue (massive). Ce dernier surmonte un horizon limono-argileux fin à structure polyédrique anguleuse fine. Le profil salin-type pour la période de mesure (4/1993), présente une allure linéaire descendante avec une CEE d'environ 1,5 dS/m en surface et 8,4 dS/m vers 1,5 m de profondeur.

Les analyses microscopiques et micromorphologiques apportent des confirmations sur l'origine des matériaux. Ce sont des argiles interstratifiées dominées par des smectites, très riches en calcite microcristalline avec quelques minéraux non altérés de glauconite et de dolomite mais aussi des morceaux de croûtes calcaires, des fragments d'argiles fortement orientés et des débris de coquilles. La distribution relative des grains grossiers par rapport à la micromasse met en évidence des variations brutales de la fréquence de ces grains d'une dizaine de centimètres d'épaisseur. Ce sont autant de preuves supplémentaires sur l'origine allochtone de ces matériaux transportés depuis l'amont au cours des crues de la Mejerda. Leur classification parmi les sols peu évolués (Xérofluents) est justifiée. Néanmoins, des prémices d'évolution, probablement antérieurs à l'aménagement du périmètre, sont décelables à travers un certain nombre de traits pédologiques d'organisation. En particulier, nous observons une évolution de la microstructure qui reflète soit l'origine des matériaux, par son type polyédrique angulaire, soit l'action anthropique, par sa nature cavitaire en surface, soit l'activité biologique très importante près de la surface et décelable par les chenaux, soit encore la proximité de la nappe par sa forme tubulaire fine. Cette évolution apparaît aussi par les revêtements d'argile, la présence de coiffes argileuses des grains de quartz ou encore les remplissages de chenaux et les nodules ferriques près de la surface. Plus encore, nous observons de nouvelles formes d'accumulations du calcaire et du gypse. Ces accumulations sont sous forme de pseudo-mycéliums visibles à l'oeil nu. Par des analyses à la microsonde, le gypse se présente sous forme de microrosettes de quelques

dizaines de microns; quant à la calcite, elle apparaît sous forme d'amas sans forme particulière.

L'organisation verticale met en évidence une discontinuité de la texture. Des strates, de forme lenticulaire, agissent sur la dynamique ascendante ou descendante des sels et par voie de conséquence interviennent sur la salinisation des sols selon le régime des irrigations.

- Caractères de fonctionnement:

Le fonctionnement est analysé dans différents systèmes et à plusieurs échelles. Il dépend d'abord des caractéristiques de la nappe et de son régime. Dans le système sol-nappe, la mise en valeur s'est concrétisée par la désalinisation manifeste des sols qui est décelable par un bilan global des sels. Un nouveau processus de salinisation par l'irrigation et son intensification s'instaure et s'affirme d'une année à l'autre. La bonification des sols est fortement tributaire de l'efficacité du réseau d'assainissement et de drainage. Ce fonctionnement dépend aussi des aménagements. Les analyses réalisées sur le système émissaire/collecteur/drain ou encore le système émissaire/collecteur/drain/parcèle révèlent de fortes variabilités de la salinité des eaux et des sols qui traduisent la rapidité de la désalinisation. Le fonctionnement des sols met en évidence une tendance vers un équilibre du régime des sels. La salure des sols serait dans les limites tolérables par les cultures si aucun dysfonctionnement ne venait affecter ces systèmes.

La mise en valeur de ces sols peut être renforcée si la gestion des sols et des eaux intègre le régime des pluies. Dans l'effet de la pluie, les sols limono-argileux et salins du périmètre de Kalaât Landelous, subissent entre l'automne et l'été, l'impact des pluies qui permettent un certain lessivage des sels et une réorganisation de leur surface. L'efficacité des pluies est fortement augmentée par des façons culturales qui préparent le sol à mieux laisser l'eau s'infiltrer, à être moins affecté par le ruissellement et par l'érosion. L'aspersion paraît moins favorable à certains de ces phénomènes. Cependant, ces inconvénients disparaissent complètement par des itinéraires culturels adaptés.

Le fonctionnement des sols à l'échelle du périmètre met en évidence des traits d'évolution relatifs à trois périodes: avant l'exécution des canaux d'assainissement-drainage, à la fin de ces travaux et avant l'irrigation et au cours de l'irrigation et de l'accroissement des surfaces arrosées. Ces traits sont dans l'ensemble, des signes de réussite de la mise en valeur de ces sols salés.

- Caractères d'évolution:

L'évolution du sol entamée à l'échelle du périmètre a été précisée à l'échelle de la parcelle. Elle a concerné les régimes hydrique et salin du sol. Nous avons distingué deux couches qui ont des comportements très différents. La couche 0-60 cm initialement soumise à des variations saisonnières de sa teneur en eau et de sa salinité, se retrouve plus exposée à l'effet du drainage par la désalinisation qu'elle a subi, et aussi plus exposée à l'effet de l'irrigation par le maintien d'une certaine humidité du sol et aussi par les sels qu'elle accumule l'été et dont elle se débarrasse plus ou moins l'hiver.

Cette évolution apparaît aussi dans l'espace poral et ses caractéristiques. Cette porosité est très sensible à tous les facteurs qui peuvent l'affecter en particulier la gestion de l'eau et du sol et à l'activité biologique. Son expression se traduit par la nature de la microstructure dans l'horizon de labour. L'effet de cette porosité sur la croissance et le rendement des cultures est difficile à mettre en évidence car il est largement dominé par l'effet des sels plus facile à cerner par des manifestations sur la culture ou par des analyses de la salinité du sol ou encore par la dose d'irrigation appliquée. A l'échelle de la parcelle, la mise en valeur des sols salés ne peut réussir que si l'agriculteur y participe et adapte son savoir-faire aux nouvelles exigences du système eau-sol-plante.

Pour améliorer la gestion des sols salés mis en valeur dans le périmètre de Kalaât Landelous, il faut tenir compte du modèle d'organisation des sols, celui de leur fonctionnement et enfin celui de leur évolution. Les sols s'organisent à partir d'un matériau limono-argileux calcaire dont le ped primaire est un polyèdre subanguleux. Ils se caractérisent par une forte variabilité verticale, c'est la stratification, mais par une faible variabilité de l'horizon de surface. La salure moyenne en surface s'élève en profondeur. Cependant, elle dépend de la nappe et du régime des irrigations. Le fonctionnement des sols est régi par une nappe phréatique superficielle salée, et par ses variations saisonnières d'ordre climatique ou celles produites par l'irrigation et l'efficacité du drainage. Des relations spatiales entre la texture du sol, la nappe, la salure et les caractères morphologiques ont été mises en évidence. Le bilan des sels fait apparaître un régime estival additif et un régime hivernal soustractif. Le régime d'équilibre des sels n'est pas encore atteint. Sous pluie, le lessivage des sels est fonction au préalable de l'état de surface. Le sol à la fin du cycle des irrigations, battant, est plus favorable au ruissellement et à la réorganisation locale. L'évolution des sols est très dépendante du régime des irrigations, du système de culture pratiqué et de l'itinéraire technique. Cette évolution, à caractère saisonnier, est fonction de l'organisation de surface. La structuration du matériau est à la base de l'efficacité du lessivage des sels.

En définitive, le périmètre de Kalaât Landelous apparaît comme un modèle d'organisation et de fonctionnement dont l'évolution a été appréhendée au niveau d'une parcelle. Les résultats obtenus sont transférables directement au système de la Basse Vallée de la Mejerda et moyennant certains ajustements, à d'autres périmètres de la Vallée de la Mejerda. Dans ce transfert des résultats, il faut retenir les trois niveaux de manifestation de la salure dans le paysage de la Mejerda: celui de l'agriculteur, celui du périmètre irrigué et enfin celui du système hydro-pédologique. Cette démarche impose une connaissance du phénomène à toutes les échelles. Mais les résultats acquis peuvent être régionalisés, ce qui est d'un intérêt majeur et général.

DISCUSSIONS

ET

CONCLUSION GENERALE

DISCUSSIONS ET CONCLUSION GENERALE

Nos allons traiter trois aspects fondamentaux qui découlent de cette étude. Le premier est relatif à la mise en valeur des sols salés en se référant aux deux exemples analysés dans ce travail. Le second et le troisième proposent les approches à adopter dans le futur pour appréhender et prévenir la salinisation des milieux irrigués de plus en plus soumis à l'anthropisation.

La mise en valeur des sols salés:

Les méthodes employées pour l'étude de la mise en valeur des sols salés de la Basse Vallée de la Mejerda s'inscrivent dans une approche globale de l'étude des sols salés et de la salinisation en Tunisie. Les deux exemples de bonification de sols salés en milieu semi-aride tunisien analysés dans cette étude présentent beaucoup de similitudes dans les traits d'évolution du matériau originel bien qu'ils diffèrent par le processus de la désalinisation, naturel ou anthropique, et par la vitesse de cette évolution.

Constitués de matériaux limono-argileux calcaires qui proviennent du bassin versant de l'Oued Mejerda, les sols de ces deux exemples s'intègrent dans l'histoire hydrologique de cet oued, et en particulier de la dynamique de son delta. Dans ce milieu fluvio-marin a eu lieu la genèse des sols salsodiques du périmètre et antérieurement, sur la rive sud-ouest du Golfe d'Utique asséchée au cours de l'été, s'étaient formés les bourrelets de Protville qui étaient au départ un ensemble continu de collines de pseudosables salsodiques. Compte tenu de leur altitude, la désalinisation s'est mise en route dès l'édification des bourrelets. Quant au périmètre de Kalaât, sa désalinisation n'a pu se concrétiser qu'après maîtrise et artificialisation du régime de la nappe phréatique.

Actuellement, les sols de la lunette sont désalinisés en surface et même à des profondeurs de 2 m mais la sodicité reste élevée même en surface. Quant aux pseudo-sables, ils ne sont perceptibles qu'au delà de 1,5 m de profondeur. Dans le premier mètre, la structure est polyédrique anguleuse à surstructure primatique. Sur le plan géochimique, le faciès est chloruré-sodique moins prononcé vers la surface à cause de la saturation progressive du complexe par les ions calcium libérés des alluvions calcaires. Plus on se rapproche de la Sebkha, plus le faciès devient chloruré-sodique. Ces caractères sont assez comparables à ceux des sols du périmètre de Kalaât. Les sols sont aussi désalinisés en surface mais sodisés. L'organisation initiale des alluvions est perceptible dans les couches baignant dans la nappe. En dessous, la structure est polyédrique anguleuse à surstructure primatique. Le faciès géochimique est chloruré-sodique moins prononcé en surface à cause des ions calcium libérés par les alluvions calcaires. En direction de la mer, le faciès devient de plus en plus chloruré-sodique.

En fait, les matériaux originels sont comparables. Le faciès géochimique est le même. Son évolution par concentration est aussi la même. Les différences résident dans l'épisode de formation des pseudo-sables, leur transport et leur accumulation sous forme de

bourrelets' et dans 'la qualité de l'eau' ou la désalinisation. Ainsi, pour le même type de matériau et malgré des conditions différentes, les résultats sont assez similaires.

En dépit des organisations initiales différentes, pseudosables pour la lunette d'El Mabtouha, et alluvions pour le périmètre de Kalaât Landelous, l'organisation actuelle de nature polyédrique subangulaire près de la surface, prismatique en dessous, est très comparable. Les ressemblances vont jusqu'au niveau microscopique par la nature de l'espace poral que génère une forte activité biologique et qu'impose une pratique agricole en surface et une fluctuation de la profondeur de la nappe en dessous pour le périmètre. En effet, l'élément qui les différencie réside dans la proximité de la mer et la faible altitude du périmètre qui se traduisent par la présence d'une nappe superficielle salée. Cependant, la désalinisation des sols qu'ils accusent actuellement et les accumulations calcaires et gypseuse qu'ils présentent, les rapprochent au niveau de leur évolution géochimique. Sur un autre plan, l'enrichissement des couches superficielles en matière organique contribue à l'amélioration de la structure et à la différenciation des couches superficielles du reste par une couleur un peu plus brunâtre. Enfin, les modifications suffisamment importantes qu'ont subi les deux formations, ont permis leur exploitation agricole et son intensification. La désalinisation qui a porté surtout sur les 50 premiers centimètres, a suffi pour rendre ces sols cultivables. En réalisant dans un laps de temps de quelques années ce que la nature a fait en quelques milliers d'années, on a pu récupérer les sols salsodiques des bordures des sebkhas littorales de la région de Kalaât Landelous. La bonification d'une tranche de sol de quelques dizaines de centimètres a suffi pour améliorer considérablement sa productivité.

Par ailleurs, l'étude menée sur la lunette d'El Mabtouha et le périmètre de Kalaât montre l'intérêt des démarches morphologiques fines, à diverses échelles emboîtées, pour disposer d'outils prédictifs quant à l'évolution probable de ces périmètres. L'analyse des manifestations morphologiques d'une évolution récente donne des idées sur ce qui risque de se passer.

En effet, notre étude dénote clairement de l'intérêt des approches morphologiques pour bien positionner des problèmes de gestion des sols irrigués. Dans les indicateurs habituels de l'évolution des sols sous irrigation, l'organisation qu'acquiert le sol est rarement retenue dans leur suivi. On lui préfère des indicateurs plutôt quantitatifs mesurables. Or, nous avons mis en évidence tout l'intérêt de la reconsidérer. La morphologie apparaît comme indicatrice des étapes d'une évolution. Elle traduit plus concrètement le comportement hydro-structural du sol soumis à des contraintes physico-chimiques et hydriques. Et comme les recherches s'orientent de plus en plus vers la résolution des problèmes liés à la gestion au niveau de la parcelle, l'approche morphologique sera inéluctablement la mieux indiquée à côté des indicateurs agronomiques de croissance et de rendement des cultures. Les recherches d'optimisation de l'utilisation de l'eau à la parcelle ne peuvent être validées et appropriées par l'agriculteur si elles ne reconsidèrent pas les transformations subies par le sol au cours de sa gestion. De ce fait, la morphologie doit être intégrée dans l'avenir dans les modèles physico-chimiques prévisionnels, en vue d'affiner le pouvoir prédictif de ces modèles. Par voie de conséquence, elle sera aussi un outil de généralisation des résultats obtenus sur un périmètre donné à d'autres contextes pédo-climatiques comparables. Dans ce sens, la modélisation du fonctionnement hydro-structural du sol par la définition de leur retrait et gonflement constitue une voie de recherche et d'application prometteuses.

Sur un autre plan, l'analyse de la mise en valeur réussie ne doit pas occulter les risques de salinisation dans le grand système hydropédologique de la Mejerda. Mais comment faut-il l'envisager ?

L'approche systémique des risques de salinisation:

L'accroissement des surfaces irriguées, l'emploi des ressources en eau de plus en plus salées, la mise en valeur de sols moins aptes à l'irrigation, l'intensification de l'assainissement et du drainage, la construction d'obstacles à l'écoulement des oueds vers la mer et les dépressions, se traduisent sur le bilan hydrologique par des systèmes de plus en plus endoréïques. Cette anthropisation des milieux engendre une évolution qu'il faut cerner et dont il faut prévenir les risques de dégradation. Dans notre cas, il s'agit de la dégradation de la qualité des eaux et des sols. Les démarches habituelles d'évaluation des risques de salinisation sont insuffisantes pour traduire les risques de dégradation à long terme des ressources en eau de surface et souterraine et par voie de conséquence sur l'efficacité de ces eaux et la productivité des milieux irrigués. L'artificialisation du fonctionnement des systèmes hydropédologiques et leur endoréïsation se traduisent tôt ou tard par leur salinisation progressive. Pour appréhender ces risques, nous devons entrevoir l'étude des risques de salinisation des sols à long terme selon une approche systémique. Cette approche proposée et appliquée au système hydropédologique de la Mejerda par Mhiri et al. (1996) apparaît indispensable pour une agriculture durable. Il reste cependant à formaliser l'approche, à la doter de méthodes appropriées d'investigations et à évaluer sa pertinence.

L'approche systémique du suivi de la salinité:

Le sous-système hydro-agricole de la Basse Vallée est composé de systèmes opérants dont les périmètres irrigués, le réseau hydrographique, le réseau d'assainissement et de drainage et le réseau d'adduction d'eau d'irrigation. Les données sur le système hydro-agricole, constituées en une base structurée, organisée et évolutive, correspondent au système d'information sur lequel s'appuie les décideurs pour piloter et gérer le système des périmètres irrigués en opérant sur l'irrigation, le drainage, etc...

A chaque système (ou entité) défini correspondent deux échelles d'observation. Le système est défini d'abord par des paramètres de forme et de taille, puis par sa structure et son fonctionnement. L'entité organisée est un système qui ne se décompose pas en sous-systèmes semblables. Une information sera pertinente si elle fait référence à une entité bien définie. C'est le cas du périmètre ou de la parcelle. Ainsi, le suivi de la salinité à l'échelle du paysage hydro-agricole, ne peut véritablement se faire qu'en terme de bilans de sels entre entrées et sorties. A l'échelle du périmètre, le suivi peut être effectué par la surveillance de la profondeur et de la salinité de la nappe et de la salure du sol sur un nombre de sites répartis géographiquement sur l'ensemble du périmètre. Enfin et à l'échelle de la parcelle, le suivi de la salinité doit intégrer la gestion de l'eau d'irrigation, la gestion du sol, les variations de la nappe, l'efficacité du drainage et aussi la croissance et le rendement des cultures. Cette approche a été initiée dans cette étude. Elle est développée dans un guide sur le suivi de la salinité des eaux et du sol (Hachicha et Braudeau, 1997d). A l'avenir, nous tenterons de l'affiner et l'étendre à l'ensemble du système hydropédologique de la Mejerda et de l'adapter aux systèmes de la Tunisie Centrale et des oasis du Sud.

L'approche hydropédologique proposée par Mhiri et al. (1976) et l'approche que nous avons étayée dans cette étude et le guide (Hachicha et Braudeau, 1997d) se rejoignent donc au niveau de l'utilisation du bilan des eaux et des sels. Ceci a été pris en considération dans notre étude de Kalaât Landelous et même appréhendé à l'échelle de la parcelle et en fonction de l'itinéraire agronomique. Cependant, l'approche hydropédologique se situe au niveau du grand système et préconise de l'affiner en définissant mieux les entrées et les sorties à une échelle régionale sans prétendre analyser les mécanismes de fonctionnement entre opérants ni caractériser les constituants à une échelle inférieure au périmètre. De ce fait, l'objectif prioritaire de cette approche est de cerner les risques de salinisation à une échelle régionale et par conséquent, à long terme, voir ensuite, une correction de la gestion par un certain nombre de mesures préventives. Or dans l'approche de suivi de la salinité que nous proposons, l'objectif de base est une nouvelle définition de la gestion actuelle de l'eau et des sols basée sur une nouvelle conception des liens entre opérateurs et opérants de cette gestion. Elle prendra en compte, entre autres, ces risques de dégradation des sols et de salinisation à long terme. L'approche hydropédologique basée sur les entrées et sorties eau et sels serait plus facile à mettre en oeuvre. L'approche systémique serait plus utile mais elle demanderait plus d'efforts pour la mettre en place et pour la concrétiser dans la gestion durable des ressources naturelles.

En résumé, la mise en valeur des sols salés de Kalaât Landelous atteste des possibilités d'améliorer les propriétés physico-chimiques et hydrodynamiques de sols autrefois non ou peu productifs, par un aménagement de drainage techniquement assez efficient mais aussi coûteux et éventuellement par la valorisation d'eau de qualité moyenne. La désalinisation de quelques milliers d'hectares de sols est considérable et rapide. L'augmentation de leur productivité est significative. Ces performances peuvent être soutenues par des pratiques agricoles adaptées. A l'opposé des pertes de sols par salinisation qui sont en croissance dans le monde, cette mise en valeur offre un cas contraire montrant la réversibilité du processus. Ceci ne doit pas non plus atténuer la gravité du phénomène de salinisation si les mesures préventives élémentaires ne sont pas respectées.

Sur un autre plan, l'étude du périmètre de Kalaât met en évidence l'intérêt d'étudier dans l'avenir une forme d'effet d'oasis: quand un périmètre est aménagé et irrigué, et que les terres voisines ne le sont pas, quels sont les risques de « contamination » des premiers par les seconds ? Comment mieux cerner ces risques et comment les combattre ? Ceci participe de l'esprit de l'analyse systémique déjà évoquée. Les risques d'intrusion d'eau marine font partie de ces effets de bordure.

Enfin, nous revenons sur un message que nous avons souligné dans l'introduction de cette étude et qui paraît justifié au vu des résultats obtenus dans les sols de la Basse Vallée de la Mejerda soit dans ce travail ou dans ceux réalisés depuis les années soixante par le CRUESI (1970). Les sols soumis à l'irrigation ne sont pas condamnés à la « malédiction » de la salinisation. La protection de ces sols contre cette forme de dégradation, leur restauration même, sont envisageables, pour peu que l'homme sache gérer avec habileté son patrimoine.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- AGRAR, 1978.- Aménagemnt hydro-agricole de l'Oued Bou Heurthma. Etude d'avant projet.
- AGRAR, 1992.- Aménagemnt hydro-agricole de la Basse Vallée de la Medjerda. Projet d'irrigation et de drainage Galaat Andalous-Ras Djebel. Phase I. Mejerda. Rapport principal.
- AHMED Ch., 1984.- Research on some aspects of saline and alcali soils in Pakistan. 13th Congress Irrigation and Drainage. Fort Collins, VI(B), pp. 743-758.
- AL DROUBI A., 1976.- Céochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermodynamique de simulation. Application aux sols salés du Tchad. Thèse Docteur Ingénieur et Mémoire Sci. Géo. U.L.P. Strasbourg n°46, 177 pages.
- ASSELINE J., ESCADAFAL R., MTIMET A., 1989.- Infiltrmètre à aspersion - Dépouillement des données de terrain par micro-ordinateur. Sols de Tunisie n°14. pp. 133-158.
- BACH HAMBA I., 1992.- Bonification des sols. Cas du périmètre irrigué de Kalaât Landelous. Caractérisation de la salinité initiale du sol en vue de la détermination des facteurs et des zones à risque de salinisation. Mémoire du cycle de spécialisation en pédologie et mise en valeur des terres INAT, 165 pages.
- BAHRI A., 1982.- Utilisation des eaux et des sols salés dans la plaine de Kairouan (Tunisie). Thèse de Docteur Ingénieur. INP de Toulouse, 156 pages.
- BAHRI A., 1993.- Evolution de la salinité dans un périmètre irrigué de la Basse Vallée de la Medjerda en Tunisie. Science du sol, Vol. n°31, 3, pp. 125-140.
- BELKHODJA K., 1966.- Les sols des bourrelets éoliens des sebkhas de Tunisie. Conférence sur les sols méditerranéens. Madrid - 1966.
- BELKHODJA K., 1970.- Origine, évolution et caractères de la salinité dans les sols de la plaine de Kairouan (Tunisie Centrale). Contribution à l'étude de leur mise en valeur. Thèse de Docteur Ingénieur Toulouse et Bulletin de la Division des Sols n°4. 1974.
- BERNSTEIN L., FRANCOIS L.E., 1975.- Effects of frequency of sprinkling with saline waters compared with daily drip irrigation. Agron. J., 67(2), pp.185-191.
- BOIVIN P., 1990.- GEOSTAT-PC. Logiciel interactif pour calcul géostatistique. Collection LOGOS, ORSTOM, Paris, 66 pages.
- BOIVIN P., 1991.- Caractérisation physique des sols-sulfatés acides de la vallée de Katouré (Basse Casamance, Sénégal). Etude de la variabilité spatiale et relation avec les caractéristiques pédologiques. Coll. Etudes et Thèses. Edition ORSTOM, 226 pages.
- BOUAZIZ E., 1993.- Rapport sur la brulûre des cultures dans le périmètre de Kalaât Landelous. CRGR, 5 pages.
- BOUKSILA F., 1992.- Bonification des sols. Cas du périmètre irrigué de Kalaât Landelous. 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. Mémoire du cycle de spécialisation en pédologie et mise en valeur des terres INAT, 191 pages.
- BOULAIN J., 1954.- La Sebkha Ben Ziane et sa « lunette » ou bourrelet- Exemple de complexe morphologique formé par la dégradation éolienne des sols salés. Rev. Géomorphologie Dynamique, 5ème année, n°3 pp. 102-123.
- BOULET R., CHAUVEL A., HUMBEL F.X. et LUCAS Y., 1982.- Analyse structurale et cartographie en pédologie. Cah. ORSTOM, Série Pédol., Vol.XIX, n°4 pp.309-351.
- BOWER C.A., REITEMIER R.F. and FIREMAN M., 1951.- Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. Soil Sci. 73, pp. 251-261.

- BREWER R.C., 1964.- Fabric and mineral analysis of soils. Willey and Sons. London-New York, 470 pages.
- BULLOCK, FEDOROFF, JONGERIUS, STOOPS, TURSINA, BABELL, 1985.- Handbook for soil thin description. Waine Research Publications.
- BURROUGH P.A., 1983.- Multiscale sources of spatial variation in soil. The application of fractal concepts to nested levels of soil variation. *J. Soil Sc.*, V.34; pp.577-598.
- CHEVERRY C. et ROBERT M., 1993.- Salure des sols Maghrébins: Influence sur les propriétés physiques et physico-chimiques des sols-Répercussion des modifications de ces dernières sur la fertilité, notamment azotée, des sols. Rapport final du projet CEE TS2-0108-F, 41 pages.
- CLAUDE J., LOYER J.Y, FRANCILLON G., 1976.- Les alluvions déposées par l'oued Medjerda lors des crues exceptionnelles de Mars 1973. DRES/ORSTOM., 102 pages.
- COINTEPAS J.P., 1965.- Irrigation à l'eau salée et drainage en Tunisie. *Cah. ORSTOM, Série Pédol.*, III, n°4, pp. 299-304.
- COLOMBANI J., LAMAGAT J.-P., THIBEAUX J., 1972.- Mesure de la perméabilité des sols en place: un nouvel appareil pour la méthode Muntz, une extension de la méthode Porchet aux sols hétérogènes. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. IX, n°3 pp. 15-46.
- COQUE R., 1979.- Sur la place du vent dans l'érosion en milieu aride. L'exemple des lunettes (bourrelets éoliens) de la Tunisie. *Revue « Méditerranée »* n°1 et 2, pp. 15-21.
- COSTET J. et SANGLERAT G., 1976.- Plasticité et calcul des tassements. Cours pratique de mécanique des sols. Ed. Dunod Technique, pp. 26-37.
- COULOMB I, MANICHON H. et ROGER-ESTRADE J., 1990.- Evolution de l'état structural sous l'action des systèmes de culture. In *La structure du sol et son évolution*, éd. Boiffin et Marin-Lafleche INRA 53. pp. 137-156.
- CRUESI, 1970.- Recherche et formation en matière d'irrigation avec des eaux salées, 1962-1969. Rapport technique. Projet PNUD/UNESCO, 243 pages.
- DAOUD Y. and ROBERT M., 1992.- Influence of particle size and clay organization on hydraulic conductivity and moisture retention of clays from saline soils. *Applied Clay Science* n° 6, pp. 293-299, Ed. Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam.
- DAOUD Y., CHEVERRY C. et ROBERT M., 1993.- Rôle physico-chimique du magnésium dans les sols salés des plaines du Cheliff. *Science du Sol*, Vol.31, 4, pp. 281-293.
- DG/G.R., 1994.- La gestion de l'eau en Tunisie. Rapport de synthèse. Séminaire sur la gestion de l'eau dans les pays maghrébins. IDE-Banque Mondiale, Marrakech, 21-25/3/1994, 24 pages.
- DG/R.E., 1990.- Stratégie pour le développement des ressources en eau de la Tunisie au cours de la décennie 1991-2000, 30 pages.
- DIELEMAN P.J., 1970.- La salinité. Séminaire de Bagdad. *FAO-Bulletin d'Irrigation et de drainage* n°7, pp. 46-54.
- DRES, 1981.- Etude pédologique de l'extension du périmètre de Kalaât Landelous. E n°462. Division des Sols.
- DURAND J.-H., 1983.- Les sols irrigables. Etude pédologique. Edition ACCT-PUF: 143-217.
- ENNABLI N., 1995.- L'irrigation en Tunisie. INAT Département de Génie Rural, des Eaux et des Forêts. 469 pages.
- ESCADAFAL R., 1989.- Caractérisation de la surface des sols arides par observation de terrain et télédétection. Applications: exemple de la région de Tataouine (Tunisie) - Collection Etudes et thèses. Edition ORSTOM. Paris, 317 p.
- FAO, 1975.- Les besoins en eau des cultures. *Bulletion d'irrigation et de drainage* n°24, 198 pages.

FAO, 1985.- Water quality for agriculture. FAO Irrigation and drainage Paper n°29 Rev.1. 174 pages.

FIREMAN M. and WADLEIGHT H.E., 1952.- Indicator significance of some shrubs in the escalante dessert. UTAH Bot. Gaz 114. In USSL, 1954, pp. 143-155.

FLORET Ch., LE FLOC'H E., PONTANIER R., 1976.- Carte de sensibilité à la désertification. Processus de dégradation en cours des sols et de la végétation. Tunisie centrale et méridionale. Sols de Tunisie, n°8, pp. 1-69.

FLORET Ch., MTIMET A., PONTANIER R., 1989.- Caractérisation écologique des régimes hydriques et de l'érodibilité des sols en zone aride. Sols de Tunisie n°14. pp. 63-109.

FRANCOIS L.E., 1981.- Alfalfa management under saline condition with zero leaching. Agro.J., 73, pp. 1042-1046.

FREEZE R.A., 1975.- A stochastic-conceptual analysis of one dimensional ground water flow in non uniform homogeneous media. Water Resour. Res., n°11, pp. 725-741.

GALLALI T., 1980.- Transfert sels-matière organique en zone arides méditerranéennes. Thèse de Doctorat d'Etat, Univ. Nancy I, 202 pages.

GARDNER W.R., 1958.- Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. Soil Sc., 85 pp. 228-232.

GARRELS R.M. et CHRIST C.L., 1967.- Equilibre des minéraux et de leurs solutions aqueuses. Ed. Gauthier-Villiers, Paris, 335 pages.

GASCUEL-ODOUX Ch., 1984.- Application de la géostatistique à l'étude de la variabilité spatiale des propriétés hydriques du sol. Thèse de Docteur Ingénieur. ENMP et UPMC. Paris VI, 235 pages.

GASCUEL-ODOUX Ch., BOIVIN P. et WALTER Ch., 1995.- Eléments de géostatistique. In Modélisation mathématique des processus pédologiques. Coll. Manuels scientifiques et techniques. Actes éditions. Maroc. pp.217-245.

GHARBI A., 1975.- Etude pédologique de la Basse Vallée de la Medjerda-Région Sidi Thabet-Mabtouha. Mém. Fin d'Etude de 3ème cycle INAT.

GREEN W.-H., AMPT G.-A., 1911.- Studies on soil physics -1- The flow of air and water through soils. J. Agric. Sci., 26: 124-129.

GREENE-KELLY R., 1974.- Shrinkage of clay soils: a statistical correlation with others soil properties. Geoderma n°11, pp. 243-257.

GROSMAN A., 1968.- Linear extensibility as calculated from natural clod bulk density measurements. Soil Sci. Am. Proc. n°32, pp. 570-573.

HABIB P., 1973.- Précis de géotechnique. Ed. Dunod, pp. 4-9.

HACHICHA M., 1985.- Sur l'évolution des sols d'une lunette argileuse de la Basse Vallée de la Mejerdah. Mémoire 3ème cycle INAT « Pédologie et Fertilisation », 87 pages.

HACHICHA M., STOOPS G. et MHIRI A., 1987.- Aspects micromorphologiques de l'évolution des sols de lunettes argileuses en Tunisie. in Micromorphologie des Sols, Actes de la réunion internationale de micromorphologie, Paris juillet 1985, publication AFES, pp. 193-197.

HACHICHA M., 1990.- L'efficacité des pluies torrentielles dans le lessivage des sels. Séminaire ATRID-AGT "Erosion, sol, eau" INAT, 14/11/1990, 15 pages.

HACHICHA M. et BEN HASSINE H., 1992a.- Irrigation et salure dans le périmètre irrigué de Zelba. Direction des Sols E.S 263, 25 pages.

- HACHICHA M., DJELIDI B., TRABELSI A. et BRARI N. 1992b.- Impact du drainage sur les variations saisonnières de la salinité dans le périmètre irrigué de Cebalat Borj-Touil irrigué aux eaux usées épurées. Direction des Sols/CRDA Ariana E.S 264, 19 pages.
- HACHICHA M. et JOB J.O., 1994a.- Suivi de la salure des périmètres irrigués de Tunisie par conductivimétrie électromagnétique. Rapport Final Direction des Sols/ORSTOM. 87 pages.
- HACHICHA M., JOB J.O. et MTIMET A., 1994b.- Les sols salés et la salinisation des sols en Tunisie. Bulletin de la Direction des Sols "Sols de Tunisie" n°15, pp. 270-341.
- HACHICHA M. et TRABELSI A., 1995a.- Le bilan annuel des sels: un outil pour la surveillance de la salinisation dans le périmètre de Kalaât Landelous. Direction des Sols E.S n°279, 8 pages.
- HACHICHA M., TRABELSI A., BRARI N. et DJELIDI B., 1995b.- Impact du drainage et de l'irrigation sur la variabilité spatio-temporelle des caractéristiques de la nappe et de la salure des sols dans le périmètre irrigué de Kalaât Landelous. Direction des Sols/CRDA Ariana E.S 283, 54 pages.
- HACHICHA M., ZIDI Ch. et BRAHAM O., 1995c.- Etude des sols salés de Garaât Oued Melah - Monastir. Organisation et comportement hydrodynamique des sols et régime de la nappe. Direction des Sols Etude E n° 636, 21 pages + cartes.
- HACHICHA M. et Mme GHARBI N., 1996a.- Guide Technique " Contrôle piézométrique des nappes superficielles dans les périmètres irrigués. Direction des Sols/Direction Générale du Génie Rural, 30 pages.
- HACHICHA M., JELASSI K., KHELIF Y. et HAJJAJ S., 1996b.- Organisation des sols et risque de salinisation dans le périmètre d'El Houareb (Plaine de Merguellil - Kairouanais). Direction des Sols/CRDA Kairouan, ES n°294, 23 pages.
- HACHICHA M., BOUKSILA F., ZAYANI K. et MHIRI A., 1996c.- Etude comparative de la perméabilité mesurée par les méthodes Reynolds, Porchet et Müntz dans le cas de sols argileux affectés par la salinité. Revue Sécheresse Vol.7, n°3, pp. 209-215.
- HACHICHA M., PONTANIER R., DRIRDI B., 1996d.- Comportement de sols argileux irrigués sous pluies simulées. Rôles des organisations superficielles pour le lessivage des sels et leur érodibilité dans le choix du mode d'irrigation. Direction des Sols/ORSTOM ES 288, 22 pages.
- HACHICHA M., MHIRI A., BOUKSILA F. et BACH HAMBIA I., 1997a.- Variabilité des propriétés de sols argileux salés et risques de salinisation du périmètre de Kalaât Landelous (Tunisie). Revue de l'Association Française pour l'Etude du Sols (AFES) "Etude et Gestion des Sols", n° 3 et 4 pp. 225-235.
- HACHICHA M., TRABELSI A., BRARI N. et DJELIDI B., 1997b.- Evolution de la salinité et bilan des sels dans le P.P.I. de Kalaât Landelous au cours des années 1995-1996. Direction des Sols/CRDA Ariana E.S en cours, 17 pages.
- HACHICHA M. et BRAUDEAU E., 1997c.- Guide du suivi de la salinité des eaux et du sol. Projet d'Irrigation de la Basse Vallée de la Medjerda et de Ras Djebel, CRDA de Bizerte et de l'Ariana- AHT International GmbH, 145 pages.
- HALLEBERG G., 1977.- The use of COLE values for soil engineering evaluation. Soil Sci. Soc. Am. Jour. Vol.41, pp. 541-544.
- HAMDANE A. et MAMI A., 1976.- Contrôle des périmètres irrigués-Etude du drainage de la salure et de l'alcalinité dans les périmètres irrigués de la Basse Vallée de la Mejerda. DRES, ES n°128, 30 pages.
- HASSAINYA J., 1991.- Irrigation et développement agricole: L'expérience tunisienne. Edition CIHEAM-INAT, Options méditerranéennes, Série B: Etudes et Recherches, n°3, 217 pages.
- HENIN S., GRAS R., MONNIER G., 1969.- Le Profil cultural. L'état physique du sol et ses conséquences agronomiques. Edition Masson et Cie, 332 pages.
- HILLEL D., 1964.- Infiltration and rainfall-runoff as affected by surface crusts. In: Proc. of the VIIth Congr.Intern. Soil Sci. Bucarest, I (7): 53-61.

- HILLEL D., GARDNER W.-R., 1969.- Steady infiltration into crust topped profiles. *Soil Sc.*, 108: 137-142.
- HILLEL D., 1988.- L'eau et le sol: principes et processus physiques. Ed. Academia. Louvain-La-Neuve Belgique, 294 p.
- IBN AL AWAM A.Z.Y.I.M., 1977.- Le livre de l'Agriculture. Tome 1, 2ème édition, Ed. Bouslama-Tunis, 657 pages.
- ILRI, 1974.- Drainage principes and applications. Publication No.16.
- ITC Ghent-INAT, 1997.- New waves in soil science - Training Course for Post-Graduate Soil Scientists - University of Ghent (Belgium). Tunis, 10-19/1/1997; Exursion guide, pp. 55-72.
- JAUZEIN A., 1967.- Contribution à l'étude géologique des confins de la Dorsale Tunisienne. Thèse d'Etat Paris (1962) et An. Mines et Géol. Tunis n°22, 475 pages.
- JAUZEIN A., 1971.- Evolution du delta de la Mejerda. Travaux du Laboratoire de géologie. Cours et documentations ORSTOM.
- JOB J.-O., 1992.- Les sols salés de l'oasis d'El Guettar. Thèse Doc., Univ., Montpellier II, 150 pages.
- JOB J.O., TABBAGH A. et HACHICHA M., 1995.- Détermination par méthode électromagnétique de la concentration en sel d'un sol irrigué. *Canadian Journal of Soil Science*, pp. 463-469.
- KOVDA V.A. and SZABOLCS I., 1979.- Modelling of soil salinization and alkalization - *Agrokemia- es Talajtan* n°28 supp., 208 pages, Budapest.
- LAFFORGUE A., NAAHE., 1976.- Exemple d'analyse expérimentale des facteurs de ruissellement sous pluies simulées. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, 13 (3): 115-237.
- LE BISSONNAIS Y., BRUAND A. et JAMAGNE M., 1990.- Etude expérimentale sous pluie simulée de la formation des croûtes superficielles. Apport à la notion d'érodibilité des sols. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XXV, n°4 pp. 31-40.
- LOVEDAY J., 1984.- Amendeemnts for reclaiming sodics soils. In *Soil Salinity Under Irrigation. Processes and management*, pp. 220-237.
- MALLOUHI N., 1982.- Contribution à l'étude de l'influence de la salinité sur l'évolution de la matière organique. Thèse de Doctorat d'Etat. INP de Lorraine.
- MANUKYAN R.R., 1976.- Improvement of a sodic solonchak-solonetz on the ararat plain with mineral acid and plain with mineral acid and copperas (based on laboratory experiments). *Sov.Sc.Sc.* 8, pp. 202-212.
- MATHIEU C. et RUELLAN A., 1987.- Evolution morphologique des sols irrigués en région méditerranéenne semi-aride: l'exemple de la Basse-Moulouya (Maroc). *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XXIII, n°25 .
- MASSOUMI A.M., 1968.- Etude expérimentale sur le mécanisme du mouvement capillaire de l'eau et des sels solubles dans le sol. Influence des rapports cationiques des solutions et de la texture sur le processus d'alcalisation. Thèse de Doc. Ing., Univ. Paris.
- MARTINI P., DEROUICH Ch., PONTANIER R., 1991.- Gestion et exploitation des données de simulation des pluies en Tunisie - Le programme DSSIMUL. *Direction des Sols*, ES 260, 17 pages.
- McINTYRE D.-S., LOVEDAY J. and WATSON C.L., 1982.- Field studie of water and salt movement in an irrigated swelling clay soil soil. *Aust.J.Soil Res.* 20, pp 81-105.
- MERMOUD A. et MOREL-SEYTOUX H.-J., 1989.- Modélisation et observation du flux hydrique vers la surface du sol depuis une nappe peu profonde. *Cah. ORSTOM Hydrol. continent.* vol.4, n°1: 11-23.
- MERMOUD A. et MUSY A., 1991.- Salinisation du sol depuis une nappe peu profonde: simulation de l'effet d'un abaissement de la nappe sue les remontées d'eau vers la surface. 42th Int. Executive Concil Meeting of ICID, Beijing - China, 14-21/4/199, pp. 1-9.

- MORI A., 1968.- Etude pédologique de l'U.R.D. d'Utique. DRES.
- MHIRI A., 1977.- Sur la sulfato-réduction rhizosphérique dans un sol salin. Causes de l'engorgement du sol de Nakta. Ann. INRAT, Vol.50, Fasc.2.
- MHIRI A., 1978.- Recherches sur la sulfato-réduction rhizosphérique dans un sol salé. Thèse Doct. d'Etat, Univ. Paris VII, 190 pages.
- MHIRI A., 1981.- Effet de l'irrigation sur la stabilité structurale des sols de texture fine. Premier congrès national des sciences de la terre. Tunis, 1981. pp.295-301.
- MHIRI A., TARHOUNI J., HACHICHA M et LEBDI F., 1996.- Etude des risques de salinisation des sols à long terme par endoréisation anthropique - Pour une approche systémique. Actes du séminaire du 20ème anniversaire de l'IRA de Medenine, Jerba 4 et 5/12/1996, 15 pages.
- MISSAOUI A., 1993.- Evaluation des bilans hydrique et salin et caractérisation des eaux de drainage dans le périmètre de Kalaât Landelous. Mémoire de fin d'études d'ingénieur. ESIER Mejez El Bab, 69 pages.
- MONNIER G., STENGEL P., 1982.- Structure et état physique du sol. Encyclopédie des Techniques Agricoles, Fasc.1140 et 1141, Editions Techniques, Paris.
- MORI A., 1968.- Etude pédologique de l'U.R.D. d'Utique. DRES.
- MTIMET A. et HACHICHA M., 1995.- Salinisation et hydromorphie dans les oasis tunisiennes. Revue Sécheresse, Vol. 6, n°4, pp. 319-324.
- NEJI A., 1994.- Communication orale - INRAT.
- NOVIKOFF G., 1961.- Contribution à l'étude des relations entre le sol et la végétation halophile en Tunisie. Annales INRAT, Vol. 34, 339 pages.
- OLLAT Ch., BECVAROVA H., CHAARI H., COMBREMONT R., VAN HOORN J.W. et SAID M., 1969.- Salure et alcalinisation d'un sol salé et calcaire irrigué avec les eaux saumâtres.
- PERTHUISOT J.P., FLORIDIA S., et A.JAUZEIN, 1972.- Un modèle récent de bassin côtier à sédimentation saline: La Sebkhah El Melah (Zarzis, Tunisie). Revue de Géographie physique et de Géologie dynamique (2), Vol.XIV, fasc.1, pp. 67-64.
- PERTHUISOT J.P. et JAUZEIN A., 1975.- Sebkhahs et dunes d'argile: l'enclave endoréique du Pont du Fahs, Tunisie. Revue de Géographie physique et de Géologie dynamique (2), Vol.XVII, fasc.3, pp. 295-306.
- POSS R., PLEUVRET C. et SARAGONI, 1991.- Influence des réorganisations superficielles sur l'infiltration dans les terres de Barre (Togo méridional). Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XXV, n°4, 1989-90: 405-415.
- RHOADES J.D., 1968.- Leaching requirement for exchangeable sodium control. Soil Sci.Soc.Amer.Proc. n°32, pp. 652-656.
- RIOU Ch., 1966.- Quelques relations entre pluie, ruissellement et infiltration obtenues en laboratoire sur des sols initialement secs. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., 5, pp.31-42.
- RODIER A., J.COLOMBANI, J.CLAUDE et R.KALLEL, 1981.- Monographies hydrologiques ORSTOM N°6. Le bassin de la Mejerdah.
- ROOSE E., SARRAILH J.-M., 1990.- Erodibilité de quelques sols tropicaux. Vingt années de mesure en parcelle d'érosion sous pluies naturelles. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XXV, n°1-2, 1989-90: 7-30.
- SASSI S., 1969.- Contribution à l'étude de la Sebkhah Tegdimane et du Chott El Guettar. Thèse Doct. 3ème cycle Paris (1962) et Notes du Service Géologique n°24, Tunis.
- SCHAFER W.M. and SINGER M.J., 1976.- A new method of measuring shrink-swell potential using soil pastes. Soil Sci. Am. Jour. Vol. n°40, pp. 805-806.

SCET Tunisie, 1981.- Plan directeur des eaux du Nord, 2ème tranche. Périmètre de la Basse Vallée de la Mejerda.

SERAH., 1994.- Etude d'avant projet détaillé des aménagements hydrauliques de Sebket El Kelbia. 125 pages.

SERVANT J., 1975.- Contribution à l'étude pédologique des terrains halomorphes. L'exemple des sols salés du Sud et du Sud-Ouest de la France. Thèse Doc. Es Sciences Naturelles, ENSA Montpellier.

SHAINBERG I., RHOADES J.D. and PRATHER R.J., 1981.- The effect of low electrolyte concentration on clay dispersion and hydraulic conductivity of a sodic soil. In soil salinity under irrigation. Processes and management. pp.49-64.

SOCADENORD, 1996.- Bilan des sels dans le périmètre de Kalaât Landelous. 7 pages.

SOIL CONSERVATION SERVICE, USDA, 1975.- Soil taxonomy - A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys, pp. 48-75 and 376.

SOMANI L.L., 1981.- Reclamation of a saline-alkali soil using organic materials and inorganic amendements. Soil Sc.Soc.Am.J. 45, pp.103-107.

STENGEL P., 1979.- Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in situ. Annales Agronomiques 30(1), pp. 27-49.

SUMNER M.E., 1993.- Sodic soils: new perspectives. Aust.J.Soil Res. 31 pp. 683-750.

SZABOLCS , 1979.- Review of research on salt-affected soils. Unesco, natural resources research XV., 137 pages.

TARDIEU F., 1987.- Etat structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs. III-Disponibilité des réserves en eau du sol. Agronomie 7(4), pp. 279-288.

TARDY Y. et GAC J.Y., 1979.- Contrôle de la composition chimique des solutions par la précipitation des minéraux dans les sols. Ebauche d'un modèle thermodynamique pour la formation des argiles. Bull. AFES, n°2-3, pp. 106-123.

USSL Staff, 1954.- Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Agriculture Handbook N°60, USDA, 160 pages.

VALENTIN C., 1985.- Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région subdésertique (Agadez Niger). Dynamique de formation et conséquences sur l'économie en eau. Edit. ORSTOM, Coll. Etudes et Thèses, Paris. 253 p.

VALENTIN C. et RUIZ FIGUEROA J., 1987.- Effects of kinetic energy and water application rate on the development of crusts in a fine sandy loam soil using sprinkling irrigation and rainfall simulation. In Micromorphologie des sols/Soil Micromorphology. Edit. AFES (Plaisir, France): 401-408.

VANDENBERG, 1964.- Water and salt balances. In working document. FAO/UNESCO.

VAUCLIN M., 1982.- Méthodes d'étude de la variabilité spatiale des propriétés d'un sol. Colloques INRA, n°15, pp.9-43.

VOLTZ M., 1986.- Variabilité spatiale des propriétés physiques du sol en milieu alluvial. Thèse de Docteur Ingénieur. ENSA Montpellier, 198 pages.

WALTER Ch., 1990.- Estimation de propriétés du sol et quantification de leur variabilité à moyenne échelle: cartographie pédologique et géostatistique dans le sud de l'Ille et Vilaine (France). ENSA Rennes. Thèse de doctorat de l'université de Paris VI, 172 pages.

ANNEXES

ANNEXE 1. DESCRIPTIONS DES PROFILS PEDOLOGIQUES DE LA LUNETTE DE PROTVILLE

Profil P.1

Date de description: 2/12/1983 - Position dans le paysage: en bas du versant dirigé vers la Sebkha.

Occupation du sol: parcours -

Coordonnées Lambert (Feuille Ariana, 50.000ème): X=507,2, Y=407,9 et Z=10,5 m

0-30 cm: horizon humide, peu cohérent, vides nombreux. Texture: limon argileux fin. Fentes de 30 mm écartées de 1 m environ, débutant dans l'horizon. Racines: 25 à 75/dm² pénétrant les agrégats, verticales et horizontales, généralisées. Activité biologique très nombreuse: coquilles et vers de terre. Forte effervescence généralisée avec l'acide. Eléments figurés: pseudomycelium calcaire de couleur blanchâtre, localisé et vertical. Structure grumeleuse peu nette à polyédrique. Couleur du fond (humide et à l'ombre): 2,5Y5/4.

30-100 cm: horizon frais, cohérent, vides nombreux. Texture: argile limoneuse. Fentes de 40 mm écartées de 1 m environ, traversant l'horizon. Racines: 16 à 25/dm², entre les agrégats, verticales, localisées. Activité biologique nombreuse: débris de coquilles et chenaux. Forte effervescence généralisée avec l'acide. Eléments figurés: pseudomycelium calcaire de couleur blanchâtre, localisé et vertical; amas beiges calcaires, 5%, de 1 cm de diamètre environ. Structure prismatique nette. Couleur du fond (humide et à l'ombre): 2,5Y5/4.

100-150 cm: horizon sec, vides peu nombreux. Texture: argileuse. Fentes de 20 mm écartées de 1 m environ, traversant l'horizon. Activité biologique peu nombreuse: débris de coquilles et chenaux. Forte effervescence généralisée avec l'acide. Eléments figurés: nodules calcaires, 10%, de 1 cm de diamètre environ. Structure prismatique très nette, faces de glissement peu luisantes. Couleur du fond (humide et à l'ombre): 2,5Y5/4.

150-250 cm: horizon sec, vides peu nombreux. Texture: argileuse. Fentes de 15 mm écartées de 1 m environ, se terminant dans l'horizon. Activité biologique peu nombreuse: débris de coquilles. Forte effervescence généralisée avec l'acide. Eléments figurés: nodules calcaires, 1%, de 1 cm de diamètre environ, alignés verticalement. Structure prismatique très nette, faces de glissement luisantes. Couleur du fond (humide et à l'ombre): 2,5Y5/6.

250-300 cm: horizon frais, vides peu nombreux. Texture: argileuse. Activité biologique peu nombreuse: débris de coquilles. Forte effervescence généralisée avec l'acide. Eléments figurés: nodules calcaires, 10%, de 1 cm de diamètre environ, généralisés. Structure prismatique très nette. Couleur du fond (humide et à l'ombre): 2,5Y5/6.

300-350 cm: horizon humide, vides peu nombreux. Texture: argileuse. Activité biologique peu nombreuse: débris de coquilles. Forte effervescence généralisée avec l'acide. Eléments figurés: nodules calcaires, 5%, de 1 cm de diamètre environ, généralisés. Structure prismatique très nette, faces de glissement très luisantes. Couleur du fond (humide et à l'ombre): 2,5Y5/6.

Profil P.2

Date de description: 2/12/1983 - Position dans le paysage: au milieu du versant dirigé vers la Sebkha.

Occupation du sol: parcours -

Coordonnées Lambert (Feuille Ariana, 50.000ème): X=507,1, Y=407,8 et Z=23 m

0-15 cm: horizon humide, peu cohérent, vides nombreux. Texture: limon argileux fin. Fentes de 60 mm écartées de 90 cm environ, débutant dans l'horizon. Racines: 16 à 25/dm², inter et intra agrégats, verticales, généralisées. Activité biologique nombreuse: coquilles, vers de terre et chenaux. Forte effervescence généralisée avec l'acide. Eléments figurés: pseudomycelium calcaire de couleur blanchâtre, localisé et vertical. Structure polyédrique peu nette. Couleur du fond (humide et à l'ombre): 2,5Y5/4.

15-50 cm: horizon frais, cohérent, vides nombreux. Texture: argile. Fentes de 65 mm écartées de 90 cm environ, traversant l'horizon. Racines: 1 à 15/dm², entre les agrégats, verticales, localisées. Activité

biologique nombreuse: débris de coquilles et chenaux. Forte effervescence généralisée avec l'acide. Structure polyédrique nette. Couleur du fond (humide et à l'ombre): 2,5Y5/4.

50-115 cm: horizon sec, vides peu nombreux. Texture: argileuse. Fentes de 30 mm écartées de 75 cm environ, traversant l'horizon. Activité biologique nombreuse: débris de coquilles et chenaux. Forte effervescence généralisée avec l'acide. Eléments figurés: nodules calcaires, 1%, de 1 cm de diamètre environ et des amas calcaires, 5%, sans distribution particulière. Structure prismatique très nette, faces de glissement peu luisantes. Couleur du fond (humide et à l'ombre): 2,5Y5/4.

115-350 cm: horizon sec mais plus frais que le précédent, cohérent, vides peu nombreux. Texture: argileuse. Fentes de 10 mm écartées de 70 cm environ, se terminant dans l'horizon (vers 2 m). Activité biologique très nombreuse: débris de coquilles. Forte effervescence généralisée avec l'acide. Eléments figurés: microrosette de gypse vers 2,8 m, localisées, 2 mm de taille. Structure massive (pseudosable). Couleur du fond (humide et à l'ombre): 2,5Y5/6.

Profil P.3

Date de description: 2/12/1983 - Position dans le paysage: sommet de la colline.

Occupation du sol: céréales -

Coordonnées Lambert (Feuille Ariana, 50.000ème): X=507,1, Y=407,75 et Z=27 m

0-25 cm: horizon humide, peu cohérent, vides nombreux. Texture: limon argileux fin. Fentes de 60 mm écartées de 90 cm environ, débutant dans l'horizon. Racines: 16 à 25/dm², inter et intra agrégats, verticales, généralisées. Activité biologique nombreuse: coquilles, vers de terre et chenaux. Forte effervescence généralisée avec l'acide. Eléments figurés: pseudomycelium calcaire de couleur blanchâtre, localisé et vertical. Structure polyédrique peu nette. Couleur du fond (humide et à l'ombre): 2,5Y5/4.

25-60 cm: horizon frais, cohérent, vides nombreux. Texture: argileuse. Fentes de 65 mm écartées de 90 cm environ, traversant l'horizon. Racines: 1 à 15/dm², entre les agrégats, verticales, localisées. Activité biologique nombreuse: débris de coquilles et chenaux. Forte effervescence généralisée avec l'acide. Structure polyédrique nette. Couleur du fond (humide et à l'ombre): 2,5Y5/4.

60-130 cm: horizon sec, vides peu nombreux. Texture: argileuse. Fentes de 30 mm écartées de 75 cm environ, traversant l'horizon. Activité biologique nombreuse: débris de coquilles et chenaux. Forte effervescence généralisée avec l'acide. Eléments figurés: nodules calcaires, 1%, de 1 cm de diamètre environ et des amas calcaires, 5%, sans distribution particulière. Structure prismatique très nette, faces de glissement peu luisantes. Couleur du fond (humide et à l'ombre): 2,5Y5/4.

130-450 cm: horizon sec mais plus frais que le précédent, cohérent, vides peu nombreux. Texture: argileuse. Fentes de 10 mm écartées de 70 cm environ, se terminant dans l'horizon (vers 2 m). Activité biologique très nombreuse: débris de coquilles. Forte effervescence généralisée avec l'acide. Eléments figurés: microrosette de gypse vers 2,8 m, localisées, 2 mm de taille. Structure massive (pseudosable). Couleur du fond (humide et à l'ombre): 2,5Y5/6.

Profil P.4

Date de description: 3/12/1983 - Position dans le paysage: milieu du versant dirigé vers la plaine.

Occupation du sol: céréales -

Coordonnées Lambert (Feuille Ariana, 50.000ème): X=507,1, Y=407,6 et Z=21 m

0-30 cm: horizon humide, peu cohérent, vides nombreux. Texture: argileuse. Fentes de 20 mm écartées de 1 m environ, débutant dans l'horizon. Racines: 25 à 75/dm², inter et intra agrégats, verticales, généralisées. Activité biologique nombreuse: coquilles, vers de terre et chenaux. Forte effervescence généralisée avec l'acide. Structure polyédrique peu nette. Couleur du fond (humide et à l'ombre): 2,5Y4/3.

30-150 cm: horizon sec, vides peu nombreux. Texture: argileuse. Fentes de 30 mm écartées de 1 m environ, traversant l'horizon. Activité biologique nombreuse: débris de coquilles et chenaux. Forte effervescence généralisée avec l'acide. Eléments figurés: nodules calcaires, 1%, de 1 cm de diamètre environ et des amas calcaires, 5%, sans distribution particulière. Structure prismatique très nette, faces de glissement peu luisantes. Couleur du fond (humide et à l'ombre): 2,5Y4/3.

150-350 cm: horizon sec mais plus frais que le précédent, cohérent, vides très nombreux. Texture: argileuse. Fentes de 10 mm écartées de 1 m environ, se terminant dans l'horizon (vers 2 m). Activité

biologique très nombreuse: débris de coquilles. Forte effervescence généralisée avec l'acide. Structure prismatique peu nette. Couleur du fond (humide et à l'ombre): 2,5Y5/6.

Profil P.5

Date de description: 3/12/1983 - Position dans le paysage: bas du versant dirigé vers la plaine.

Occupation du sol: céréales -

Coordonnées Lambert (Feuille Ariana, 50.000ème): X=507,1, Y=407,55 et Z=9 m

0-35 cm: horizon humide, peu cohérent, vides nombreux. Texture: argilo-limoneuse. Fentes de 20 mm écartées de 1 m environ, débutant dans l'horizon. Racines: 25 à 75/dm², inter et intra agrégats, verticales, généralisées. Activité biologique nombreuse: coquilles, vers de terre et chenaux. Forte effervescence généralisée avec l'acide. Structure polyédrique peu nette. Couleur du fond (humide et à l'ombre): 2,5Y4/3.

30-200 cm: horizon sec, vides peu nombreux. Texture: argilo-limoneuse. Fentes de 30 mm écartées de 1 m environ, traversant l'horizon. Activité biologique nombreuse: débris de coquilles et chenaux. Forte effervescence généralisée avec l'acide. Eléments figurés: nodules calcaires, 1%, de 1 cm de diamètre environ et des amas calcaires, 5%, sans distribution particulière. Structure prismatique très nette, faces de glissement peu luisantes. Couleur du fond (humide et à l'ombre): 2,5Y4/3.

200-300 cm: horizon frais, vides nombreux. Texture: argileuse. Fentes de 10 mm écartées de 1 m environ se terminant dans l'horizon (vers 2 m). Activité biologique peu nombreuse: débris de coquilles. Forte effervescence généralisée avec l'acide. Structure prismatique très nette, faces de glissement luisantes. Couleur du fond (humide et à l'ombre): 2,5Y5/6.

Profil P.6

Date de description: 4/12/1983 - Position dans le paysage: dans la plaine, à 300 m de la colline.

Occupation du sol: céréales - Nappe à 145 cm.

Coordonnées Lambert (Feuille Ariana, 50.000ème): X=507,1, Y=407,55 et Z=9 m

0-45 cm: horizon humide, peu cohérent, vides très nombreux. Texture: argilo-limoneuse. Racines: 25 à 75/dm², inter et intra agrégats, verticales, généralisées. Activité biologique nombreuse: coquilles, vers de terre et chenaux. Forte effervescence généralisée avec l'acide. Structure grumeleuse à polyédrique peu nette. Couleur du fond (humide et à l'ombre): 10YR4/4.

45-85 cm: idem, sauf une texture argileuse et structure polyédrique nette.

85-90 cm: idem, sauf un niveau de nodules calcaires blanchâtres, de 5 mm de diamètre.

90-145 cm: idem qu'entre 45 et 85 cm, sauf une texture argilo-limoneuse et une structure prismatique nette avec des faces de glissements.

ANNEXE 2a. ANALYSES PHYSIQUES DES PROFILS

PEDOLOGIQUES DE LA LUNETTE DE PROTVILLE

Du versant dirigé vers la Sebkha (P1, P2, P3).

Profil	Horizon (cm)	Granulométrie (%)					Calcaire (%)		D.a.	M.O. %	Gypse %
		A	Lf	Lg	Sf	Sg	Total	Actif			
P1	0-20	37	36	9	12	3	37	11	1,79	1,3	T
	20-40	41	39	7	12	3	37	10	1,90	1,2	T
	40-60	52	29	5	11	3	38	11	2,06	0,6	T
	60-80	49	28	7	11	4	38	11	2,01	0,5	T
	80-100	49	27	9	11	3	38	10	1,94	0,5	T
	100-150	55	26	6	10	4	38	11	1,94	0,3	T
	150-200	59	26	5	8	4	38	10	1,96	0,1	T
	200-250	57	26	5	9	3	36	10	1,96	0,1	T
	250-300	54	27	5	10	2	38	11	2,05	0	T
	300-350	65	26	6	12	1	36	10	2,00	0	T
P2	0-20	38	39	8	11	3	34	10		1,0	T
	20-40	45	35	6	10	3	35	10		0,6	T
	40-60	50	36	2	10	2	36	9		0,5	T
	60-80	59	30	3	8	2	34	10		0,5	T
	80-100	63	28	2	7	1	34	10		0,3	T
	100-150	63	30	1	6	1	34	9		0,3	T
	150-200	62	31	2	5	1	34	9		0,3	T
	200-250	63	27	2	7	1	33	9		0,3	T
	250-300	58	29	3	8	3	34	10		0,3	T
	300-350	54	30	4	10	2	34	10		0,3	T
P3	0-20	39	43	4	12	3	34	9	2,00	1,2	T
	20-40	47	33	6	11	3	32	9	2,05	1,1	T
	40-60	49	35	3	10	3	35	9	1,96	0,9	T
	60-80	60	29	2	8	1	35	10	2,18	0,8	1,4
	80-100	59	29	3	9	1	33	10	1,97	0,5	1,7
	100-150	57	28	4	10	1	33	10	1,91	0,3	1,0
	150-200	56	27	4	11	2	33	10	1,71	0,4	0,9
	200-250	54	29	4	12	2	33	10	1,70	0,3	T
	250-300	58	29	5	6	3	32	10	1,70	0,3	T
	300-350	59	27	4	8	3	33	10	1,73	0,1	T
	350-400	60	27	4	7	2	33	10	1,84	0,1	T
	400-450	56	29	6	7	2	33	10	1,86	0,1	T

Granulométrie sur sol décalcifié.

D.a. densité apparente sur cylindre.

M.O. matière organique=C*1,75.

ANNEXE 2b. ANALYSES PHYSIQUES DES PROFILS

PEDOLOGIQUES DE LA LUNETTE DE PROTVILLE

du versant dirigé vers la plaine (P4 et P5) et dans la plaine (P6).

Profil	Horizon (cm)	Granulométrie (%)					Calcaire (%)		D.a.	M.O. %	Gypse %
		A	Lf	Lg	Sf	Sg	Total	Actif			
P4	0-20	42	33	7	13	3	33	10		1,2	0,3
	20-40	52	25	7	12	3	34	9		0,9	
	40-60	56	23	7	11	3	35	9		0,7	
	60-80	55	25	7	10	3	34	9		0,9	
	80-100	58	26	5	9	3	34	9		0,5	
	100-150	61	27	4	7	3	33	10		0,4	
	150-200	61	28	3	6	2	33	10		0,2	
	200-250	59	26	4	8	3	33	10		0,2	
	250-300	53	28	5	10	3	34	10		0,1	
	300-350	60	27	4	7	2	33	10		0,1	
P5	0-20	42	35	8	13	4	33	9		1,1	0,6
	20-40	42	35	7	13	4	33	9		0,9	
	40-60	46	32	8	12	3	33	10		0,9	
	60-80	50	30	6	11	3	34	10		0,8	
	80-100	50	29	8	11	3	34	10		0,7	
	100-150	55	24	8	11	2	34	10		0,6	
	150-200	47	28	10	11	3	34	10		0,5	
	200-250	54	22	12	8	2	33	11		0,5	
	250-300	57	22	10	9	2	34	10		0,3	
P6	0-20	44	45	7	1	1	35	10	1,84	1,5	
	20-40	46	42	10	2	0	38	10	1,81	1,3	
	40-60	42	31	23	2	0	34	9	1,86	1,0	
	60-80	62	34	7	1	0	33	10	1,84	0,9	
	80-100	56	36	5	1	0	30	10	1,76	1,0	
	100-150	57	35	7	1	0	30	11	1,83	0,8	

ANNEXE 3a. ANALYSES CHIMIQUES DES PROFILS

PEDOLOGIQUES DE LA LUNETTE DE PROTVILLE

Du versant dirigé vers la Sebkha (P1, P2, P3).

Profil	Horizon (cm)	pH	CEe dS/m	SAR	Na/T	Anions (még/l)				Cations (még/l)			
						CO ₃ ⁻	HCO ₃ ²⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺
P1	0-20	8,2	0,5	1,0	6	0,5	6,5	0,4	0,6	1,8	2,8	3,2	0,1
	20-40	8,3	0,4	1,4	7	1,0	4,0	0,2	0,6	2,0	2,5	1,6	0,1
	40-60	8,5	0,6	1,9	5	1,0	4,5	1,4	1,2	3,1	2,9	2,1	0,1
	60-80	8,5	0,6	1,8	9	1,0	5,0	1,2	0,8	2,8	3,2	1,9	0,1
	80-100	8,6	0,7	2,1	8	1,5	5,0	0,9	2,4	3,3	2,7	2,4	0,1
	100-150	8,6	0,9	4,5	13	1,5	4,0	1,6	2,6	6,0	2,1	1,5	0,1
	150-200	8,7	1,2	5,3	15	2,0	4,0	2,7	3,9	8,1	2,3	2,3	0,1
	200-250	8,8	1,4	6,6	15	2,0	5,0	3,9	3,5	10,0	2,8	1,8	0,1
	250-300	8,5	1,5	7,9	22	1,0	4,5	4,9	3,6	10,5	2,4	1,2	0,1
	300-350	8,6	1,6	7,9		2,0	4,0	6,3	4,1	12,0	2,5	2,5	0,1
P2	0-20	8,0	0,7	1,4	6	0	5,5	1,6	2,2	2,4	4,3	1,3	0,2
	20-40	8,1	0,8	2,2	5	0	6,0	1,1	1,8	3,6	3,4	2,2	0,3
	40-60	8,5	0,8	3,4	17	1,0	6,0	1,0	1,2	4,8	2,5	1,6	0,1
	60-80	8,7	0,9	5,7		2,0	6,0	1,3	1,4	7,0	2,2	0,8	0,1
	80-100	8,7	1,5	9,7		1,5	4,0	3,3	6,9	11,9	2,4	0,5	0,1
	100-150	8,6	3,1	14,8	36	2,0	6,0	7,4	16,0	24,6	3,2	2,4	0,1
	150-200	8,5	3,5	12,6	34	1,0	5,0	9,1	20,2	25,3	3,9	4,2	0,1
	200-250	8,5	4,4	15,2	29	1,0	6,5	9,8	22,4	30,4	4,9	3,2	0,2
	250-300	8,2	4,5	16,8	37	0	8,0	11,6	31,0	38,5	7,0	3,6	0,2
	300-350	8,3	5,6	15,1	34	1	8,0	14,3	31,0	40,8	7,8	6,7	0,2
P3	0-20	8,0	0,6	1,6	7	0	7,0	0,7	1,7	3,0	3,6	3,0	0,1
	20-40	8,3	0,5	2,3		0,5	5,0	0,1	2,0	3,4	1,9	2,6	0,1
	40-60	8,5	0,9	4,7	16	1,0	5,0	1,3	4,8	7,0	1,6	2,9	0,1
	60-80	8,6	1,7	7,2		1,0	5,5	6,9	6,8	12,9	2,4	4,2	0,1
	80-100	8,6	1,9	9,7	30	1,5	4,5	7,9	8,6	16,1	2,5	3,0	0,1
	100-150	8,7	2,3	11,4	36	2,0	5,5	6,2	11,6	19,0	2,7	2,8	0,1
	150-200	8,7	3,9	10,5		1,5	5,5	9,8	27,4	35,2	3,4	3,2	0,1
	200-250	8,7	3,0	12,1		1,5	5,0	8,8	16,6	22,6	3,5	3,5	0,1
	250-300	7,9	7,2	10,2		0	6,0	61,5	23,8	46,7	24,5	17,6	0,1
	300-350	8,1	6,1	10,5	24	0	6,5	57,5	20,5	46,3	22,6	16,5	0,1
	350-400	8,5	6,7	10,3		1	5,5	59,7	16,5	45,1	23,0	15,0	0,1
	400-450	8,1	6,4	11,7		0	6,5	50,2	13,9	42,7	21,8	4,8	0,1

ANNEXE 3b. ANALYSES CHIMIQUES DES PROFILS

PEDOLOGIQUES DE LA LUNETTE DE PROTVILLE

Du versant dirigé vers la plaine (P4 et P5) et dans la plaine (P6).

Profil	Horizon (cm)	pH	CEe dS/m	SAR	Na/T	Anions (még/l)				Cations (még/l)			
						CO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	Cl ⁻	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺
P4	0-20	8,1	0,6	1,4	11	0	6,5	1,1	1,0	2,4	3,0	3,1	0,1
	20-40	8,2	0,5	2,1		0	6,0	1,1	0,8	3,2	1,6	2,9	0,1
	40-60	8,5	0,8	2,9	9	1,0	6,5	2,8	1,9	5,2	1,8	4,8	0,1
	60-80	8,6	0,7	4,2		1,0	6,5	2,4	2,2	6,4	1,8	3,7	0,1
	80-100	8,5	1,5	5,5	29	1,0	5,0	3,5	8,1	10,7	2,1	5,5	0,1
	100-150	8,5	3,2	12,1		1,0	9,0	7,6	14,7	25,0	2,9	5,6	0,1
	150-200	8,3	4,8	16,1	36	0,5	6,0	11,5	34,3	39,4	4,8	7,2	0,1
	200-250	8,3	4,9	15,1		0,5	7,0	13,7	31,7	40,1	5,3	8,7	0,1
	250-300	8,5	3,6	13,7		1,0	7,5	11,4	16,9	29,1	3,7	5,4	0,1
	300-350	8,3	4,0	12,9		1,0	8,0	14,4	16,6	30,4	4,3	6,8	0,1
P5	0-20	8,0	0,5	1,5	16	0	4,5	1,0	0,8	2,1	2,3	1,7	0,1
	20-40	8,1	0,7	2,0		0	4,0	1,6	1,3	2,8	2,4	1,6	0,1
	40-60	8,2	0,7	2,5		0,5	5,0	1,6	1,2	3,7	2,2	2,3	0,1
	60-80	8,4	0,7	3,1		1,0	5,0	1,7	1,1	4,4	1,6	2,4	0,1
	80-100	8,4	0,9	3,7		1,0	5,0	1,9	2,2	5,5	1,6	2,9	0,1
	100-150	8,3	2,0	7,3	25	1,0	7,0	4,4	6,9	13,2	3,0	3,6	0,1
	150-200	8,2	3,1	9,3		0	5,5	9,5	12,8	20,3	5,1	4,5	0,1
	200-250	8,0	5,3	8,6		0	6,5	35,8	13,2	30,6	19,3	5,8	0,1
	250-300	8,1	4,9	12,0		0	7,0	16,5	23,7	34,1	11,2	4,8	0,1
P6	0-20	8,0	1,9	3,5		0	4,5	2,0	12,9	8,3	6,7	4,4	0,1
	20-40	8,0	4,3	9,4	22	0	5,0	4,9	34,8	27,5	10,8	6,3	0,1
	40-60	8,1	4,7	13,8		0	4,5	8,3	31,9	33,8	8,5	3,5	0,1
	60-80	8,0	7,2	15,2		0	3,0	12,7	52,6	48,8	12,3	8,3	0,1
	80-100	7,8	10,6	12,4	27	0	3,0	47,9	58,0	60,9	32,5	16,0	0,1
	100-150	7,7	13,5	14,5	25	0	3,0	53,1	84,8	82,1	39,0	25,1	0,2

ANNEXE 4. DESCRIPTIONS DES PROFILS PEDOLOGIQUES

DU PERIMETRE IRRIGUE DE KALAAT LANDELOUS

Selon la Soil Taxonomy, les deux horizons de surface sont des horizons ochriques: Ap1 et Ap2. Les horizons en dessous sont des horizons B, 2B, 3B, 4B, 5B etc. Les sols sont des typic xerofluvent (calcaric Fluvisol selon la classification FAO).

Profil K.1

Date de description: 29/03- 13/09/93 - Position: près de la borne d'irrigation n°9

Occupation du sol: blé-labour - Front d'humidification en été à 110 cm.

0-10 cm: horizon de labour, sec, couleur brun jaunâtre(10YR4/3), texture argile limoneuse, structure polyédrique subanguleuse fine peu nette de 1 cm de taille avec une sous-structure polyédrique subanguleuse d'environ 2 mm de taille, forte effervescence généralisée au HCl, nombreuses traces d'activité biologique sous forme de coquilles, de terricules, de galeries de vers de terre et d'anciennes racines, nombreuses racines fines et très fines inter et intra-agrégats, essentiellement verticales et généralisées, limite régulière, structure plus nette en été.

10-35 cm: horizon plus frais, cohérent, couleur brun jaunâtre légèrement plus foncée, texture limon fin argileux, fentes de 1 mm débutant et terminant dans l'horizon, structure polyédrique subanguleuse très nette avec une sur-structure prismatique, porosité intra-agrégats tubulaire importante, matière organique sous forme de résidus, forte effervescence généralisée au HCl, nombreuses traces d'activité biologique, apparition des fentes de retrait en été.

35-60 cm: horizon plus frais, couleur légèrement plus claire, pas de fentes, texture argile limoneuse, structure massive à débits polyédrique (anguleux en feuillets), porosité tubulaire importante entre 1 et 1/10 de mm de diamètre, matière organique sous forme de résidus, forte effervescence généralisée au HCl, nombreuses traces d'activité biologique, peu de racines fines et très fines verticales et généralisées, taches d'oxydo-réduction autour des racinelles.

60-120 cm: horizon plus frais, de couleur légèrement plus foncée (10YR5/4), texture limon argileux fin, structure polyédrique subanguleuse à sur-structure prismatique (5x10 cm), présence de pseudomycéliums calcaires (1%) plus fréquents au bord des agrégats, probablement des remplissages d'anciens chenaux, peu de racines fines généralisées à la surfaces des agrégats, matière organique sous-forme de revêtements des agrégats, forte effervescence au HCl.

120-130 cm: horizon humide, de couleur brun jaunâtre (10YR4/3) légèrement plus claire que précédemment, texture argile limoneuse, structure polyédrique anguleuse fine, porosité tubulaire, taches d'oxydo-réduction généralisées, forte effervescence au HCl.

130-165 cm: horizon humide, de couleur plus jaunâtre (10YR5/3), texture argile limoneuse, structure polyédrique anguleuse fine.

Profil K.2

Date de description: 1/4/93- 13/09/93 - Position: près de la borne d'irrigation n°24

Occupation du sol: blé-chaume - Front d'humidification à 105 cm en été.

0-25 cm: horizon de labour, sec, peu cohérent, couleur brun jaunâtre (10YR4/3), texture argile limoneuse, consistance non fragile, structure polyédrique subanguleuse, porosité importante, matière organique sous forme de débris, forte effervescence généralisée au HCl, nombreuses traces d'activité biologique, limite régulière, fentes de 1 cm traversant l'horizon, fentes de retrait s'étendant jusqu'à 95 cm en été.

25-65 cm: horizon plus frais, cohérent, couleur brun jaunâtre légèrement plus foncée, texture argile limoneuse, nombreux vides, fentes se terminant dans l'horizon, consistance non fragile, structure polyédrique subanguleuse très nette d'environ 2 cm de taille avec une sur-structure polyédrique subanguleuse à prismatique d'environ 5 cm de taille, porosité intra-agrégats tubulaire importante, matière organique sous forme de résidus, forte effervescence généralisée au HCl, nombreuses traces d'activité biologique, limite régulière, taches d'oxydo-réduction autour des racelles.

65-95 cm: couleur légèrement plus claire, texture argile limoneuse, structure polyédrique anguleuse fine nette.

95-105 cm: couleur plus claire (10YR5/3), texture limon argileux, structure massive à débits polyédrique.

105-125 cm: horizon plus frais, couleur plus foncée (10YR5/4), limon très sableux, structure massive.

125-140 cm: horizon humide, couleur plus claire (10YR5/3), texture argile limoneuse, structure polyédrique anguleuse fine, porosité tubulaire, taches d'oxydo-réduction généralisées dans les deux premiers cm superficiels de l'horizon, forte effervescence au HCl.

Profil K.3

Date de description: 30/03/93 - 13/09/93 - Position: près de la borne d'irrigation n°58

Occupation du sol: labour - maraîchage - Front d'humidification à 120 cm.

0-10 cm: horizon de labour, sec, couleur brun jaunâtre (10YR4/3), texture argile limoneuse, structure polyédrique subanguleuse fine peu nette, porosité inter-agrégats importante et porosité intra-agrégats tubulaire moins importante, matière organique sous forme de débris, forte effervescence généralisée au HCl, nombreuses traces d'activité biologique, peu de racines fines et très fines inter et intra-agrégats, limite régulière, fentes de 1 cm traversant l'horizon, taches d'oxydo-réduction autour des racelles, structure plus nette en été.

10-20 cm: idem, texture limon argileux fin, structure massive à débit polyédrique peu nette, porosité essentiellement tubulaire.

20-35 cm: couleur plus jaunâtre (10YR5/4), texture limon argileux, structure massive à débits polyédriques, porosité essentiellement tubulaire.

35-50 cm: horizon plus frais, couleur plus foncée (10YR5/3), texture limon argilo-sableux, structure massive à débits polyédriques.

50-70 cm: couleur plus foncée (10YR4/3), texture limon argileux fin, structure polyédrique subanguleuse nette (2,5 cm x 2 cm) avec une sur-structure prismatique (5 cm x 10 cm).

70-90 cm: horizon plus frais, texture argile limoneuse, structure identique que précédemment moins nette.

90-110 cm: horizon de texture argile limoneuse, pour le reste idem que 50-70 cm.

110-130 cm: horizon frais, texture argile limoneuse, structure massive à débits polyédriques, porosité tubulaire.

Profil K.4

Date de description: 2/4/93 - 14/09/93 - Position: près de la borne d'irrigation n°95, stagnation d'eau; au dessus d'un drain tertiaire.

Occupation du sol: fève en mauvais état-sol nu. - Pas de front d'humidification.

0-20 cm: horizon de labour, frais, cohérent, couleur brun jaunâtre (10YR4/3), texture argile limoneuse, nombreux vides, consistance non fragile, structure polyédrique subanguleuse fine peu nette fondue, porosité inter-agrégats importante et porosité intra-agrégats tubulaire moins importante, matière organique sous forme de débris, forte effervescence généralisée au HCl, nombreuses traces d'activité biologique sous forme de coquilles, de terricules, de galeries de vers de terre et d'anciennes racines, nombreuses racines fines et très fines inter et intra-agrégats, essentiellement verticales et généralisées, limite régulière.

20-65 cm: horizon plus frais, couleur plus foncée, texture argile limoneuse, structure polyédrique subanguleuse fine et sur-structure polyédrique nette fondue, prismatique en été.

65-135 cm: horizon plus compact, texture argileuse, structure prismatique, faces de glissement luisants.

135-150 cm: horizon de couleur plus jaunâtre, texture argileuse, structure polyédrique anguleuse fine.

Profil K.5

Date de description: 16/03/93 - 14/09/93 - Position: près de la borne d'irrigation n°127

Occupation du sol: blé-chaume - Front d'humidification à 70 cm.

0-10 cm: horizon de labour, sec, peu cohérent, couleur brun jaunâtre (10YR4/3), texture argile limoneuse, nombreux vides, consistance non fragile, structure polyédrique subanguleuse peu nette, porosité inter-agrégats importante et porosité intra-agrégats tubulaire moins importante, matière organique sous forme de débris, forte effervescence généralisée au HCl, nombreuses traces d'activité biologique sous forme de coquilles, de terricules, de galeries de vers de terre et d'anciennes racines, nombreuses racines fines et très fines inter et intra-agrégats, essentiellement verticales et généralisées, limite régulière.

10-50 cm: horizon plus frais, cohérent, couleur brun jaunâtre légèrement plus foncée, texture argile limoneuse, nombreux vides, consistance non fragile, structure polyédrique subanguleuse très nette d'environ 2 cm de taille avec une sur-structure prismatique (15 cm x 7 cm), porosité intra-agrégats tubulaire importante, matière organique sous forme de résidus, forte effervescence généralisée au HCl, nombreuses traces d'activité biologique, limite régulière, taches d'oxydo-réduction autour des radicelles.

50-70 cm: horizon plus frais, de couleur légèrement plus foncée (10YR4/4), texture argileuse, structure polyédrique subanguleuse à sur-structure prismatique (5 cm x 10 cm), faces de glissement non luisants, peu de racines fines généralisées à la surfaces des agrégats, matières organique sous-forme de revêtements des agrégats, forte effervescence au HCl, pseudomycéliums calcaires.

70-80 cm: horizon de couleur légèrement plus claire (10YR5/4), texture argile limoneuse, même structure que précédemment, pseudomycéliums calcaires plus fréquents (1 %) au bord des agrégats.

80-150 cm: horizon humide, de couleur plus jaunâtre (10YR5/3), texture limon argileux fin, structure massive à débits anguleux, amas calcaire d'environ 2 %, porosité tubulaire, forte effervescence au HCl, humide à proximité de la nappe située à 140 cm avec la présence de taches d'oxydo-réduction généralisées.

Profil K.6

Date de description: 31/3/93 - 15/09/93 - Position: près de la borne d'irrigation n°5

Occupation du sol: blé-chaume - Front d'humidification à 80 cm.

0-15 cm: horizon de labour, sec, peu cohérent, couleur brun jaunâtre (10YR4/3), texture limono-argileuse, nombreux vides, consistance non fragile, structure polyédrique subanguleuse fine peu nette moyenne avec une sous-structure polyédrique subanguleuse fine, porosité inter-agrégats importante et porosité intra-agrégats tubulaire moins importante, matière organique sous forme de débris, forte effervescence généralisée au HCl, nombreuses traces d'activité biologique sous forme de coquilles, de terricules, de galeries de vers de terre et d'anciennes racines, nombreuses racines fines et très fines inter et intra-agrégats, essentiellement verticales et généralisées, limite régulière.

15-35 cm: horizon plus frais, texture argileuse fine, structure prismatique, le reste est idem.

35-60 cm: idem, texture argileuse, structure polyédrique à tendance prismatique, couleur plus jaunâtre, présence pseudomycéliums calcaires généralisés d'environ 2 %.

60-75 cm: idem, couleur plus jaunâtre (10YR5/4), texture limon argileux fin, structure moins nette.

75-90 cm: horizon de couleur légèrement plus foncée (10YR5/3), texture limon argileux fin, structure massive à débit polyédrique peu nette, pseudomycéliums calcaires moins fréquents.

90-105 cm: horizon frais, couleur légèrement plus claire (10YR5/4), texture limoneuse, structure massive.

105-125 cm: horizon de texture limon très sableux, sable grossier riche en débris de coquilles nombreux, structure massive.

125-150 cm: horizon frais, couleur légèrement plus foncée (10YR5/3), texture limon sableux, structure massive à débits anguleux.

Profil K.7

Date de description: 8/4/93 - 15/09/93 - Position: près de la borne d'irrigation n°16

Occupation du sol: blé-labour - Front d'humidification à 120 cm en été.

0-10 cm: horizon de labour, sec, peu cohérent, couleur brun jaunâtre (10YR4/3), texture limon argileux, nombreux vides, consistance non fragile, structure polyédrique subanguleuse fine peu nette, porosité

inter-agrégats importante et porosité intra-agrégats tubulaire moins importante, matière organique sous forme de débris, forte effervescence généralisée au HCl, nombreuses traces d'activité biologique, limite régulière, fentes de retrait s'étendant jusqu'à 80 cm en été.

10-80 cm: horizon plus frais, cohérent, couleur brun jaunâtre légèrement plus foncée, texture argileuse, nombreux vides, consistance non fragile, structure prismatique, porosité intra-agrégats tubulaire importante, matière organique sous forme de résidus, forte effervescence généralisée au HCl, nombreuses traces d'activité biologique, limite régulière, taches d'oxydo-réduction autour des racelles.

80-100 cm: texture limon argileux, structure polyédrique subanguleux à tendance prismatique moins nette.

100-120 cm: horizon de couleur plus jaunâtre (10YR 5/4), texture limon sableux, structure massive.

120-150 cm: horizon de couleur plus foncée (10YR5/3), texture limon argileux, structure polyédrique anguleuse fine peu nette, porosité tubulaire.

Profil K.8

Date de description: 31/3/93 - 13/09/93 - Position: près de la borne d'irrigation n°48

Occupation du sol: blé-chaume - Pas de front d'humidification.

0-20 cm: horizon de labour, sec, peu cohérent, couleur brun jaunâtre (10YR4/3), texture argile limoneuse, nombreux vides, consistance non fragile, structure polyédrique subanguleuse fine peu nette, porosité inter-agrégats importante et porosité intra-agrégats tubulaire moins importante, matière organique sous forme de débris, forte effervescence généralisée au HCl, nombreuses traces d'activité biologique, limite régulière, fentes de retrait en été.

20-70 cm: horizon plus frais, cohérent, couleur brun jaunâtre légèrement plus foncée, texture argile limoneuse, nombreux vides, consistance non fragile, structure prismatique, porosité intra-agrégats tubulaire importante, matière organique sous forme de résidus, forte effervescence généralisée au HCl, nombreuses traces d'activité biologique, limite régulière, taches d'oxydo-réduction autour des racelles.

70-115 cm: horizon de couleur plus jaunâtre (10YR5/4), texture limon fin, structure polyédrique anguleuse fine peu nette.

115-125 cm: horizon de texture limoneuse, structure massive.

125-150 cm: couleur plus foncée (10YR5/3), texture limon argileux fin, structure polyédrique anguleuse fine, taches d'oxydo-réduction, pseudomycéliums calcaires fréquents généralisés.

Profil K.9

Date de description: 31/3/93 - 15/09/93 - Position: près de la borne d'irrigation n°67

Occupation du sol: blé-chaume - Front d'humidification à 60 cm.

0-15 cm: horizon de labour, sec, peu cohérent, couleur brun jaunâtre (10YR4/3), texture argile limoneuse, nombreux vides, consistance non fragile, structure polyédrique subanguleuse fine peu nette, porosité inter-agrégats importante et porosité intra-agrégats tubulaire moins importante, matière organique sous forme de débris, forte effervescence généralisée au HCl, nombreuses traces d'activité biologique, nombreuses racines fines et très fines inter et intra-agrégats, essentiellement verticales et généralisées, limite régulière, fentes de retrait s'étendant jusqu'à 80 cm en été.

15-55 cm: horizon plus frais, cohérent, couleur brun jaunâtre légèrement plus foncée (10YR4/4), texture argile limoneuse, nombreux vides, consistance non fragile, structure prismatique, porosité intra-agrégats tubulaire importante, matière organique sous forme de résidus, forte effervescence généralisée au HCl, nombreuses traces d'activité biologique, limite régulière, taches d'oxydo-réduction autour des racelles.

55-65 cm: horizon de texture limon argileux, avec en plus des pseudomycéliums calcaires (1 %).

65-85 cm: horizon de couleur plus claire (10YR4/4), texture limon argileux fin, structure polyédrique subanguleuse à tendance prismatique, pseudomycéliums calcaires plus fréquents (2 %).

85-95 cm: horizon de couleur plus jaunâtre (10YR5/4), texture argile limoneuse, structure polyédrique anguleuse fine.

95-100 cm: horizon de texture limon sableux, à sable grossier riche en débris de coquilles, structure massive, nombreuses taches d'oxydo-réduction.

100-130 cm: horizon de couleur plus foncée (10YR5/3), limon argileux, structure polyédrique anguleuse fine, pseudomycéliums calcaires.

ANNEXE 5a. ANALYSES PHYSIQUES DES PROFILS

PEDOLOGIQUES DU PERIMETRE IRRIGUE DE KALAAT LANDELOUS

Transect T1 (de K1 à K5) - Mars/Avril 1993.

Profil	Horizon (cm)	Granulométrie (%)					Calcaire (%)		D.a.	M.O. %	Texture USDA	P.S. %
		A	Lf	Lg	Sf	Sg	Total	Actif				
K1	0-10	46	39	13	1	0	40	25	1,51	1,1	Al	63
	10-35	22	32	42	3	0	42	25	1,50	0,9	Lfa	70
	35-60	49	45	7	1	0	47	11	1,50	0,5	Al	52
	60-120	40	43	10	5	0	41	14	1,53	0,7	Laf	70
	120-130	46	33	11	9	0	45	2	1,50	0,6	Al	70
	130-165	35	42	12	11	0			1,61		Laf	55
K2	0-25	49	38	6	7	0	42	20	1,35	0,7	Al	58
	25-65	55	42	2	2	0	38	26	1,68	1,0	Al	58
	65-95	53	41	3	2	0	39	27	1,58	0,9	Al	58
	95-105	33	23	18	24	0	48	12	1,56	0,4	La	52
	105-125	16	3	6	74	1	46	2	1,62	0,1	Lts	40
	125-140	53	42	2	2	0	41	29	1,71	0,8	Al	63
K3	0-10	41	37	8	13	0	42	21	1,40	0,2	Al	60
	10-20	38	30	15	17	0	44	11	1,35	0,9	Laf	55
	20-35	38	26	11	22	0	45	18	1,53	0,7	La	52
	35-50	26	18	9	46	1	44	19	1,70	0,3	Las	50
	50-70	40	38	10	10	1	46	20	1,62	0,6	Laf	50
	70-90	53	42	4	1	0	42	28	1,56	0,8	Al	63
	90-110	42	39	15	3	1	43	20	1,55	0,6	Al	55
	110-130	49	33	12	4	1	39	21	1,57	0,6	Al	60
K4	0-20	52	40	5	2	0	39	24	1,61	1,7	Al	63
	10-65	54	39	3	1	0	55	26	1,38	0,8	Al	58
	35-135	58	37	2	1	0	37	26	1,45		A	
	60-150	58	36	4	1	0	38	26			A	70
K5	0-10	49	37	10	3	0	42	22	1,61		Al	55
	10-50	51	42	4	1	0	40	26	1,61	0,9	Al	63
	50-70	59	32	4	1	0	40	25	1,62	0,8	A	70
	70-80	46	32	15	6	0	46	19	1,58	0,6	Al	63
	80-150	30	23	29	15	0	47	12	1,59	0,2	Laf	55

Af: argile fine;

A: argile;

Al: argile limoneuse;

La: Limon argileux;

Laf: Limon argileux fin;

Lfa: Limon fin argileux;

Las: Limon argilo-sableux;

L: Limon;

Lf: Limon fin;

Ls: Limon sableux;

Lts: Limon très sableux.

ANNEXE 5b. ANALYSES PHYSIQUES DES PROFILS

PEDOLOGIQUES DU PERIMETRE IRRIGUE DE KALAAT LANDELOUS

Transect T3 (de K6 à K9) - Mars/Avril 1993.

Profil	Horizon (cm)	Granulométrie (%)					Calcaire (%)		D.a.	M.O. %	Texture USDA	P.S. %
		A	Lf	Lg	Sf	Sg	Total	Actif				
K6	0-15	56	35	6	1	0	38	26	1,54	1,2	Al	65
	15-35	64	30	4	1	0	36	24	1,47	1,0	Af	63
	35-60	59	23	13	2	0	38	22	1,74	0,6	A	60
	60-75	39	21	24	15	0	43	18	1,59	0,3	Laf	55
	75-90	31	22	29	16	0	48	15	1,71	0,2	Laf	55
	90-105	25	16	21	36	0	50	16	1,60	0,2	L	50
	105-125	13	5	5	70	6	45	4	1,61	0,1	Lts	40
	125-150	15	8	16	59	1	54	4	1,67	0,1	Ls	40
K7	0-10	30	23	20	23	3	44	13	1,51	0,8	La	50
	10-80	55	32	7	4	1	43	27	1,62	0,6	A	60
	80-100	33	16	7	24	19	44	13	1,61	0,4	La	45
	100-120	19	10	6	29	33	41		1,86	0,2	Ls	40
	120-150	27	22	24	22	2	43	13	1,77	0,1	La	52
K8	0-10	43	37	15	3	1	40	23	1,36	1,0	Al	58
	20-45	45	32	15	5	1	43	24	1,70	0,6	Al	58
	45-115	24	23	29	20	1	48	12	1,53	0,1	Lf	55
	115-125	17	15	26	38	0	47	6	1,71	0,1	L	50
	125-150	32	35	22	8	1	46	17	1,37	0,2	Laf	63
K9	0-10	42	33	16	6	1	39	21	1,37	0,6	Al	55
	15-55	44	41	9	6	0	43	25	1,48	0,6	Al	70
	55-65	43	42	10	1	2	41	23	1,59	0,3	Al	58
	65-85	33	42	2	7	17	48	18	1,56	0,2	La	60
	85-95	43	45	7	2	1	46	20	1,60	0,2	Al	65
	95-100	17	18	12	35	17	46	8	1,66	0,1	Ls	40
	100-120	38	49	11	2	0	43	22	1,60	0,2	Laf	65

Af: argile fine;

A: argile;

Al: argile limoneuse;

La: Limon argileux;

Laf: Limon argileux fin;

Lfa: Limon fin argileux;

Las: Limon argilo-sableux;

L: Limon;

Lf: Limon fin;

Ls: Limon sableux;

Lts: Limon très sableux.

ANNEXE 6a. ANALYSES CHIMIQUES DES PROFILS

PEDOLOGIQUES DU PERIMETRE IRRIGUE DE KALAAT LANDELOUS

Transect T1 (de K1 à K5) - Mars/Avril 1993.

Profil	Horizon (cm)	pH	CEe dS/m	SAR	Anions (méq/l)				Cations (méq/l)			
					CO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	Cl ⁻	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺
K1	0-10	8,2	0,7									
	10-35	8,5	1,2									
	35-60	8,5	1,5									
	60-120	8,0	6,9									
	120-130	8,0	7,0									
K2	0-25	8,0	7,1	16	0	4,0	35,7	60,0	66,9	17,5	16,0	0,3
	25-65	8,1	0,9									
	65-95	8,1	0,9									
	95-105	8,1	2,3	8	0	6,0	9,7	14,4	18,3	7,7	4,0	0,1
	105-125	8,1	4,6	12	0	5,0	20,1	44,3	42,3	16,1	10,0	0,1
	125-140	8,1	7,3	14	0	5,0	33,3	60,0	61,0	20,3	16,0	0,2
K3	0-10	8,2	5,6	14	0	4,0	24,3	49,0	50,9	15,1	12,0	0,1
	10-20	8,2	1,2									
	20-35	8,3	1,1									
	35-50	8,4	2,1	6	0	5,0	4,7	14,4	14,0	7,6	1,9	0,1
	50-70	8,3	1,2									
	70-90	8,1	1,6									
	90-110	7,9	3,5	14	0	5,0	33,3	60,0	61,0	20,3	16,0	0,2
	110-130	8,0	5,1	10	0	5,0	30,9	36,0	37,9	19,2	12,0	0,1
K4	0-20	7,9	1,3									
	10-65	8,0	1,2									
	35-135	8,0	1,4									
	60-150	8,1	3,5	14	0	4,0	15,0	32,5	37,0	9,5	4,0	0,1
K5	0-10	8,2	0,8									
	10-50	8,2	1,7	9	0	7,0	5,7	8,6	14,9	4,3	1,4	0,1
	50-70	8,4	3,4	17	0	6,0	9,7	29,3	36,1	6,5	2,9	0,1
	70-80	8,3	8,9	17	0	5,0	53,5	73,1	82,0	23,2	24,0	0,2
	80-150	8,3	10,1	22	0	4,0	53,5	88,5	100,0	17,7	25,0	0,3

ANNEXE 6b. ANALYSES CHIMIQUES DES PROFILS

PEDOLOGIQUES DU PERIMETRE IRRIGUE DE KALAAT LANDELOUS

Transect T3 (de K6 à K9) - Mars/Avril 1993.

[illegible]

ANNEXE 7. METHODES D'ANALYSES DE L'EAU ET DU SOL

Ce sont les méthodes utilisées à la Direction des Sols (Tunisie) et exposées par Naanaa et Susini (1988) dans « Méthodes d'analyse physique et chimique des sols, W.Naanaa et J.Susini, ES 252 - 135 pages, Direction des Sols-Tunisie, 1988 ».

ANALYSES DE SOL:

- Granulométrie - Méthode à la pipette Robinson:
- Mesure du pH à l'eau : le rapport terre solution adopté 1/2,5.
- Mesure de la conductivité électrique: mesures sur un extrait de pâte saturée (méthode USDA, 1954) et sur extrait aqueux terre/eau de 1/5.
- Calcaire total: par calcimétrie.
- Matière organique: détermination du carbone organique total.
- Dosage des anions: les sulfates par colorimétrie, les chlorures par colorimétrie et par argentimétrie pour les eaux très chargées de nappe et de la Sebkha et les carbonates et les bicarbonates par acidimétrie.
- Dosage des cations Na, K, Ca et Mg: le sodium, le potassium et le calcium par spectrophotométrie de flamme, le magnésium par absorption atomique ou par volumétrie du calcium plus magnésium.
- Dosage du gypse: la terre est traitée par une solution de carbonate d'ammonium à l'ébullition ce qui permet de passer en solution l'ion sulfate et d'éliminer l'ion calcium sous forme de carbonate de calcium insoluble. Le filtrat est acidifié avec HCl auquel on ajoute à chaud une solution de chlorure de baryum qui précipite l'ion sulfate.
- Les cations échangeables et la capacité d'échange d'un sol: la terre est percolée avec une solution normale d'acétate d'ammonium à pH 8,2. Dans le percolat, on dose les cations échangeables. La terre est ensuite lavée à l'alcool pour éliminer toutes traces d'ammonium. On percole ensuite avec une solution de NaCl à 10% pour déplacer les ions ammonium adsorbés sur le complexe. Leur dosage donne la capacité d'échange.

Les cations en solution sont préalablement déterminés sur un extrait de pâte saturée et retranchés de ceux trouvés après la percolation à l'acétate d'ammonium.

- La stabilité structurale par la méthode de Henin.
- Rayons X, Analyses thermodifférentielle (ATD) et thermogravimétrique (ATG) du sol de la lunette sont réalisés au Laboratoire de minéralogie et de micropédologie de l'Université de Géologie de Gand (Belgique) sous l'assistance du Pr. G.Stoops.
- Rayons X, Microscopie Electronique à Balayage et micro-sonde du sol de Kalaât Landelous sont réalisés par le Pr. C.Cheverry et Mme J.B dans le Laboratoire de physique du sol à l'ENSA/INRA Rennes (France).
- Toutes les lames minces et les observations micromorphologiques sont réalisés au Laboratoire de minéralogie et de micropédologie de l'Université de Géologie de Gand (Belgique) sous l'assistance du Pr. G.Stoops pour le sol de la lunette et par le Pr.Stoops pour le sol de Kalaât Landelous.

ANALYSES D'EAU:

Les analyses sur les eaux ne diffèrent pas beaucoup des analyses sur les solutions du sol. Ces eaux doivent être limpides et filtrées pour éviter la boue et les matières en suspension. Pour les déterminations du pH, de la CE et des cations et des anions, le passage des échantillons d'eaux aux mesures est direct. Pour le résidu sec, 50 cm³ d'eau filtrée sont portés à 105°C. Le résidu sec est la différence de poids avant et après séchage.

ANNEXE 8. METHODES D'ANALYSES MINERALOGIQUES ET MICROMORPHOLOGIQUES

Ce sont les méthodes utilisées dans le Laboratoire de Minéralogie et de Micrompédologie à l'I.T.C. de Gand (Belgique). Les descriptions ont été réalisées par le Pr. Dr. Stoops.

ANALYSES MINERALOGIQUES:

Les pré-traitements suivants ont été utilisés:

- destruction de la matière organique avec H_2O_2 (30 %).
- destruction des carbonates (DCB) des fractions argileuses et limoneuses des sols calcaires par une solution acide à pH 5 à 70°C pendant quelques jours. Pour l'analyse sur la fraction de terre fine, on ne procède pas à la destruction des carbonates.
- réactivation des oxydes de fer avec Na-dithionite ajoutée à une solution de Na-citrate + Na-hydrogène-carbonate à pH 7,3 et à 75°C.

Les fractions limoneuses et argileuses sont séparées par des sédimentations successives:

Après la destruction des carbonates et de la matière organique, la terre fine est tamisée à 50 μm pour séparer la fraction sableuse. Les fractions argileuses et limoneuses sont alors séparées après dispersion avec une solution de Na_2CO_3 (2 %) à pH 9,5. L'argile est siphonnée après 8 h 35 mn à une profondeur de 10 cm. La floculation est obtenue en ajoutant du HCl (2 %). L'argile et le limon collectés sont lavés avec de l'alcool et de l'acétone jusqu'à l'élimination complète des chlorures.

La diffraction aux rayons X (XRD) est réalisée sur des échantillons séchés et orientés des fractions suivantes:

- la terre fine, sans aucun pré-traitement, pour la détermination des carbonates.
- des échantillons de limon et d'argile non traités pour la destruction des carbonates (DCB), pour la détermination des oxydes de fer.
- des échantillons d'argile décalcifiés (DCB) après saturation en Mg^{++} , glycolation d'échantillon saturé en Mg^{++} , saturation en K^+ d'échantillons chauffés successivement à 350°C et 500°C pour l'identification de la composition minéralogique des argiles.

Les analyses aux rayons X sont réalisées à l'aide d'un appareil Philips (Philips Expert System APD, software PW3710) par des radiations en $CuK\alpha$.

ANALYSES MICROMORPHOLOGIQUES:

Des échantillons de sols non perturbés et orientés sont prélevés dans des profils pédologiques. Après séchage à l'air, ils sont imprégnés avec une résine de polyester non saturé. Des lames minces d'environ 90x120 mm sont préparées. Les descriptions sont faites en employant les concepts et la terminologie du manuel « Handbook for Soil thin Section Description » de P.Bullock, N.Fedoroff, A.Jongerijs; G.Stoops et T.Tursina, 1985; Waine Research Publications, Wolverhampton, U.K. Les abréviations suivantes sont utilisées dans les descriptions:

- limon: > 50 μm .
- s.f.: sable fin (50-125 μm).
- s.m.: sable moyen (125-500 μm).
- s.g.: sable grossier (500-2000 μm).

Tous les pourcentages et les rapports mentionnés sont relatifs à des surfaces et sont seulement des estimations visuelles.

LISTE DES PLANCHES

	<i>Page</i>
<i>Planche 1. Localisation du périmètre de Kalaât Landelous et de la lunette de la Koudiat El Mabtouha.</i>	<i>23</i>
<i>Planche 2. La lunette de la Koudiat El Mabtouha.</i>	<i>35</i>
<i>Planche 3. Pédotraits au niveau du profil P3</i>	<i>42</i>
<i>Planche 4. Variation saisonnière de la structure dans les profils K1 et K3</i>	<i>70</i>
<i>Planche 5. Variation saisonnière de la structure dans les profils K4 et K6</i>	<i>71</i>
<i>Planche 6. Variation verticale de la structure dans le profil K3</i>	<i>72</i>
<i>Planche 7. Microstructures et pédotraits. Profil K3</i>	<i>82</i>
<i>Planche 8. Suivi piézométrique de la nappe, de la salure globale des sols et des eaux de drainage</i>	<i>134</i>
<i>Planche 9. Etats de surface des parcelles simulées</i>	<i>143</i>
<i>Planche 10. Les profils de la parcelle irriguée</i>	<i>164</i>
<i>Planche 11. Evolution de la structure dans le profil G2</i>	<i>165</i>
<i>Planche 12. Microstructures et pédotraits du profil G2</i>	<i>166</i>
<i>Planche 13. Evolution de l'occupation de la parcelle</i>	<i>189</i>

LISTE DES FIGURES

	Pages
Figure 1. La zonation géochimique des sols salés en Tunisie.	4
Figure 2. Les périmètres irrigués de Tunisie.	7
Figure 3. Le bassin versant de l'Oued Mejerda.	18
Figure 4. Le Golfe d'Utique.	21
Figure 5. Extension de la crue de 1931 dans la Basse Mejerda.	22
Figure 6. Extension de la crue de 1973 dans la Basse Mejerda.	24
Figure 7. Localisation des lunettes tunisiennes.	25
Figure 8. Localisation de la lunette de Protville et d'El Mabtouha.	26
Figure 9. Sites étudiés dans le périmètre de Kalaât Landelous et lieux d'échantillonnage du sol et des eaux de la nappe.	31
Figure 10. Localisation des profils sur photographie aérienne.	34
Figure 11. Répartition latérale des arrangements et des traits pédologiques.	37
Figure 12. Evolution verticale de la microstructure dans le profil 3.	40
Figure 13. Niveaux micromorphologiques de la lunette.	44
Figure 14. Composition granulométrique.	46
Figure 15. Courbes d'isovaleurs de la teneur en argile.	47
Figure 16. Variation de la teneur en gypse dans le Profil-3.	48
Figure 17. Analyse aux rayons X - Profil 3.	50
Figure 18. Analyse thermodifférentielle (A.T.D.).	51
Figure 19. Analyse thermogravimétrique (A.T.G.).	51
Figure 20. Composition cationique et anionique-Profiles 1, 2 et 3.	57
Figure 21. Variation verticale de la CEE et du SAR.	58
Figure 22. Evolution latérale de la désalinisation.	59
Figure 23. Secteur étudié dans le périmètre de Kalaât Landelous et les lieux d'échantillonnage du sol et des eaux de la nappe.	66
Figure 24a. Représentation schématique des profils pédologiques le long du transect T1.	73
Figure 24b. Représentation schématique des profils pédologiques le long du transect T3.	74
Figure 25. Niveaux macroscopiques d'organisation des sols de Kalaât Landelous.	75
Figure 26. Distribution des structures des horizons en fonction de la profondeur.	78
Figure 27. Organisation spatiale des structures des sols sur le transect T1.	79
Figure 28. Organisation spatiale des structures des sols sur le transect T3.	79
Figure 29a. Diffraction aux rayons X de la terre fine non traitée-Profil K3.	85
Figure 29b. Diffraction aux rayons X de la terre fine non décalcifiée (DCB); saturation de la fraction limoneuse par Na^+ - Profil K3, couche 0-10 cm.	86
Figure 29c. Diffraction aux rayons X de la terre fine traitée avec HCl 1N; saturation de la fraction limoneuse par Na^+ - Profil K3, couche 0-10 cm.	87
Figure 29d. Diffraction aux rayons X de la fraction argileuse après décalcification et saturation par Mg^{++} et K^+ - Profil K3, couche 0-10 cm.	87
Figure 30. Analyse au MEB d'un échantillon de sol (L2, 0-25 cm).	89
Figure 31. Analyse au MEB d'un échantillon de sol (L2, 0-25 cm)- Agrandissement de l'amas gypseux.	89
Figure 32. Analyse au microsonde de l'amas gypseux.	89
Figure 33. Analyse au MEB d'un échantillon de sol (L2, 0-25 cm)-Agrandissement des cristaux de dolomite.	90

Figure 34. Analyse au microsonde des cristaux de dolomite.	90
Figure 35. Analyse au MEB d'un échantillon de sol (L2, 0-25 cm)-Agrandissement de cristaux de calcite.	91
Figure 36. Analyse au microsonde des cristaux de calcite.	91
Figure 37. Exemples d'histogrammes des fréquences relatives de la fraction fine (A + Lf).	92
Figure 38. Variogrammes moyens bruts normés de l'argile + limon fin déterminés au niveau du périmètre.	93
Figure 39. Variogrammes directionnels de la fraction argile + limon fin-Niveau 10 cm.	94
Figure 40. Les unités texturales homogènes.	95
Figure 41. Variogrammes moyens bruts normés de l'argile + limon fin au niveau des transects T1 et T2 (0-70 cm).	96
Figure 42. Variogrammes moyens bruts normés de la densité apparente sur les transects T1 et T2.	97
Figure 43. Variogrammes moyens bruts normés et modèles ajustés de la salure du sol déterminés au niveau du périmètre en octobre 1989.	102
Figure 44. Plan d'échantillonnage pour l'étude de la distribution de la couche limono-sableuse.	103
Figure 45. Variation spatiale de la limite supérieure de la strate.	105
Figure 46. Variation spatiale de la limite inférieure de la strate.	105
Figure 47. Variation spatiale de la strate.	106
Figure 48. Coupe AA' de la strate.	107
Figure 49. Coupe BB' de la strate.	107
Figure 50. Organisation texturale et distribution de la salinité le long du transect AA'.	110
Figure 51. Principes du modèle de fonctionnement de la strate.	111
Figure 52. Courbes d'altitude et emplacement du réseau piézométrique dans le périmètre de Kalaât Landelous.	113
Figure 53. Gradient hydraulique général de la nappe avant assainissement Profondeur de la nappe en janvier 1953.	115
Figure 54. Gradient hydraulique général de la nappe après assainissement et irrigation Carte d'isopièzes (en -m) en octobre 1994.	116
Figure 55. Variabilité spatiale de la profondeur de la nappe en septembre 1953.	117
Figure 56. Variogramme moyen brut et modèle ajusté de la profondeur de la nappe déterminés au niveau du périmètre en octobre 1989.	117
Figure 57. Variabilité spatiale de la profondeur de la nappe en octobre 1989.	118
Figure 58. Variabilité spatiale de la profondeur de la nappe en octobre 1996.	119
Figure 59. Evolution dans le temps de la profondeur de la nappe.	119
Figure 60. Variogramme moyen brut et modèle ajusté de la salinité de la nappe déterminés au niveau du périmètre en octobre 1989.	120
Figure 61. Variabilité spatiale de la salinité de la nappe en octobre 1989.	121
Figure 62. Evolution dans l'espace de la salinité de la nappe-Situation en octobre 1996.	122
Figure 63. Evolution dans le temps de la salinité de la nappe.	122
Figure 64. Evolution dans l'espace de la salure des sols sur 1 m d'épaisseur en janvier 1953	123
Figure 65. Variabilité spatiale de la salure des sols en octobre 89 entre 0 et 25 cm.	124
Figure 66. Variabilité spatiale de la salure des sols sur 1 m d'épaisseur en octobre 96.	125
Figure 67. Evolution dans le temps de la salure des sols.	126
Figure 68. Les zones à risque de salinisation.	127
Figure 69. Evolution des volumes d'eau d'irrigation introduits dans le périmètre.	128
Figure 70. Evolution des volumes d'eau évacuée par pompage à l'extérieur du périmètre.	129
Figure 71. Evolution de la qualité des eaux d'irrigation et de drainage.	130
Figure 72. Evolution de la quantité de sels apportée par les eaux d'irrigation.	131
Figure 73. Evolution de la quantité de sels évacuée par les eaux de drainage.	131
Figure 74. Evolution du bilan mensuel des sels.	132

Figure 75. Sites des mesures effectuées sur les eaux de drainage.	133
Figure 76. Emplacement des batteries de piézomètres dans le système émissaire/collecteur/ drains/parcelle.	137
Figure 77. Profondeur de la nappe entre l'émissaire E1 et le collecteur C2.19.	138
Figure 78. Salinité de la nappe entre l'émissaire E1 et le collecteur C2.19.	138
Figure 79. Effet des pistes agricoles et des bras morts sur la profondeur de la nappe.	139
Figure 80. Variation du ruissellement en fonction de l'occupation du sol et de son état hydrique.	144
Figure 81. Variation de l'érosivité en fonction de l'occupation du sol et de son état hydrique.	146
Figure 82. Localisation de la parcelle et dispositif expérimental.	155
Figure 83. Les zones iso-doses.	157
Figure 84. Les zones iso-salines.	157
Figure 85. Organisation du matériau superficiel sous irrigation -Forme et taille des structures.	159
Figure 86. Profils hydriques d'un sol nu non irrigué (du 8/7/92 au 4/9/92).	173
Figure 87. Evolution du profil hydrique au cours d'un cycle d'irrigation - Eté 1992.	174
Figure 88. Répartition des volumes d'eau pour le cycle d'irrigation. Eté 1992.	175
Figure 89. Profils hydriques d'un sol nu non irrigué. Régime printanier (du 23 au 29/4/93).	176
Figure 90. Evolution de la salinité d'un sol nu non irrigué.	178
Figure 91. Evolution du profil salin au cours d'un cycle d'irrigation - été 92 et été 93.	179
Figure 92. Apports totaux en sels (en Kg/25 m ²).	180
Figure 93. Evolution du stock salin (en Kg/25 m ²).	180
Figure 94. Evolution de la salinité du sol en hiver.	181
Figure 95. Evolution de la salinité du sol selon le régime des irrigations.	184
Figure 96. Evolution de la salinité du sol de la parcelle en fonction des aménagements et de la fréquence des irrigations.	185
Figure 97. Variation de la production du maïs, en grain (a) et en matière sèche (b).	187

LISTE DES TABLEAUX

	Pages
Tableau 1. Observations Micromorphologiques - Profil-3.	38
Tableau 2. Correspondance entre les observations macro et microscopiques Profil-3.	43
Tableau 3. Densité apparente sur motte (Da) et porosité totale (P.T en %).	53
Tableau 4. Caractéristiques hydriques (Humidités pondérales en %).	53
Tableau 5. Indice d'instabilité structurale (Is).	54
Tableau 6. Limites d'Atterberg.	55
Tableau 7. Estimation de l'extensibilité linéaire.	55
Tableau 8. Complexe absorbant.	60
Tableau 9. Analyses des eaux de la nappe et de la Sebkha.	61
Tableau 10. Relations de genèse unités structurales élémentaires - horizons.	69
Tableau 11. Relation entre texture et structure.	76
Tableau 12. Caractéristiques physiques par texture.	76
Tableau 13. Caractéristiques physiques par structure.	76
Tableau 14. Distribution des textures en fonction de la profondeur.	77
Tableau 15. Observations Micromorphologiques-Profil-K3	81
Tableau 16. Correspondance entre les observations macro et microscopiques, Profil K3.	84
Tableau 17. Paramètres statistiques de la fraction argile + limon fin à l'échelle du périmètre et à différents pas de mesures (transects T1 et T2).	96
Tableau 18. Paramètres statistiques de la densité apparente à différents pas de mesures.	97
Tableau 19. Valeurs moyennes et coefficient de variation des perméabilités (cm/h).	98
Tableau 20. Conductivité électrique et pH caractéristiques.	99
Tableau 21. Conductivité électrique et pH caractéristiques par texture.	100
Tableau 22. CEE et pH caractéristiques par structure.	101
Tableau 23. Caractères généraux de la variabilité de l'épaisseur de la strate.	104
Tableau 24. Caractéristiques statistiques du matériau argilo-limoneux de surface.	108
Tableau 25. Caractéristiques statistiques du matériau limono-argileux.	108
Tableau 26. Caractéristiques statistiques du matériau limoneux.	108
Tableau 27. Caractéristiques statistiques du matériau limono-argileux fin.	109
Tableau 28. Caractérisation de la salinité de la strate.	109
Tableau 29. Corrélations entre les salinités.	109
Tableau 30. Régimes hydrique et salin générés par la lentille au cours d'un cycle d'irrigation.	110
Tableau 31. Variabilité de la profondeur de la nappe.	118
Tableau 32. Variabilité de la salinité de la nappè.	120
Tableau 33. Concentration ionique relative de l'eau de la nappe - Sept. 89.	121
Tableau 34. Caractéristiques de la salure des sols en octobre 1989.	123
Tableau 35. Variabilité de la salure des sols.	125
Tableau 36. Relation entre la salinité du sol (CEE) et celle de la nappe (Cen).	126
Tableau 37. Variation mensuelle de la qualité des eaux d'irrigation et de drainage.	129
Tableau 38. Composition chimique des eaux d'irrigation et de drainage.	130
Tableau 39. Evolution du bilan du volume des eaux et de la quantité de sels.	132
Tableau 40. Débits des eaux de drainage dans un ensemble Emissaire/Collecteur/Drains.	135
Tableau 41. Qualité des eaux de drainage dans un ensemble Emissaire/Collecteur/Drains.	135
Tableau 42. Composition chimique de l'eau de drainage, Emissaire E2.	136
Tableau 43. Caractérisation pédologique de la surface des parcelles à la fin du cycle d'irrigation (début octobre 1992) et sans labour.	142

Tableau 44. Etats de surface des parcelles expérimentales de simulation.	142
Tableau 45. Ruissellement et érosivité des sols de Kalaât et de Cebalat en fonction de l'intensité de la pluie et l'occupation du sol.	147
Tableau 46. Qualité de l'eau d'irrigation (9/1991).	148
Tableau 47. Comparaison des conductivités hydrauliques saturées à partir des relations de Green et Ampt (K_a), des mesures Müntz (K_m) et des valeurs empiriques d'intensité limite de ruissellement (I_l).	149
Tableau 48. Occupation des cuvettes de la parcelle.	154
Tableau 49. Qualité des eaux d'irrigation - Année 1992-1993.	156
Tableau 50. Caractérisation du sol au niveau du profil de la parcelle (21/7/92).	158
Tableau 51. Granulométrie de l'organisation de surface (9/10/93).	160
Tableau 52. Densité apparente et porosité totale au niveau du profil (23/06/92).	160
Tableau 53. Evolution de la porosité totale au cours du premier cycle d'irrigation.	161
Tableau 54. Evolution de la porosité du sol sous irrigation et sans irrigation au cours du second cycle d'irrigation (5/10/93).	162
Tableau 55. Comparaison des observations micromorphologiques.	167
Tableau 56. Correspondance entre les observations macro et micromorphologiques.	170
Tableau 57. Variations saisonnières des caractéristiques de la nappe dans la parcelle.	172
Tableau 58. Humidités volumiques du sol nu en été entre le 8/7/1992 et 4/9/1992.	173
Tableau 59. Humidités pondérales caractéristiques pour pF 2,7 et pF 4,2.	173
Tableau 60. Humidités volumiques du sol irrigué au cours du cycle d'irrigation de l'été 1992.	174
Tableau 61. Doses totales au cours du cycle d'irrigation de l'été 1993.	175
Tableau 62. Humidités volumiques du sol en hiver (30/12/1992).	176
Tableau 63. Humidités volumiques du sol au printemps entre le 23/4/1993 et 29/4/1993.	176
Tableau 64. Evolution du stock de sels dans un sol nu non irrigué.	177
Tableau 65. Caractérisation chimique du sol au niveau du profil de la parcelle (21/7/92).	178
Tableau 66. Evolution de la salinité et du stock salin selon un itinéraire d'irrigation continue (I) et un itinéraire d'arrêt d'irrigation (IN).	182
Tableau 67. Evolution du stock de sels par couche et par itinéraire (en g/m ²).	183
Tableau 68. Evolution de la salinité du sol entre 7/92 et 9/96.	184
Tableau 69. Diagnostic foliaire sur maïs. Eté 93.	190

Table des matières

REMERCIEMENTS	Pages
RESUME EN ARABE	
RESUME	
ABSTRACT	
SOMMAIRE	
INTRODUCTION GENERALE	1
PRESENTATION DU MILIEU ET DES OBJECTIFS	3
I. Les ressources en eau et en sols en Tunisie: Enjeux et défis	3
I.1. Les ressources en sols: Caractéristiques et distribution	3
I.2. Les ressources en eau: Quantité et qualité	6
I.3. Le croisement des ressources en sol et en eau: Les périmètres irrigués en Tunisie	6
I.4. La mise en valeur des sols salés et la salinisation en Tunisie	8
I.4.1. La distribution des sols salés	8
I.4.2. La salinisation des sols	8
I.4.3. La mise en valeur des sols salés	8
I.4.4. Bilan des études des sols salés	9
II. Les facteurs de salinisation et les actions de désalinisation des sols salés	10
II.1. L'effet d'une nappe phréatique superficielle et salée	10
II.2. L'effet de la stratification du sol	11
II.3. Les sols salés et la salinisation secondaire des sols	11
II.4. La désalinisation des sols salés et sodiques	13
CONCLUSION	16
MATERIELS ET METHODES	18
III. Le système de la Mejerda et son Delta	18
III.1. Le système de la Mejerda	18
III.2. Le Delta de la Mejerda	20
IV. Le modèle de la lunette d'El Mabtouha	24
IV.1. Le site d'étude	24
IV.1.1. Répartition des lunettes tunisiennes	24
IV.1.2. Les collines de Protville et d'El Mabtouha	26
IV.1.3. Epoque d'édification et complexe morphologique des lunettes	27
IV.1.4. Evolution actuelle des sols des lunettes: Désalinisation-Désodisation	28
IV.2. Méthodes	28
V. La plaine de Kalaât Landelous	29
V.1. Le site étudié	29
V.1.1. Le milieu évolutif	29
V.1.2. La genèse des sols	29
V.1.3. L'aménagement de la plaine	30
V.2. Méthodes	30
CONCLUSION	32

RESULTATS

Première Partie: ORGANISATION, FONCTIONNEMENT ET EVOLUTION NATURELLE DES SOLS DE LA LUNETTE D'EL MABTOUHA

CHAPITRE I: L'ORGANISATION ET LE FONCTIONNEMENT PHYSICO-CHIMIQUE DES SOLS DE LA LUNETTE

I. APPROCHE D'ETUDE DES SOLS DE LA LUNETTE	33
II. LA MORPHOLOGIE DE LA ZONE DE LA LUNETTE	34
II.1. L'organisation verticale	34
II.2. L'organisation latérale	36
II.3. Caractérisation et organisation micromorphologiques	
II.4. Relation (Filiation) entre structures micro et macromorphologiques	41
II.5. Conclusion	45
III. ETUDE DES CONSTITUANTS DES SOLS DE LA LUNETTE	46
III.1. Caractérisation granulométrique	46
III.2. Matière organique, calcaire et gypse	48
III.3. Caractérisation minéralogique	49
III.4. Conclusion	52
IV. CARACTERISTIQUES PHYSICO-HYDRIQUES	52
IV.1. Densité apparente et porosité totale	52
IV.2. Caractéristiques hydriques	53
IV.3. La stabilité structurale	54
IV.4. Caractéristiques mécaniques des sols	54
IV.5. Conclusion	56

CHAPITRE II: CARACTERISATION ET EVOLUTION GEOCHIMIQUE DES SOLS DE LA LUNETTE

I. CARACTERISATION GEOCHIMIQUE	57
I.1. pH et profils de salinité	57
I.2. Les bases échangeables et la capacité d'échange cationique (CEC)	59
II. EVOLUTION GEOCHIMIQUE	60
II.1. Evolution dans l'espace des faciès géochimiques	60
II.2. Les eaux de la nappe et de la Sebkha	61
II.3. Etat de saturation des solutions du sol	62
II.4. Conclusion	62
	63

Deuxième Partie: ORGANISATION, FONCTIONNEMENT ET EVOLUTION DES SOLS DU PERIMETRE IRRIGUE DE KALAAT LANDELOUS

CHAPITRE I: L'ORGANISATION DES SOLS DU PERIMETRE IRRIGUE

I. METHODE D'ETUDE DES SOLS	66
I.1. Caractérisation des sols	66
I.2. Analyses des données	67
II. CARACTERISATION MORPHOLOGIQUE DES SOLS	68
II.1. Typologie des matériaux, des horizons et des sols	68

II.1.1. Organisation macroscopique	68
II.1.2. Organisation micromorphologique	80
II.1.3. Relation (Filiation) entre macrostructures et microstructures	83
II.1.4. Constitution minéralogique	85
II.1.5. Organisation microscopique	88
II.2. Variabilité des paramètres d'organisation et de comportement hydrique des sols	92
II.2.1. Variabilité des paramètres d'organisation	92
II.2.1.1. Organisation spatiale des sols: mise en évidence d'unités texturales homogènes	92
II.2.1.2. Organisation verticale des sols	95
II.2.2. Variabilité des paramètres de comportement hydrique	98
III. CARACTERISATION DE LA SALURE DES SOLS	99
III.1. Typologie de la distribution des sels	99
III.2. Variabilité de la salure des sols	101
IV. MORPHOLOGIE DES SOLS STRATIFIES DANS LE PERIMETRE - CONSEQUENCES SUR LA DISTRIBUTION DES SELS	103
IV.1. Caractères morphologiques généraux de la strate	104
IV.2. Effet de la stratification sur la distribution des sels	107
V. CONCLUSION	112
CHAPITRE II: LE FONCTIONNEMENT DES SOLS DU PERIMETRE IRRIGUE	
I. METHODES	113
II. LE FONCTIONNEMENT DU SYSTEME NAPPE-SOL	115
II.1. Analyse au niveau du périmètre de l'évolution des caractéristiques de la nappe et des sols	115
II.1.1. Evolution des caractéristiques de la nappe en fonction des aménagements	115
II.1.1.1. Evolution du gradient hydraulique avant et après aménagement	115
II.1.1.2. Evolution de la profondeur de la nappe	116
II.1.1.3. Evolution de la salinité de la nappe	120
II.1.2. Evolution de la salure des sols en fonction des aménagements	123
II.1.3. Relation sol-nappe et zonation des risques de salinisation	126
II.2. Evolution du bilan des sels à l'échelle du périmètre: volume et qualité	128
II.2.1. Volumes des eaux d'irrigation et de drainage	128
II.2.2. Qualité des eaux d'irrigation et de drainage	129
II.2.3. L'évolution du bilan des sels	130
II.3. Analyse des eaux du drainage et de la variabilité des caractéristiques de la nappe dans un système émissaire/collecteur/parcelle	133
II.3.1. Analyse des eaux du drainage dans un système émissaire/collecteur/drain	
II.3.2. Analyse de la variabilité des caractéristiques de la nappe dans un système émissaire/collecteur/drains/parcelle	136
III. LE FONCTIONNEMENT DU SYSTEME SOL-PLUIE	141
III.1. Caractérisation des états de surface	141
III.2. Evolution sous pluies simulées	142
III.2.1. Efficacité du ruissellement	142
III.2.2. Dégradation de la structure des sols	145
III.2.3. Quelques aspects relatifs au lessivage des sels	148
III.3. Evaluation de la conductivité hydraulique sur sol saturé à la fin de la simulation	148
III.4. Organisations de surface et mode d'irrigation	151
IV. CONCLUSION	153

CHAPITRE III: L'EVOLUTION DES SOLS A L'ECHELLE DE LA PARCELLE

I. METHODES	154
II. L'EVOLUTION DU SOL	158
II.1. Traits généraux	158
II.1.1. Organisation du sol de la parcelle	158
II.1.2. Observations macromorphologiques	159
II.1.3. L'espace poral	160
II.2. Observations micromorphologiques de la couche perturbée	162
III. L'EVOLUTION DU SOL DANS UN SYSTEME SOL-NAPPE-EAU D'IRRIGATION- ITINERAIRE AGRONOMIQUE	171
III.1. L'évolution du régime de la nappe phréatique	171
III.2. L'évolution du régime hydrique des sols	172
III.2.1. Le régime hydrique du sol non irrigué	172
III.2.2. Régimes hydrique du sol sous irrigation	174
III.3. L'évolution du régime des sels	177
III.3.1. Le régime des sels du sol non irrigué	177
III.3.2. Régime des sels pour un sol sous irrigation	178
III.3.3. Régime des sels selon différents itinéraires agronomiques	182
IV. INCIDENCES SUR LES CULTURES ET EFFICIENCE DE L'UTILISATION DE L'EAU	186
IV.3.1. Culture d'été	186
IV.3.2. Culture d'hiver	188
IV.3.3. Absorption foliaire des sels	190
V. CONCLUSION	191
CONCLUSION ET DISCUSSION	192
DISCUSSIONS ET CONCLUSION GENERALE	196
BIBLIOGRAPHIE	199
ANNEXES	207