

RECHERCHE SUR LES CONDITIONS D'EMPLOI D'EAU DE SALINITE
DIFFERENTE POUR LA RECUPERATION ET L'IRRIGATION DES SOLS
PRESENTANT DES PHENOMENES DE SALURE.
APPLICATION AUX PERIMETRES IRRIGABLES

RAPPORT FINAL

E-S 248



La parcelle d'essai de Zelba, suivi sous culture de luzerne

DIRECTION DES SOLS

S. KHALFALLAH
J. VIEILLEFON
M. HACHICHA
H. BEN HASSINE
M. BRANSIA

I. N. A. T. LABORATOIRE
DE SCIENCES DU SOL

A. M'HIRI
M. J. ELLOUMI
et la participation de
M. HACHICHA
N. JEDIDI
A. HASSEN

REPUBLIQUE TUNISIENNE
MINISTERE DE L'AGRICULTURE

DIRECTION DES RESSOURCES EN SOL

INSTITUT NATIONAL AGRONMIQUE
DE TUNISIE

Recherche sur les conditions d'emploi d'eaux de
salinité différente pour la récupération et
l'irrigation des sols présentant des phénomènes
de salure. Application aux périmètres irrigables

1984 - 1987

Rapport Final

Cette recherche a bénéficié d'une contribution
financière de la Commission des Communautés
Européennes

Rapport Technique Final /TSD-A-126-TU(MR)

Tunis - Janvier 1988

AVANT - PROPOS

La sensibilité des systèmes agricoles à la sécheresse et aux aléas climatiques dans les régions arides, semi-arides et même sub-humides en Tunisie, a conduit les paysans et les planificateurs à recourir à l'irrigation pour sécuriser la population rurale et régulariser les productions agricoles.

En Tunisie, les ressources en eau de bonne qualité ne suffisent pas pour couvrir les besoins du développement agricole, et le recours à l'utilisation des eaux de qualité moyenne s'avère parfois nécessaire. Mais l'utilisation de ces eaux comporte des risques divers plus ou moins graves: salinisation, sodisation des sols, pollution chimique et microbiologique de l'environnement.

Déjà, depuis les années soixante, des travaux de recherches, basés sur l'expérimentation agronomique, portant sur l'utilisation des eaux salines en irrigation, dans certaines conditions de sol et de climat, ont été réalisés par le C.R.U.E.S.I. (Centre de recherche sur l'utilisation des eaux salées en irrigation). Les résultats obtenus, très encourageants, ne sont pas toujours généralisables, et depuis quelques années, on éprouve le besoin, aussi bien en Tunisie qu'ailleurs de disposer d'un outil de prédiction de l'évolution des sols sous l'effet de l'irrigation à l'eau plus ou moins chargée en sels. Ce thème, traité de concert avec l'O.R.S.T.O.M., constitue l'objet de la première partie de ce projet de recherches.

Par ailleurs, l'utilisation des eaux usées pose un problème de pollution chimique (nitrates et métaux lourds) et microbiologique de l'environnement et surtout des nappes phréatiques, et leur épandage sur des sols sains généralement situés sur des compartiments bien drainés comporte des risques de leur contamination ainsi que celle des terrains situés à l'aval. C'est pour cela que l'on s'est orienté vers l'expérimentation de ces eaux sur des terres affectées par la salure, constituant la bordure des Sebkhass. Ainsi les eaux usées de qualité médiocre pourraient servir à valoriser des sols aussi médiocres, dans la mesure où l'irrigation constitue un moyen de bonification de ces sols. La deuxième partie de ce projet se propose d'étudier l'effet de l'eau usée sur l'évolution de différents types de sols dont en particulier un sol salsodique.

Au terme de ce projet de Recherche-Développement, l'équipe des chercheurs est heureuse d'exprimer sa gratitude aux **Autorités Tunisiennes** et à la **Commission des Communautés Européennes** qui lui ont procuré le cadre et les moyens pour avancer un peu plus dans la connaissance de l'utilisation des eaux d'origine et de qualité variées en irrigation dans les conditions climatiques arides de la Tunisie.

L'équipe tient à remercier aussi **M.A.SOUISSI**, Directeur de la DRS, qui est le promoteur de ce projet, **M. A.JARAYA**, Directeur de l'INAT et **M. R.LEFEVRE**, Chef de la mission **DRSTOM** de Tunisie pour leur aide et soutien tout au long de l'exécution de ce programme de recherches.

Les chercheurs

Direction des Sols(*)

S.KHALFALLAH
J.VIEILLEFON
M.HACHICHA
H.BEN HASSINE
M.BRANSIA

I.N.A.T. Laboratoire de Sciences du Sol(**)

A.M'HIRI
M.J.ELLOUMI
et la participation de
M.HACHICHA
N.JEDIDI
A.HASSEN

* 42, Av. de la République - Tunis 1001

** 43, Av. Charles Nicolle - Tunis 1002

SOMMAIRE

PREMIERE PARTIE: RECHERCHE SUR L'EVOLUTION DES SOLS IRRIGUES AVEC DES EAUX DE SALINITE DIFFERENTE PAR L'UTILISATION DE LA METHODE DE SIMULATION NUMERIQUE.

	Page
INTRODUCTION	1
I- OBJECTIFS DE LA RECHERCHE SUR L'EVOLUTION DE LA SALURE DANS LES PERIMETRES IRRIGUES.	3
I-1. Etat de la question en 1984 en Tunisie	3
I-2. Les résultats des simulations de la période 1982-1984	7
I-3. Les actions programmées pour la période 1984-1987.	8
II- ANALYSE STRUCTURALE DU MILIEU - SOL POUR LA DETERMINATION DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES ET HYDRODYNAMIQUES.	9
II-1. Choix des stations et caractérisation des sites	9
1.1. Périmètre de ZELBA	9
1.2. Périmètre de SOUK SEBT	17
II-2. Elaboration des données hydrodynamiques et physico-chimiques nécessaires à la simulation	29
II-3. Conduite de l'irrigation sur une culture	53
II-4. Evolution de la salure de sol au cours de la culture	56
III- SIMULATION NUMERIQUE : MISE AU POINT ET CALAGE	67
III-1. Méthodologie	67
III-2. Calage du modèle sur l'essai d'infiltration	77
III-3. Contrôle du calage sur une séquence d'irrigation	84
III-4. Simulation de longue durée	87
III-5. Simulation complète avec le modèle SIMUL	95
III-6. Prévision à moyen terme de l'évolution saline	102
6.1. Influence de la pluviométrie normale sur le lessivage des sels.	102
6.2. Etude de quelques corrections possibles	104
IV- RECHERCHE DE TECHNIQUES D'EXTRAPOLATION A L'ENSEMBLE DU PERIMETRE	107
IV-1. Introduction	107
IV-2. Etude géostatistique de quelques paramètres de l'hydrodynamique et de la salure.	107
IV-3. Essai de simulation spatiale.	124
CONCLUSION	127

	Page
DEUXIEME PARTIE: UTILISATION DE L'EAU USEE POUR LA RECUPERATION DES SOLS SALES.	128
INTRODUCTION	
I- RECHERCHES PRELIMINAIRES DE TERRAIN	130
I-1- Etude d'un modèle de dessalage naturel d'un sol	130
1.1- Introduction	130
1.2- Matériels et Méthodes	130
1.3- Résultats	131
1.4- Discussion	135
I-2- Etude préliminaire au champ de l'effet d'une pré- irrigation à l'eau usée sur un sol salé	135
2.1- Matériels et Méthodes	136
2.2- Résultats	137
2.3- Conclusion	138
II- EXPERIMENTATION PRELIMINAIRE DE LABORATOIRE	139
II-1-Essai de percolation sur colonne de terre remaniée de Kairouan avec l'eau usée en présence d'un amendement calcaïque	139
1.1- Matériels et Méthodes	139
1.2- Les résultats	140
1.3- Conclusion	145
II-2-Etude de l'effet de l'eau usée traitée sur l'activité biologique du sol	147
2.1- En condition aérobie	147
2.2- En condition anaérobie	148
III- ESSAI AU CHAMP D'UNE CULTURE DE COTONNIER SUR SOL SALE IRRIGUE A L'EAU USEE TRAITEE	149
III.1- Matériels et Méthodes	149
III.2- Résultats	151
III.3- Conclusion	158
IV- EXPERIMENTATION SUR LE DESSALAGE DU SOL DE KAIROUAN RECONSTITUE EN CASE LYSIMETRIQUE	158
IV.1- Matériels et Méthodes	158
IV.2- Résultats	160
IV.3- Conclusion	160

	Page
EXPERIMENTATION SUR L'UTILISATION DE L'EAU USEE TRAITEE EN IRRIGATION DE 3 TYPES DE SOLS EN CASES LYSIMETRIQUES	161
V.1- Matériels et Méthodes	161
V.2- Résultats	168
V.3- Conclusion	173
CONCLUSIONS GENERALES	174
Bibliographie	178
Annexes	181

PREMIERE PARTIE

RECHERCHE SUR L'EVOLUTION DES SOLS IRRIGUES AVEC
DES EAUX DE QUALITE DIFFERENTE PAR L'UTILISATION
DE LA METHODE DE SIMULATION NUMERIQUE

INTRODUCTION

La recherche de l'intensification agricole ,voire seulement de l'autosuffisance alimentaire de notre pays, doit passer impérativement par l'utilisation de l'irrigation qui, seule, permet la rationalisation de l'alimentation en eau des cultures, et la réalisation de plusieurs récoltes chaque année sur la même sole. Or ce développement intensif ne va pas sans risques, dans le cas où le climat est de tendance aride et lorsque l'eau, de plus en plus rare, est de qualité médiocre, deux conditions qui se trouvent malheureusement souvent réunies.

Il existe donc un besoin pressant de méthodes permettant de s'assurer de la réalité des risques de salinisation secondaire, et d'intervenir sur la conduite de l'irrigation pour en limiter les effets nocifs.

C'est le grand domaine de la simulation des processus pédologiques, dont les retombées fondamentales sont évidentes pour la compréhension fine de ces processus et dont les applications peuvent autoriser de grands espoirs.

Cependant, aussi fouillé soit-il, un modèle de simulation est toujours une simplification plus ou moins drastique de la réalité. Par ailleurs, les modèles trop compliqués peuvent être délicats à utiliser d'une manière courante, et demander l'emploi de matériels onéreux.

Il faut donc tenter la gageure de sélectionner des modèles de simulation relativement simples et faciles à utiliser sans connaissances particulières du calcul numérique et de l'informatique, utilisables sur des matériels courants, mais suffisamment précis pour donner des indications d'évolution dans une fourchette de fiabilité raisonnable.

Cette première partie du présent rapport comporte 4 chapitres:

Le premier rappelle l'état des connaissances en Tunisie sur la prévision de l'évolution de la salure des sols irrigués, le second est consacré à l'analyse structurale du milieu-sol pour la détermination des paramètres physico-chimiques et hydrodynamiques qui sont indispensables au fonctionnement du modèle. La simulation des processus étudiés et le calage du modèle font l'objet du troisième chapitre. Le quatrième chapitre est destiné à l'extrapolation des résultats de la simulation ponctuelle à l'ensemble du périmètre.

Notons que lors de l'exécution du programme de travail des difficultés nous ont contraint à modifier certaines opérations initialement prévues.

Il faut signaler en outre que nos recherches ont été axées plus sur le périmètre de ZELBA, dont les travaux ont démarré beaucoup plus tôt que ceux de la Haute Vallée de la Mejerdah.

I- OBJECTIFS DE LA RECHERCHE SUR L'EVOLUTION DE LA SALURE DANS LES PERIMETRES IRRIGUES

I-1. Etat de la question en 1984 en Tunisie

Les études sur la prévision de l'évolution de la salure dans les périmètres irrigués en TUNISIE ont fait l'objet de différents travaux de recherches et ont passé par des stades divers dont nous ne retenons que les plus importants et qui se succèdent dans le temps comme suit :

- les recherches en station effectuées par le CRUESI de 1962 à 1969.
- les recherches sur monolithes de sol dans la Haute Vallée de la MEJERDAH, 1977.
- les recherches de modélisation numérique, effectuées par la Direction des Sols et l'ORSTOM, de 1977 à 1983,
- les recherches de modélisation ponctuelle et de simulation par le modèle SIMUL de 1983 à nos jours.

I-1.1. La recherche en station : Les travaux du CRUESI

Après l'indépendance, la TUNISIE s'est trouvée dans l'obligation de développer son agriculture et de la diversifier. Parmi les mesures entreprises figure l'extension de la surface des sols irrigués et l'augmentation de la contribution des périmètres irrigués dans la production agricole nationale. Ce choix a nécessité de recourir à des eaux de plus en plus salées.

La salinisation des sols avait fait déjà l'objet d'études dès 1935 (G. NOVIKOFF, L. YANKOVICH, P. DESSUS et R. SABATHE) mais la première étude de grande envergure réalisée en TUNISIE et qui garde toujours son actualité est celle effectuée par le CRUESI (programme UNESCO/PNUD, 1962-1969).

Le CRUESI s'était fixé pour tâche essentielle d'étudier l'évolution dans le temps de la salure des sols et des rendements agricoles pour des terrains arrosés avec différentes qualités d'eau et selon divers programmes, l'objectif final étant de fournir les éléments devant permettre les décisions relatives à la valorisation des ressources en eau et en sol. L'accent a été mis en général sur l'étude des problèmes en plein champ. Les stations expérimentales ont été choisies de façon à couvrir les combinaisons les plus importantes qui se présentent en Tunisie du point de vue du sol, de l'eau d'irrigation et de la pluviosité. Les recherches ont concerné :

- l'effet de l'eau salée sur le sol,
- la croissance et le développement des cultures sur un sol arrosé à l'eau salée.

Il s'est avéré que :

- la salinisation du sol a une action défavorable sur les cultures,et plus elle croît plus la fertilité baisse,
- la salinisation n'est pas un phénomène irréversible et il est même assez facile,à condition évidemment que l'aménagement de base soit prévu à cet effet ,de faire baisser la salure du sol.

Une lutte préventive mettant en jeu la qualité des irrigations et du drainage,et une lutte curative pour la détection du danger et la réalisation du lessivage ont été conseillées.

I-1.2. Les recherches par modélisation numérique

Prédire,prévoir,simuler,modéliser...de telles actions ont toujours été recherchées dans tous les domaines.Dans le cas des sols irrigués la chose n'a été possible qu'avec la deuxième génération des ordinateurs et une génération de chercheurs sensibilisés à l'apport de l'informatique dans une telle activité . C'est ainsi que depuis une vingtaine d'années,les premiers modèles de simulation ont vu le jour.

En TUNISIE ,les premiers travaux datent d'une dizaine d'années.Néanmoins une étape de la simulation consiste à recueillir les données nécessaires à la caractérisation hydrodynamique du site "in situ",il est par conséquent utile de mentionner les principaux travaux qui ont utilisé l'essai de drainage interne et de bilan naturel car ils ont contribué d'une manière ou d'une autre à l'élaboration des études de modélisation entreprises en TUNISIE.

HILLEL et al.(1972),VACHAUD et al.(1978) et autres auteurs ont développé les méthodes expérimentales de mesure.Ces méthodes ont été utilisées en TUNISIE ces dernières années par MECHERGUI(1980), VACHAUD, VAUCLIN et COLOMBANI(1981),VACHAUD,ZATY, VAUCLIN,AMAMI et CHABOUNI(1982) VALLES et al(1983)et BOU SNINA(1984).

I-1.2.1. Modélisation de l'évolution de la salure dans la Haute Vallée de la MEJERDAH (Division des Sols / Louvain La Neuve)

La première étude de simulation proprement dite est celle réalisée dans le cadre du projet d'aménagement hydro-agricole du barrage de BOU HEURTHMA dans la Haute Vallée de la MEJERDAH.Cette étude a été effectuée par T. CHATTAOUI, S. DUFEY et H.LAUDELOUT(1977)"Simulation physique et mathématique du mouvement des sels dans les sols de la Haute Vallée de la MEJERDAH de TUNISIE".

L'approche a consisté à utiliser parallèlement la simulation physique et la modélisation mathématique du mouvement des

sels dans le profil .L'objectif était de permettre une extrapolation de nature à faciliter la prise de décision concernant certaines des options à prendre dans la gestion du périmètre en cours de développement.

Les techniques utilisées ont été les suivantes:

a) Simulation physique du mouvement des sels

Des colonnes de sol intact ont été prélevées.Des expériences de lessivage sur colonne ont été faites.Les différents traitements consistaient à utiliser pour le lessivage l'eau de BOU HEURTHMA seule,avec une quantité de gypse,et l'eau de la MEJERDAH seule ou avec du gypse.Des méthodes analytiques et radiochimiques ont été utilisées pour le suivi du lessivage.

b) Méthodes numériques

La simulation physique du mouvement des sels a servi à la validation du modèle en l'ajustant sur les résultats obtenus . C'est alors qu'ils ont pu procéder à des expériences de simulation sur des sols divers de la Haute Vallée,puis pour un type de sol donné procéder à des apports d'eau d'irrigation de composition variable.

L'étude a permis de formuler des recommandations pratiques quant à l'utilisation de ces eaux pour l'irrigation ,l'addition d'une quantité de gypse et les évolutions probables de l'ESP et du SAR.

I-1.2.2.Les travaux de l'équipe Direction des Sols/ORSTOM

a) Recherches sur monolithe

Des études préliminaires ont été réalisées sur un monolithe de sol argileux de grande taille représentatif d'un secteur de la Basse Vallée de la MEJERDAH,prélevé à la station de CHERFECH (C.R.G.R.).

Les buts de ces recherches étaient de:

-tester les méthodes de caractérisation hydrodynamique du sol par un essai d'infiltration en drainage interne et bilan naturel , en contrôlant complètement les entrées et les sorties,

-tester les mesures de salure effectuées à l'aide de capteurs divers (salinity-sensors,sondes quadripôles,électrodes spécifiques) complétés par des extractions par bougies poreuses.

Dans un premier rapport(VIEILLEFON et al,1982),on a pu mettre en évidence,par traçage isotopique au tritium,l'existence de domaines de porosité dans lesquels les vitesses de circulation sont très différentes.

Une modélisation de type "réservoirs connectés" permet de restituer avec une bonne précision les sorties en drainage, mais donne apparemment une valeur trop faible à la microporosité. Parallèlement, la conductivité hydraulique a pu être estimée à partir des relations tensio-neutroniques, méthodes qui seront largement utilisées dans le présent travail sur le terrain.

Les expériences ont été ensuite poursuivies avec des quantités et des qualités d'eau variées pour suivre l'évolution de la salure (VALLES 1982). Les résultats ont montré que l'emploi de la sonde à neutrons en sol très argileux (45%) demande certaines précautions. Les relations entre la succion et la teneur en eau ($h(\theta)$) s'étant révélées très fiables, les mesures tensiométriques ont servi à l'estimation des teneurs en eau, et un modèle de transfert a été testé.

Par ailleurs, les capteurs de salure ont bien fonctionné. Au cours des expériences réalisées on a obtenu des réponses immédiates pour les bougies poreuses et les sondes quadripôles, mais par contre un certain décalage, de quelques heures à un jour, avec les salinity-sensors.

Ces expériences ont par ailleurs montré que les capteurs ne renseignent que sur les zones immédiatement adjacentes. Les précipitations qui ont lieu près de la surface ne sont pas signalées par le capteur situé à 10 cm de profondeur.

D'autre part, les précédentes hypothèses sur les relations existant entre la conductivité électrique globale et les teneurs pondérales en sels du sol (VIEILLEFON, EL OUMRI 1984), ont été confirmées (VALLES et al 1983). Cela permet de prévoir l'utilisation des sondes quadripôles pour suivre la salinisation ou la désalinisation du sol en cours d'utilisation agricole.

b) Modélisation

Divers essais de modélisation ont donc été réalisés à l'aide des expériences sur le monolithe.

L'étude très poussée de VALLES (1985) a conduit à de très bons résultats en utilisant jusqu'à trois classes de porosité et en couplant à un modèle géochimique qui tient compte des échanges sol/solution, ainsi que des phénomènes de précipitation-dissolution de la calcite et du gypse.

On met ainsi en évidence la précipitation du gypse en dessous de la zone racinaire, phénomène dont on verra plus loin l'importance.

Les variations de teneur en eau étant d'allure différente suivant les classes de porosité, les résultats peuvent être plus précis que dans un modèle global où la concentration de la solution du sol permettant de favoriser la précipitation de ce minéral se fait plus tardivement que dans la classe de porosité asséchée la première. Il en résulte que le gypse précipiterait de

préférence dans la "macroporosité" et la calcite dans la "microporosité".

Cependant, la méthode ci-dessus n'étant encore qu'expérimentale, nous avons utilisé pour nos simulations le modèle global SIMUL (RIEU 1983). On reviendra plus loin sur les caractéristiques de ce modèle qui a été largement utilisé pour ce travail. Les irrigations pratiquées sur le monolithe ont d'ailleurs permis de valider le modèle.

I-2. Les résultats des simulations de la période 1982-1984

Les procédures préalablement testées sur le monolithe, c'est-à-dire caractérisation hydrodynamique par suivi tension-neutronique d'un essai d'infiltration et modélisation avec SIMUL ont été appliquées sur le terrain sur une parcelle irriguée par aspersion dans la Haute Vallée de la MEJERDAH (BRAHMI).

Les études menées de 1982 à 1984 (OCHI 1984, BENZINA, RIEU 1984) ont donné les résultats suivants:

- la caractérisation hydrodynamique a nécessité une irrigation importante en raison de la nature argileuse du sol et de la faible structuration; le drainage interne est médiocre,
- la prise en compte de 3 horizons de sol qui est une des contraintes du modèle SIMUL semble ici suffisante,
- le calage du modèle a été réalisé sur un essai d'infiltration et a bien reproduit le profil hydrique mesuré sur le terrain après 5 jours de ressuyage, de même que pour les stocks d'eau des différents horizons,
- le calage chimique, contrôlé par les profils de Cl et de Na obtenus au bout de 7 jours donne un bon accord pour le sodium pour la moitié supérieure du profil, mais il est moins bon pour l'ion chlorure,
- un essai de prédiction de l'évolution de la salure a été effectué sur une saison agricole pour deux cultures différentes (maïs-vesce-avoine et betterave) et deux qualités d'eau; l'évolution hydrique prévue est bien le reflet des apports d'eau envisagés normalement et de la consommation théorique des cultures.

L'évolution de la salinité diffère en fonction de celle de l'eau d'irrigation employée et des quantités utilisées, eu égard aux précipitations d'hiver normales. Bien entendu l'eau la plus chargée a tendance à saliniser le sol, les horizons supérieurs étant seuls partiellement lessivés par les pluies d'hiver. Celle-ci a également tendance à précipiter du gypse ce qui a pour conséquence de diminuer légèrement l'effet de salinisation mais par contre on peut s'attendre à une poussée d'alcalinisation.

On notera cependant qu'il s'agit ici seulement d'hypothèses d'évolution qui n'ont pu être contrôlées, le calage du modèle n'ayant été réalisé que sur une courte période d'un essai d'infiltration.

I-3. Les actions programmées pour la période 1984-1987

Les études rapportées ci-dessus ont suffisamment montré que les techniques de caractérisation tensio-neutroniques et l'utilisation de capteurs de salure permettent de contrôler correctement la dynamique de l'eau et des sels, non seulement sur des monolithes de sols, mais aussi sur des parcelles au champ.

De même, le modèle SIMUL a semblé parfaitement adapté à la simulation des transferts verticaux dans les conditions d'une expérimentation de terrain.

Cependant, afin de pouvoir généraliser cette approche, d'un intérêt technique et économique évident, il convenait de s'assurer de la possibilité de l'utiliser dans la plupart des cas de figure que l'on est susceptible de rencontrer dans les périmètres irrigués où peuvent être employées des eaux de charges variées.

Dans ce but, et en exécution du programme défini dans notre projet de recherche pour la période 1984-1987, deux expérimentations rigoureuses ont été conduites sur le terrain au cours de cette période, sur deux périmètres différents, l'un situé dans le Centre tunisien (région d'EL JEM), sur sol initialement non salé non hydromorphe qui devait être irrigué par submersion à partir d'un forage produisant de l'eau saumâtre (environ 4,5 g/l), et l'autre, dans la Haute Vallée de la MEJERDAH, sur sol salé hydromorphe récemment assaini par un important réseau de drainage, devant être irrigué par aspersion à l'aide d'eau peu salée.

Au cours de ces expériences, dont le suivi a porté sur plusieurs saisons agricoles, des prélèvements de contrôle ont été programmés afin de pouvoir intervenir éventuellement sur les paramètres de la simulation dans le cas où des transformations importantes viendraient modifier le comportement hydrique des sols. Ceci notamment dans le cas du sol d'EL JEM, dont le régime hydrique antérieur à l'aménagement était beaucoup plus sec.

En effet, ce n'est qu'à l'issue d'un contrôle de plusieurs mois qu'il pourrait être possible d'utiliser ces paramètres pour tester une prévision à long terme.

Enfin, comme on le verra plus loin, ces recherches étaient l'occasion d'adapter la modélisation à un travail de routine, en essayant de rendre les programmes plus souples et plus aisés à exécuter, et sur du matériel moins sophistiqué (programmes en BASIC sur microordinateur de bureau).

II- ANALYSE STRUCTURALE DU MILIEU-SOL POUR LA DETERMINATION DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES ET HYDRODYNAMIQUES

II-1. Choix des stations et caractérisation des sites

Nous avons orienté notre choix selon les axes principaux suivants, jugés nécessaires d'ailleurs:

-poursuivre les simulations dans la Haute Vallée de la MEJERDAH ,en les appliquant cette fois à un sol originellement salé hydromorphe,aménagé par drainage;

-essayer la même approche sur un sol bien drainé à l'origine,de la zone semi-aride,devant être irrigué à l'eau salée.

Les sites expérimentaux correspondant à ces deux milieux sont localisés respectivement à SOUK SEBT , sur un périmètre de 120 ha, et à ZELBA, sur un autre périmètre de 60 ha.L'implantation de ces sites a été guidée par les observations pédologiques et les mesures physico-hydriques préalablement faites.

II-1.1.Périmètre de ZELBA

II-1.1.1.Données générales

a)Situation

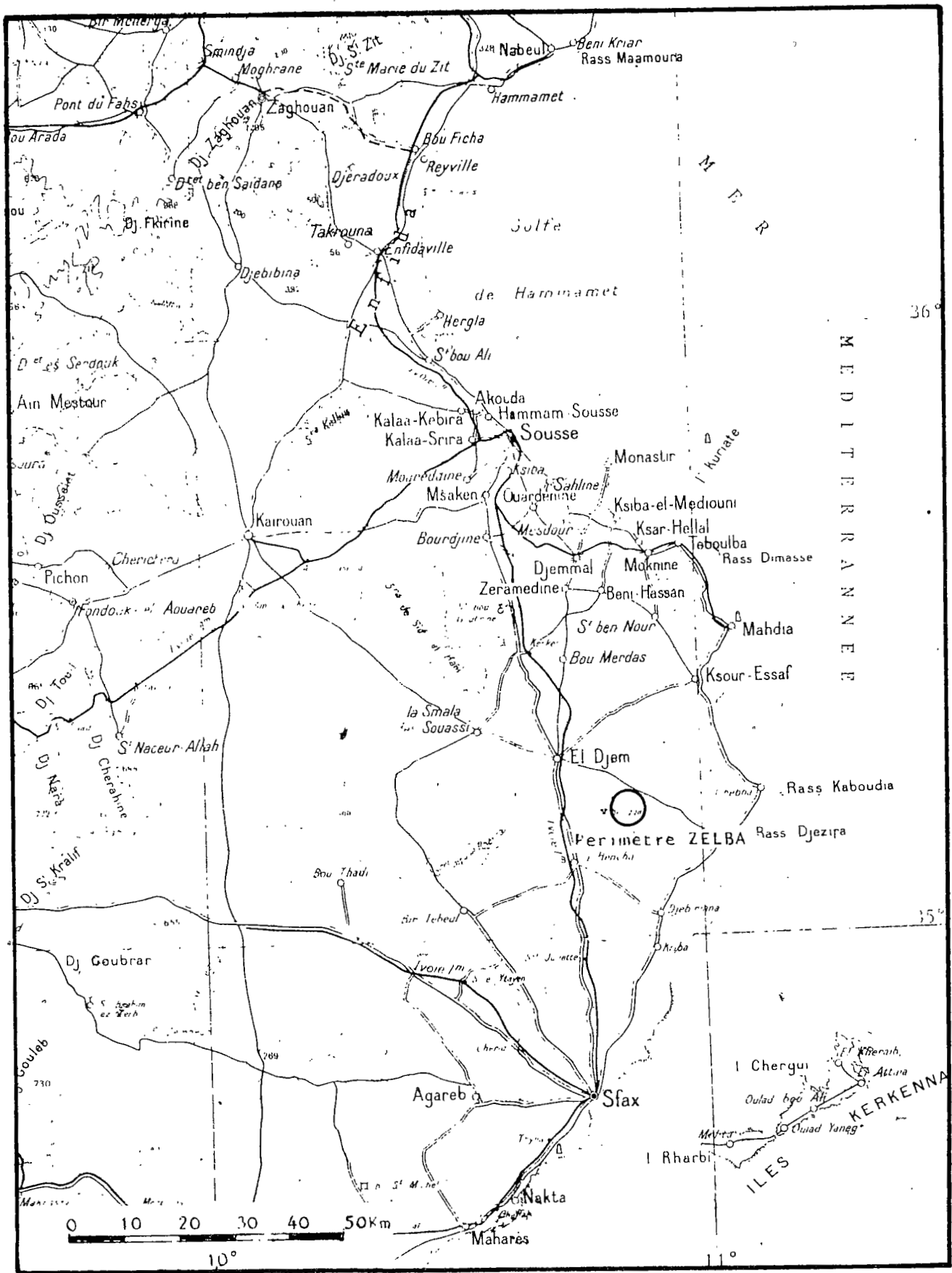
Le périmètre irrigué de ZELBA,situé à 15 km au Sud-Est d'EL JEM(Fig.I-1),couvre 60 ha et fût crée en 1985 autour du forage ZELBA -I (N° BIRH 17796/4)implanté au milieu d'une plaine alluviale se situant au terme d'un important oued ,principale origine des dépôts alluviaux épandus dans la plaine .Ces dépôts ont été mis en place à la suite de périodes érosives très agressives qui ont affecté le flanc Est ,à pente très douce,du plateau d'EL JEM où affleurent particulièrement des argiles et des marnes à gypse ,ainsi que des limons à nodules calcaires.Les matériaux de la plaine de ZELBA prennent essentiellement leur origine dans ces matériaux à nodules calcaires.En effet ,partout dans la plaine le profil est enrichi en ces concentrations calcaires qui sont d'origine allochtone puisque aucun lien n'existe entre ces traits pédologiques et la matrice limono-argileuse du sol.Cependant de nouvelles concentrations,mais de nature tendre, apparaissent dans le profil et à des proportions relativement plus importantes que les nodules véhiculés par l'érosion.

b) Climat

La région d'EL JEM se caractérise par un climat aride à étage supérieur ,à variante à hiver doux.

La pluviométrie annuelle moyenne est de l'ordre de 267 mm,avec une irrégularité marquée.L'ETP annuelle est de l'ordre de 1000 mm(ETP THORNTHWAITE) .

Fig. I-1 .Carte de situation du périmètre irrigué de Zelba



c) Morphologie de la région

La morphologie de la région comprend :

-une plaine alluviale où alternent d'une façon très désordonnée les dépôts de limons à nodules et la croûte calcaire qui commence à dominer en s'approchant de la côte , vers CHEBBA ,MELLOULECHE. Ces matériaux se localisent particulièrement à l'aval des oueds qui descendent le plateau d'EL JEM.

-Des buttes témoins ,en nombre très limité,couronnées de croûtes calcaires et la plupart du temps de ruines romaines et puniques,ayant une altitude plus élevée de quelques dizaines de mètres par rapport aux matériaux environnants.Ces buttes ont été isolées par les flux très forts des crues d'oueds lors des périodes rhéxistatiques ou érosives.

-Le flanc Est du plateau d'EL JEM où alternent des vallées alluviales peu encaissées et des collines encroûtées à surfaces entièrement dénudées par l'érosion .La croûte y affleure en conséquence en de larges surfaces.

Le périmètre ,compte-tenu de l'inexistence de milieux favorables en dehors de ces plaines,a été implanté sur les matériaux limoneux à l'aval de l'Oued ARJOUN,et tout près d'une monticule où a été construit le bassin d'irrigation qui reçoit les eaux de refoulement du forage.

d) Aménagement et irrigation projetée

Le périmètre a été d'abord nivelé,puis partagé en 20 lots de 3 ha chacun.Une conduite principale de 159 mm de diamètre ramène l'eau jusqu'à l'extrémité supérieure du périmètre .Des conduites secondaires de 108 et 89 mm,équipées de vannes de distribution au niveau de chaque lot,traversent le périmètre dans le sens Est-Ouest jusqu'à son extrémité orientale.

Le débit d'irrigation est estimé à 36 l/s et est distribué aux agriculteurs suivant un tour d'eau qui tient compte des cultures pratiquées : coton , luzerne , grenadier , orge en vert, sorgho,marâchage ...

Les quantités distribuées sont en général inférieures aux quantités estimées puisqu'une defectuosité dans la construction du bassin et les pannes fréquentes du matériel de pompage réduisent les quantités refoulées;ainsi durant les périodes de pointe,la majorité des agriculteurs sont insatisfaits du débit qui leur est fourni.

II-1.1.2.Caractéristiques pédologiques en rapport avec l'hydrodynamique

a) Texture et structure

Les sols isohumiques occupent la majeure partie du

périmètre. L'organisation verticale est partout la même. Cependant, quelques différences s'observent au niveau de la texture et du degré d'accumulation calcaire. La texture est généralement limoneuse à limono-argileuse.

b) Mesures de la perméabilité in situ (méthode PORCHET): Calcul de la perméabilité à saturation par horizon

Nous avons utilisé, dans le but de déterminer la variabilité spatiale de la perméabilité, des mesures de la perméabilité par la méthode PORCHET.

Le calcul de la perméabilité des horizons du sol a été réalisé par traitement automatique. Déjà COLOMBANI et al (1972) ont procédé à ce calcul avec choix préalable des limites des horizons.

En se basant sur cette étude, J. VIEILLEFON (1985), a apporté les améliorations adéquates pour une détermination statistique des couches ou horizons de perméabilités différentes.

Pour ce faire, un programme de calcul a été mis au point: programme "PERPOR".

Il s'agit de 37 mesures dont certaines ont été refaites quand on a constaté, pour une mesure donnée, que la dernière lecture faite ne dépassait pas les cinquante centimètres. La répartition des points de mesures n'est ni complètement aléatoire, ni régulière.

Les mesures (Tableau I-1) ont fait l'objet d'une étude géostatistique (voir chapitre- 4).

Les résultats obtenus sont en rapport, soit avec les successions granulométriques, soit le plus souvent avec l'apparition d'accumulations plus ou moins importantes de calcaire.

Les mesures ayant été faites sans saturation préalable et parfois à des profondeurs insuffisantes, permettent cependant dans quelques cas, de montrer une assez bonne relation entre les profondeurs de limites de perméabilité déterminées par le calcul, et les limites d'horizons résultant des descriptions pédologiques. Si dans les horizons supérieurs, généralement plus sableux, la perméabilité estimée se situe aux environs de $10E-2$ cm/s, jusqu'à une profondeur qui peut atteindre 50 à 60 cm, les horizons sous-jacents, généralement enrichis en calcaire ou nettement plus argileux, sont moins perméables: $10E-4$ à $10E-3$ cm/s.

Ces mesures ont été complétées par une série de perméabilité MUNTZ pour les horizons superficiels. Les résultats obtenus, compte tenu de la différence de méthode par rapport à PORCHET, sont grossièrement proportionnels à ceux présentés ci-dessus, dans un rapport de 1 à 4, soit 4 fois plus faibles.

Tableau I-1. Perméabilités PORCHET obtenues par traitement automatique avec le programme PERPOR-ZELBA

Point de mesure	Niveau en cm	Valeur des perméabilités PORCHET
1	9.0-22.1	1.93 E-2
	22.1-130.5	6.12 E-5
1'	9.5-32.2	4.086 E-3
	32.2-83.0	1.857 E-4
2	10.0-97.0	1.536 E-4
2'	8.5-31.6	5.545 E-3
	31.6-82.5	1.970 E-4
3	12.3-40.4	3.382 E-3
	40.4-73.9	1.537 E-4
4	6.0-43.2	4.947 E-4
	43.2-70.0	1.059 E-4
4'	18.0-99.8	7.270 E-4
	99.8-112.3	4.123 E-3
	112.3-120.0	3.929 E-4
5	12.0-21.7	9.195 E-3
	21.7-67.5	8.052 E-5
5'	14.0-76.6	5.87 E-3
	76.6-118.0	1.86 E-5
6	9.0-10.7	8.567 E-2
	10.7-75.5	1.865 E-4
6'	9.0-39.5	2.992 E-3
	39.5-67.0	1.079 E-4
7	23.0-84.2	5.303 E-3
	84.2-120.4	2.998 E-4
8	8.0-95.0	1.979 E-4
8'	10.0-134.5	1.238 E-3
9	9.0-105	2.848 E-4
9'	9.0-22.1	1.93 E-2
	22.1-130.5	6.12 E-5
10	9.0-45.5	5.084 E-4
	45.5-70.0	1.413 E-4
10'	14.0-68.0	1.69 E-4
	68.0-81.0	5.17 E-5

Point de mesure	Niveau en cm	Valeur des perméabilités PORCHET
11	13.0-93.9	6.572 E-4
	93.9-127.0	1.026 E-4
11'	9.0-88.8	3.39 E-3
	88.8-111.0	4.35 E-4
12	10.0-16.7	9.342 E-3
	16.7-19.0	5.400 E-2
	19.0-34.7	9.008 E-4
	34.7-56.0	6.802 E-5
12'	13.0-54.6	2.19 E-3
	54.6-78.8	1.60 E-4
13	16.0-26.7	1.035 E-2
	26.7-66.2	1.807 E-4
13'	10.0-40.2	7.49 E-3
	40.2-99.0	1.85 E-4
14	12.5-124.7	7.592 E-4
14'	9.0-72.2	9.12 E-4
	72.2-87.0	8.34 E-5
15	13.0-37.8	3.426 E-3
	37.8-96.0	5.479 E-5
15'	10.0-37.9	8.80 E-3
	37.9-76.0	5.63 E-4
16	10.0-14.5	1.747 E-2
	14.5-106.0	9.077 E-5
16'	10.0-24.8	1.08 E-2
	24.8-106.0	3.66 E-5
17	18.0-130.2	6.330 E-4
17'	9.5-32.2	4.086 E-3
	32.2-83.0	1.857 E-4
18	12.0-115.0	2.060 E-3
19	9.0-131.0	6.450 E-4
20	24.5-123.2	3.398 E-3
	123.2-125.5	4.174 E-4
20'	8.4-78.5	1.25 E-4

On notera enfin que la perméabilité globale est un peu plus forte dans les profils où l'horizon à amas et nodules calcaires apparaît plus près de la surface.

Ces données combinées (texture et perméabilité), qui ont servi dans un premier temps, à déterminer un "zonage" du périmètre ont été intensément exploitées pour l'extrapolation spatiale des résultats de la simulation.

II-1.1.3. Analyses de profils sélectionnés

Dans un autre domaine, en sus des profils échantillonnés et analysés lors de l'étude de reconnaissance, des profils intermédiaires et des profils à la tarière ont été réalisés, ce qui a permis d'esquisser une carte de la répartition en profondeur des accumulations calcaires. Cette carte a été reprise dans l'analyse géostatistique.

Les analyses de ces divers prélèvements permettent de mettre en évidence une relation de proportionnalité entre les teneurs en argile et en calcaire total, jusqu'à un seuil qui se situe aux environs de 25-28 % d'argile au dessus duquel on n'observe plus de relation.

Ainsi en moyenne, il apparaît que les horizons supérieurs (0-20 cm) contiennent de 13 à 21 % d'argile et de 8 à 14 % de calcaire total, tandis que les horizons profonds en ont de 28 à 36 % pour l'argile, et de 20 à 36 % pour le calcaire total. Enfin le pH est partout très élevé: 8.8 à 9.1.

II-1.1.4. Choix de la parcelle d'essai

Pour des raisons pratiques de proximité de la source d'irrigation et faute de terrain disponible au milieu du périmètre, nous avons choisi notre parcelle à la limite Nord-Ouest de celui-ci, là où les tâches d'encroûtements calcaires commencent à 55 cm.

La parcelle d'essai couvre une surface de 400 m². Elle est située à 20 m environ de la conduite principale d'où une sortie a été aménagée et orientée vers la station. L'eau est en conséquence disponible à tout moment et en quantités largement suffisantes pour irriguer, en un temps court, la totalité de la parcelle.

a) Description du sol

De point de vue classification (CPCS), il s'agit d'un sol brun isohumique, sous-groupe modal.

Le profil décrit dans la station montre les caractéristiques suivantes:

- 0-20 cm Texture limono-sableuse, couleur 7.5 YR 6/4, structure polyédrique subanguleuse peu nette, racines très nombreuses, présence de coquilles, turricules et débris de poterie.
Forte effervescence généralisée avec HCl.
- 20-55 cm Texture limono-argileuse, couleur 10 YR 4/4, structure prismatique nette avec sous-structure polyédrique anguleuse, racines nombreuses, présence de coquilles et de turricules.
Forte effervescence généralisée avec HCl.
- 55-75 cm Texture argilo-limoneuse, couleur 10 YR 6/4, structure polyédrique anguleuse nette, amas calcaires (3%), on observe un noyau nodulaire au milieu de l'amas.
Forte effervescence généralisée avec HCl.
- 75-165 cm Texture argilo-limoneuse, couleur 10 YR 6/6, structure polyédrique anguleuse nette, amas calcaires (10 %), généralisés, sans distribution particulière.
Forte effervescence généralisée avec HCl.

D'après les analyses physico-chimiques (Tableau I-2), nous constatons:

- une légère augmentation de la teneur en argile en profondeur (Fig. I-2).
- une texture limono-sableuse en surface qui devient limono-argileuse en profondeur.
- le taux du calcaire total (CT) est de l'ordre de 12-14 % entre 0 et 60 cm; avec l'apparition des amas calcaires entre 55 et 75 cm, ce taux augmente à 23 %. Dans l'horizon à amas calcaires, ce taux passe à plus de 32%.
- une conductivité électrique faible sur l'ensemble du profil.

Tableau I-2 .Extrait de l'analyse du profil-ZELBA

Profondeur	A %	Lf%	Lg%	Sf%	Sg%	pH	CE	CT%	CA%
0-15	12	20	22	37	8	8.6	0.8	12	8
45-60	16	17	26	30	8	8.7	0.6	14	8
75-90	19	25	18	28	8	8.8	1.3	32	20
90-105	24	20	18	28	8	8.8	1.3	35	20
135-150	20	20	18	32	7	8.9	1.4	33	21

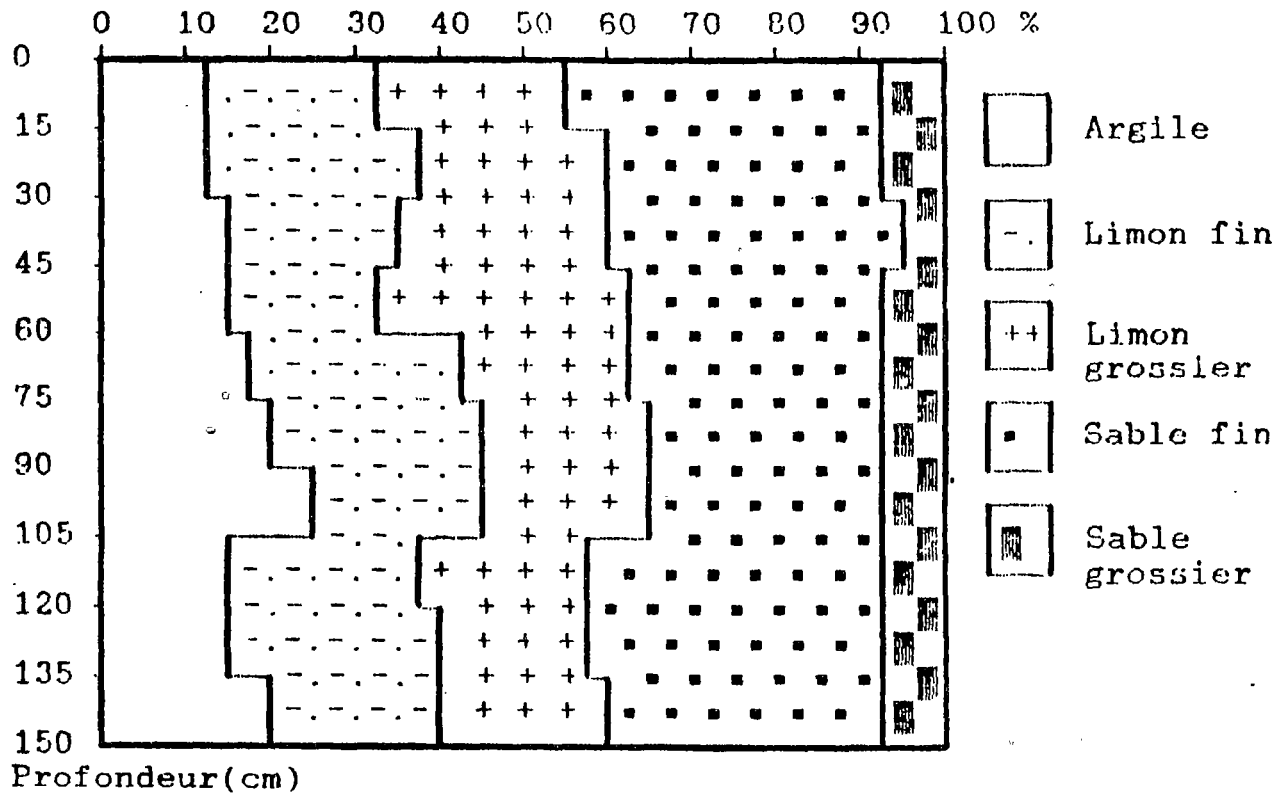


Fig. I-2 . Composition granulométrique - ZELBA.

b) Eau d'irrigation utilisée

L'eau d'irrigation provient d'un forage situé à 500 m de la parcelle d'essai. Cette eau possède les caractéristiques suivantes (Tableau I-3) :

Tableau I-3 .Composition chimique de l'eau d'irrigation

pH	RS g/l	CE mmh	Na me/l	Ca me/l	Mg me/l	K me/l	Cl me/l	SO4 me/l	HCO3 me/l	SAR	ESP
7.9	4.5	7.0	48.0	15.0	17.0	0.7	43.2	22.1	5.0	14	16

Le faciès géochimique de la solution est chloruré-sodique.

Il s'agit d'une eau dangereuse qui ne peut être employée qu'avec beaucoup de précaution. Les risques d'alcalinisation sont élevés.

II-1.2. Périmètre de SOUK SEBT

II-1.2.1. Données générales

a) Situation

Le périmètre de SOUK SEBT est situé dans la plaine alluviale de la Haute Vallée de la MEJERDAH, à mi-distance de BOU SALEM et JENDOUBA (Fig. I-3).

Le périmètre choisi, limité par deux affluents de la MEJERDAH: TESSA et MELLEGUE, couvre une superficie de 120 ha. Excepté ces deux affluents, le réseau hydrographique au niveau de la plaine de SOUK SEBT est peu constitué, d'ailleurs on constate une hydromorphie temporaire en saison pluvieuse.

b) Climat

Il s'agit d'un climat du type méditerranéen, catégorie des climats semi-arides supérieurs, à hiver tempéré.

La pluviométrie annuelle est de l'ordre de 470 mm/an (JENDOUBA).

L'ETP PENMAN mesurée à JENDOUBA est de 1397 mm/an.

Ce régime pluvial ne traduit pas le régime hydrique des sols du périmètre. Ce dernier bénéficie en plus de l'apport des eaux de pluies, des eaux de ruissellement et de drainage, ce qui entraîne un engorgement temporaire des sols.

c) Cadre géologique et typologie des sols

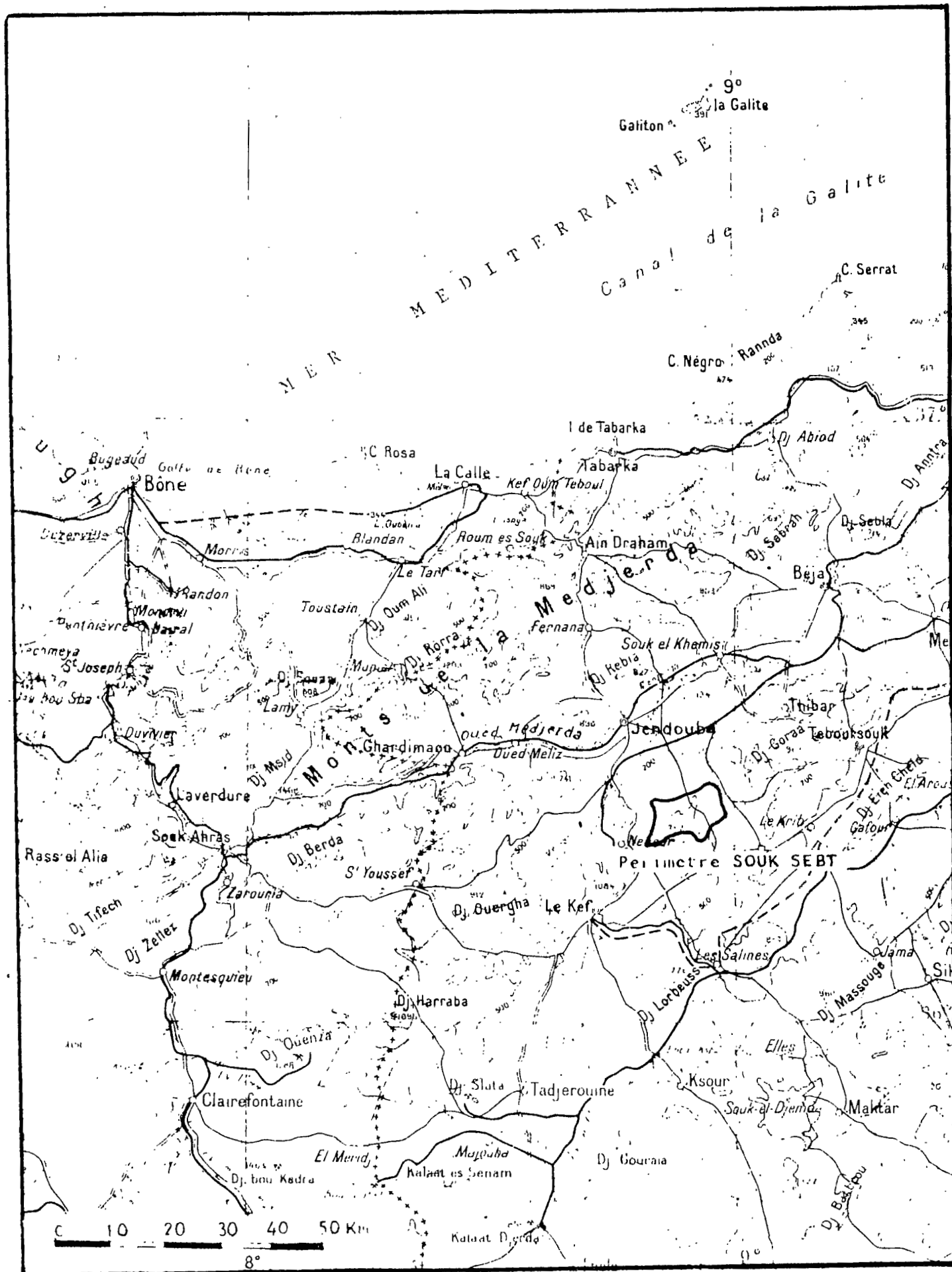
Le bassin de la MEJERDAH représente un fossé tectonique qui s'est formé dans un passé géologique récent entre la KROUMIRIE au Nord et la zone des dômes au Sud. Il est situé ainsi presque entièrement dans l'unité tectonique de la zone des écaïlles.

Les formations de la rive droite de la MEJERDAH contiennent beaucoup plus de calcaire et de marne de l'éocène, avec aussi du grès de Numidie et une partie du Pontien. Ces matériaux livrent après décomposition beaucoup d'argile et de limon.

D'après la carte des dépôts géologiques (Fig. I-4), établie dans l'étude d'avant-projet de BOU HEURTHMA (AGRAR, 1977), la station d'essai se situe dans une zone comblée d'alluvions variables, probablement de la TESSA.

Les dépôts de la TESSA se caractérisent par une texture variable, contrairement aux dépôts de la MEJERDAH et du MELLEGUE, qui sont plutôt de textures lourdes (argileuses, argilo-limoneuses) au Sud-Est de JENDOUBA.

Fig. I-3. Carte de situation du périmètre irrigué de Souk Sebt



Dans presque la totalité de la plaine, la pente ne dépasse rarement le 1 %. Cet aspect topographique de la plaine explique l'évolution des sols vers une certaine hydromorphie.

La majeure partie des sols est constituée de sols peu évolués d'apport alluvial, se différenciant les uns des autres par une intensité plus au moins accentuée des phénomènes d'hydromorphie et d'halomorphie. Des phénomènes de vertisolisation apparaissent mais à des degrés moindres.

Dans le cadre de l'étude faite par AGRAR, des analyses minéralogiques du sol sur une épaisseur de 1 m, et dans la zone de SOUK SEBT montrent la prédominance des argiles du type montmorillonite et kaolinite avec un peu d'illite et de chlorite, et présence d'une quantité importante de calcite.

d) Aménagement et irrigation projetée

Les régions de la Haute Vallée de la MEJERDAH n'ont pas connu une tradition de l'irrigation excepté la zone de SOUK SEBT où les sols sont plus légers. Les paysans pompaient directement d'une nappe douce très proche de la surface du sol. Cependant, l'intensité croissante et l'extension de l'irrigation faisaient que l'on ne pouvait pas se contenter uniquement de l'utilisation des eaux de cette nappe.

Il a fallu donc, avec la création des périmètres irrigués à JENDOUBA, réserver à SOUK SEBT un périmètre de 5300 ha dont la majeure partie a été équipée en 1986, date de la première année de la mise en eau.

L'eau utilisée actuellement est celle de BOU HEURTHMA. Il est prévu dans l'avenir et dès que l'augmentation des besoins en eau en fait sentir la nécessité, de coupler cette eau avec celle de la MEJERDAH, ou du MELLEQUE, qui sont plus salées.

Par ailleurs, et compte tenu de la remontée périodique de la nappe, une partie du périmètre a été équipée avec un drainage souterrain qui doit permettre d'évacuer une quantité importante des eaux excédentaires et des sels vers la MEJERDAH.

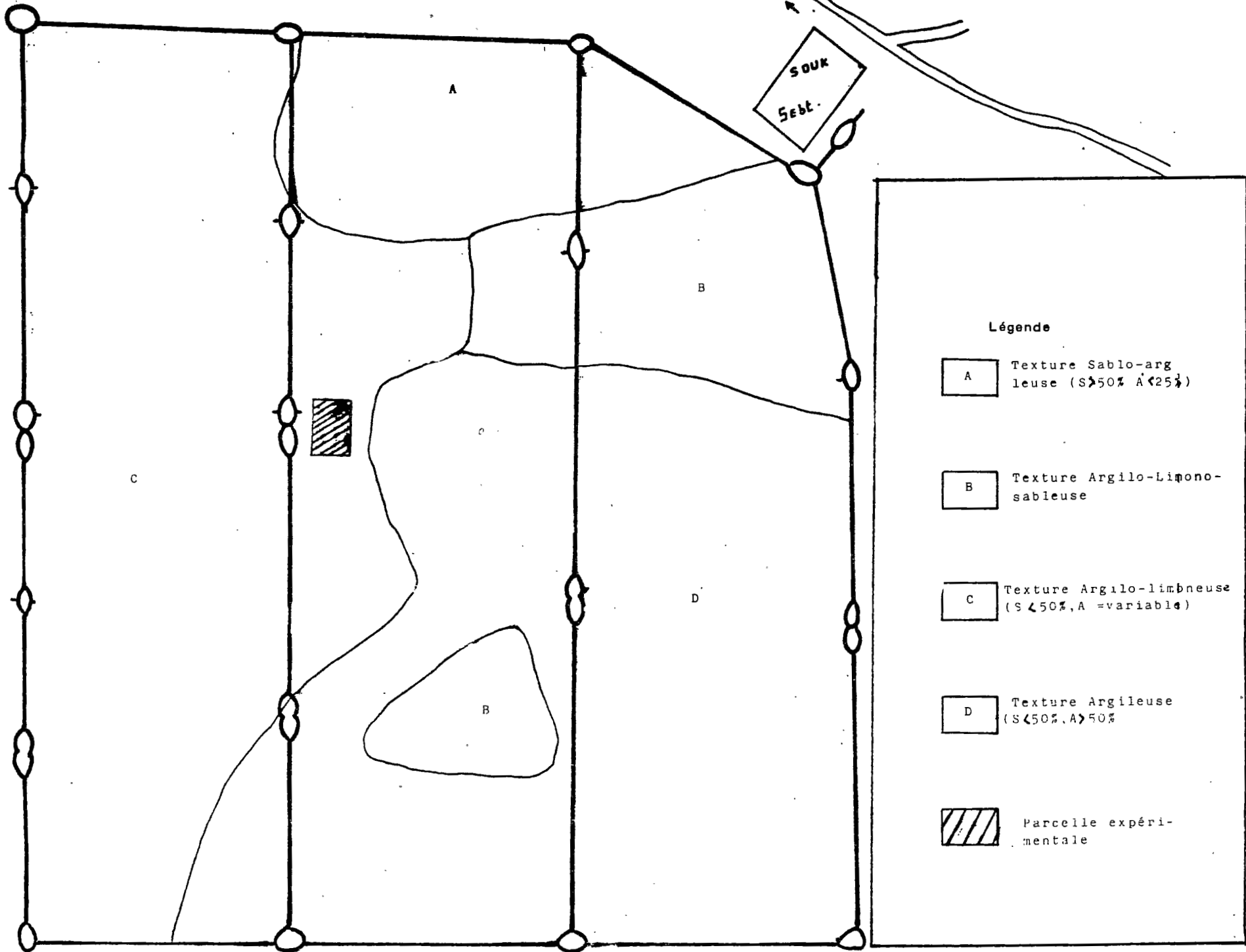
L'assolement cultural prévu pour ce périmètre est du type triennal : betterave à sucre - blé - fourrages ou cultures maraîchères, notamment les cultures de saison d'hiver et d'arrière saison.

II-1.2.2. Caractéristiques pédologiques en rapport avec l'hydrodynamique

a). Texture et structure

D'une texture sablo-limoneuse à une texture très argileuse, nous rencontrons ainsi toute la gamme des textures. Ceci traduit la forte hétérogénéité spatiale de la texture des sols dans ce périmètre (Fig. I-5).

Souk
Sebt.



Légende

A Texture Sablo-argileuse ($S > 50\%$, $A < 25\%$)

B Texture Argilo-Limono-sableuse

C Texture Argilo-limbeuse ($S < 50\%$, $A = \text{variable}$)

D Texture Argileuse ($S < 50\%$, $A > 50\%$)

Parcelle expérimentale

Fig. I-5. Carte de texture - Souk Sebt

La structure des sols est généralement polyédrique fine à prismatique. Elle a un aspect dégradé en surface dans les zones assez salées.

b) Mesures de perméabilité in situ (méthode PORCHET)

La majorité des sols semble assez perméable, les valeurs sont comprises entre 20 et 66 cm/j.

Les résultats montrent, en général, une diminution de haut en bas de la perméabilité estimée, de $10E-3$ à $10E-2$ cm/j pour les horizons supérieurs (0-20 à 0-50 cm), à $10E-5$ à $10E-4$ cm/j en profondeur (à partir de 75 à 100 cm).

Quelques essais montrent une inversion localisée de cette tendance, liée à l'existence de niveaux plus argileux ou plus sableux intercalés.

c) Salure

Elle est due à deux origines:

-Salinisation primaire d'origine géologique:

- * collines et montagnes bordant le périmètre au Sud formées de roches géologiques libérant des sels après altération.
- * sédiments de texture fine, déposés au cours des crues.

-Salinisation secondaire, résultant essentiellement d'un drainage déficient:

- * topographie plane, pente inférieure à 1 %.
- * présence de couches alluvionnaires imperméables.
- * remontée périodique de la nappe.
- * concentration des sels en aval suite à une évaporation excessive.

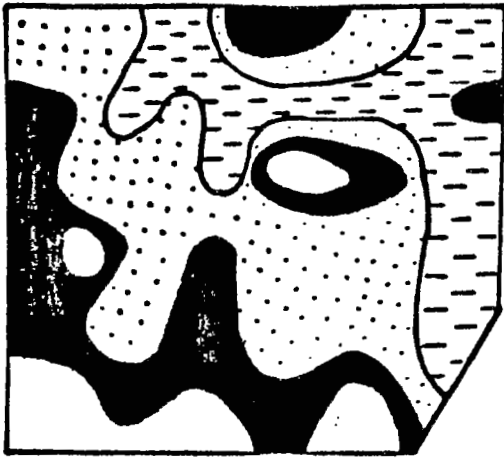
Sur un maillage plus au moins régulier, nous avons réalisé des mesures de la CEes à 10, 30, 50, 70, 90 et 120 cm de profondeur.

Notre objectif était de procéder par moyen géostatistique à la détermination de zones de salure comparable en vue d'une extrapolation des résultats de la simulation. Cependant, pour plusieurs raisons, et aussi faute de temps, nous avons écourté notre essai de simulation à SOUK SEBT, de même que nous nous sommes limités à une représentation cartographique simplifiée de la salure.

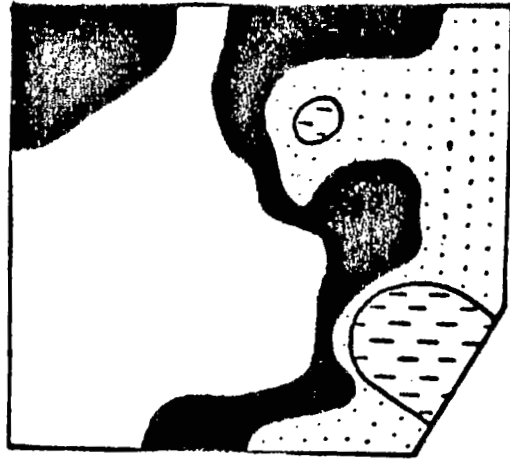
D'après les cartes de salure des niveaux 10, 30, 50, 70, 90 et 120 (Fig. I-6), il en découle:

* à 10 cm :

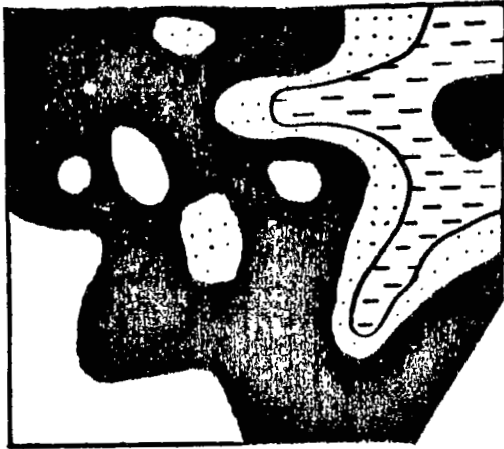
Un tiers des sols, situés principalement au Sud-Ouest du périmètre, présente une CEes supérieure à 4 mmhos. Un deuxième tiers de CEes inférieure à 2 mmhos est situé au Nord-Est.



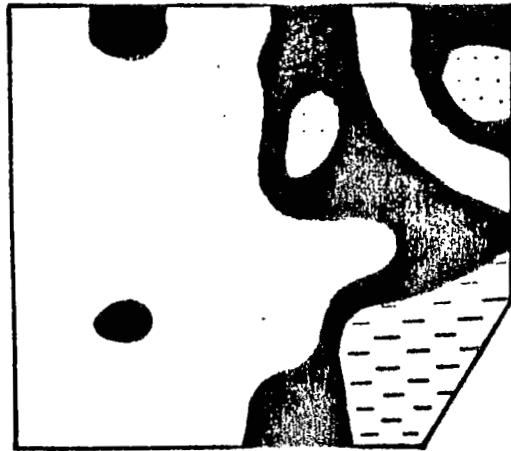
Niveau-10



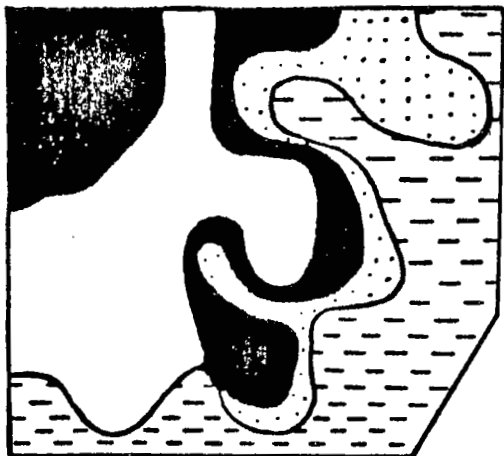
Niveau-70



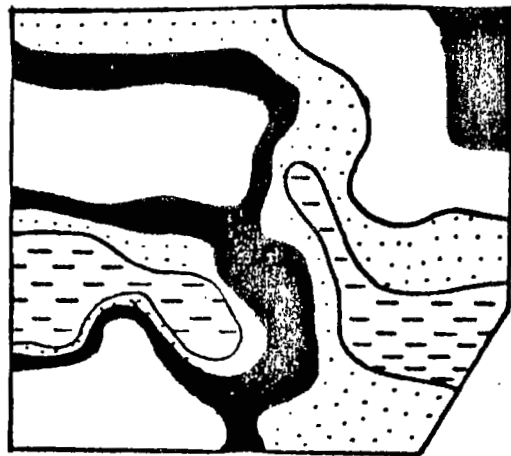
Niveau-30



Niveau-90



Niveau-50



Niveau-120

Ech : 1/20 000

Légende

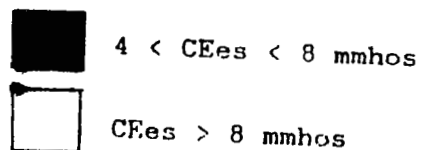
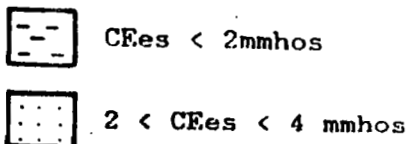


Fig.I-6.Cartes de salure-Souk Sebt (Avril 1987)

Le troisième tiers situé sur une diagonale allant du Nord-Ouest au Sud-Est présente une CEes comprise entre 2 et 4 mmhos.

* à 30 cm :

La carte se présente ainsi:

- Une zone au Nord-est dont la CEes est inférieure à 4 mmhos.
- Une zone au Sud-Ouest dont la CEes est supérieure à 8 mmhos.
- 50 % environ ont une CEes comprise entre 4 et 8 mmhos.

* à 50 cm :

Environ la moitié des sols ont une CEes < 4 mmhos, ils sont situés au Sud et à l'Est du périmètre. L'autre moitié de CEes > 4 sont situés au Nord et à l'Ouest du périmètre.

* à 70 cm :

Les sols se répartissent ainsi:

- Une bande à l'Ouest de CEes inférieure à 4 mmhos, par endroit inférieure même à 2.
- Parallèlement à celle-ci, une bande plus réduite a une CEes allant de 4 à 8, de même qu'une zone située au Nord-Ouest.
- 50 % ont une CEes supérieure à 8 mmhos, ils sont localisés essentiellement au Sud-Ouest et au Centre du périmètre.

* à 90 cm :

À l'exception de quelques zones situées à l'Est et dont la CEes est inférieure à 4, dans la majorité des sols la CEes est supérieure à 4 voire même supérieure à 8 mmhos.

* à 120 cm :

La variabilité spatiale de la salinité du sol apparaît assez forte. On observe des variations importantes sur de courtes distances, ce qui entraîne un brassage des courbes d'isovaleurs. Il n'y a pas de distribution particulière nette de la CEes dans ces sols, cependant on peut retenir qu'au Sud-Ouest, la CEes est supérieure à 8 mmhos, et qu'elle est inférieure à 2 au Sud-Est.

En résumé, il apparaît que:

- Le sol est plus salé en profondeur.
- Au Nord, la CEes est généralement inférieure à 2 mmhos.
- Au Sud-Ouest, elle est supérieure à 8 mmhos.
- Au centre, la CEes est comprise entre 4 et 8 mmhos.

Ainsi, le drainage pratiqué sur de grandes surfaces (1815 ha) a permis d'éliminer une des causes de la salinisation à SOUK SEBT. La remontée saisonnière de la nappe très salée affecte le sol en profondeur. De même qu'il s'est produit un certain lessivage des sels par les eaux de pluies et d'irrigation peu salées.

Par ailleurs, les sols situés au Nord et à l'Est sont assez drainés contrairement à ceux situés au Sud en bordure des collines.

II-1.2.3. Choix de la station d'essai

a) Description du sol

En se basant sur les mesures de perméabilités et d'analyses de granulométrie et de la CEEs, nous avons choisi une station d'essai de 400 m².

Lors de l'ouverture du profil le 23/7/86, nous avons distingué 5 horizons.

Coordonnées LAMBERT:

Lat.=40 Gr 56'00'' Long.= 7 Gr 28'70'' Alt.=150 m

Géomorphologie: pente faible, environ 0.25%

Etat de surface: jachère non travaillée.

Nappe à 1.60 cm, dont la conductivité est 24 mmhos/cm.

- 0-20 cm Horizon sec, peu cohérent et de couleur brune (10 YR 6/4), de texture limoneuse. La structure est polyédrique sub-anguleuse peu nette. La limite est régulière, porosité importante, racines fines pénétrant les agrégats, coquilles peu nombreuses, fentes de retrait de 2 mm débutant dans l'horizon, écartées de 10 cm.
Effervescence généralisée à HCl.
- 20-80 cm Horizon frais cohérent de couleur 10 YR 5/4, structure polyédrique sub-anguleuse à prismatique peu nette de 10 mm, texture limono-argileuse, limite régulière, porosité importante, racines fines verticales entre les agrégats avec répartition généralisée, présence de débris de coquilles, fentes de retrait de 5 mm, se terminant dans l'horizon, écartées de 15 cm, pseudo-mycéliums calcaires fréquents, généralisés, taches beiges résultant d'une concentration de calcaire, avec une fréquence de 5%.
Effervescence généralisée à HCl.
- 80-110 cm Horizon frais cohérent, de couleur 10 YR 6/3, structure massive nette à débit anguleux peu net, texture sablo-limoneuse, porosité faible,
Effervescence généralisée à HCl.
- 110-130 cm Même chose que précédemment, sauf une texture plus argileuse et présence de taches d'oxydo-réduction et de la matière organique en feuillets.
- 130-160 cm Même chose sauf horizon très frais, une texture sablo-limoneuse, une couleur rouille du sol dû un engorgement, présence de taches d'oxydo-réduction.

La texture est limoneuse en surface, devient limono-argileuse à partir de 20 cm, et elle est sablo-limoneuse au dessous de 80 cm. Le sol est faiblement structuré jusqu'à 80 cm, et massif au dessous.

Les manifestations visibles de la pédogénèse se limitent à l'hydromorphie et à la manifestation d'ambiance réductrice en profondeur, et une certaine redistribution du calcaire. Les pédotraits observables se limitent au pseudo-mycelium et taches calcaire, et aux taches d'oxydo-réduction.

D'après la classification pédologique (CPCS), il s'agit de sol peu évolué non climatique, d'apport alluvial, à caractères hydromorphe et halomorphe en profondeur, des caractères vertiques peuvent se manifester.

Tableau I-4 Extrait de l'analyse du profil. Prélèvement "a" Oct 86.

Niveau cm	A %	Lf %	Lg %	Sf %	Sg %	pH	CE mmho	CT %	CA %	Gypse % **
0-15	24	36	23	12	3	8.7	1.2	32	16	0
15-30	31	31	23	10	3	8.9	1.5	34	18	1.8
45-60	29	31	28	8	1	8.6	6.2	40	20	4.2
60-75	18	33	28	17	1	8.7	7.0	38	17	7.8
90-105	12	7	13	59	8	8.9	8.8	28	7	0.3
135-150	10	3	13	55	16	9.0	10.8	27	5	0.4

** : le gypse a été déterminé sur un prélèvement réalisé en Juil 86

La texture est limono-argileuse fine à limoneuse fine jusqu'à 90 cm. Au dessus de ce niveau, elle est limono-sableuse à sablo-limoneuse (Fig I-7). Ce changement brusque de texture découle de l'origine alluvionnaire du sol.

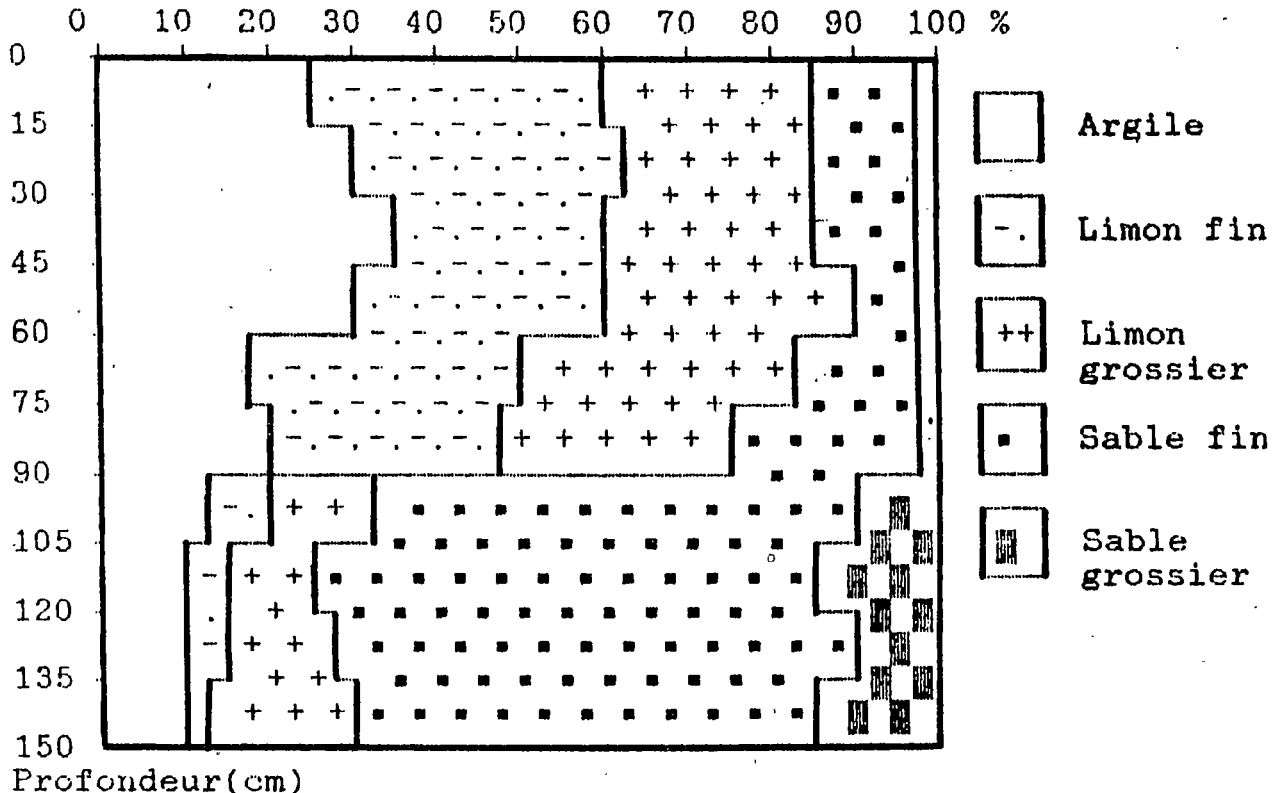


Fig. I-7 .Composition granulométrique-SDUK SEBT

Durant l'été, il y a précipitation de gypse entre 15 et 75 cm qui atteint même 7.8 %.

La teneur en calcaire total (CT) est de l'ordre de 35 %, elle baisse à la proximité de la nappe, de même que la teneur en calcaire actif (CA).

La composition anionique et cationique déterminée sur l'extrait de pâte (Fig I-8), montre:

-composition anionique:

0-30 cm : Cl > SO4 > HCO3

30-150 cm : SO4 > Cl > HCO3

-composition cationique:

0-75 cm : Na > Ca > Mg

75-150 cm : Na > Mg > Ca

On remarque que SO4 > Cl à l'approche de la nappe, de même que le Mg prédomine vis-à-vis du Ca.

Les chlorures de sodium et les sulfates de calcium et de magnésium sont probablement les sels les plus fréquents dans ces sols.

b) Eau d'irrigation et eau de nappe

L'eau utilisée pour l'irrigation provient du barrage de BOU HEURTHMA, un affluent nord de la MEJERDAH. Cette eau possède les caractéristiques suivantes (Tableau I-5):

Tableau I-5 Composition de l'eau de BOU HEURTHMA.

pH	CE mmho	RS g/l	Cl me/l	SO4 me/l	HCO3 me/l	Na me/l	Ca me/l	Mg me/l	K me/l	SAR
8.0	0.7	0.49	1.6	2.4	4.0	1.2	3.3	3.9	0.04	2.6

Le degré de restriction pour son utilisation (FAO, 1985) est faible à modéré (Classe C2.S1). Cette eau est sursaturée en calcite (P. WIDMOSEER, 1984). L'eau de la nappe prélevée le 23/7/86 titrait 19.5 g/l, et avait un pH égale à 8.1.

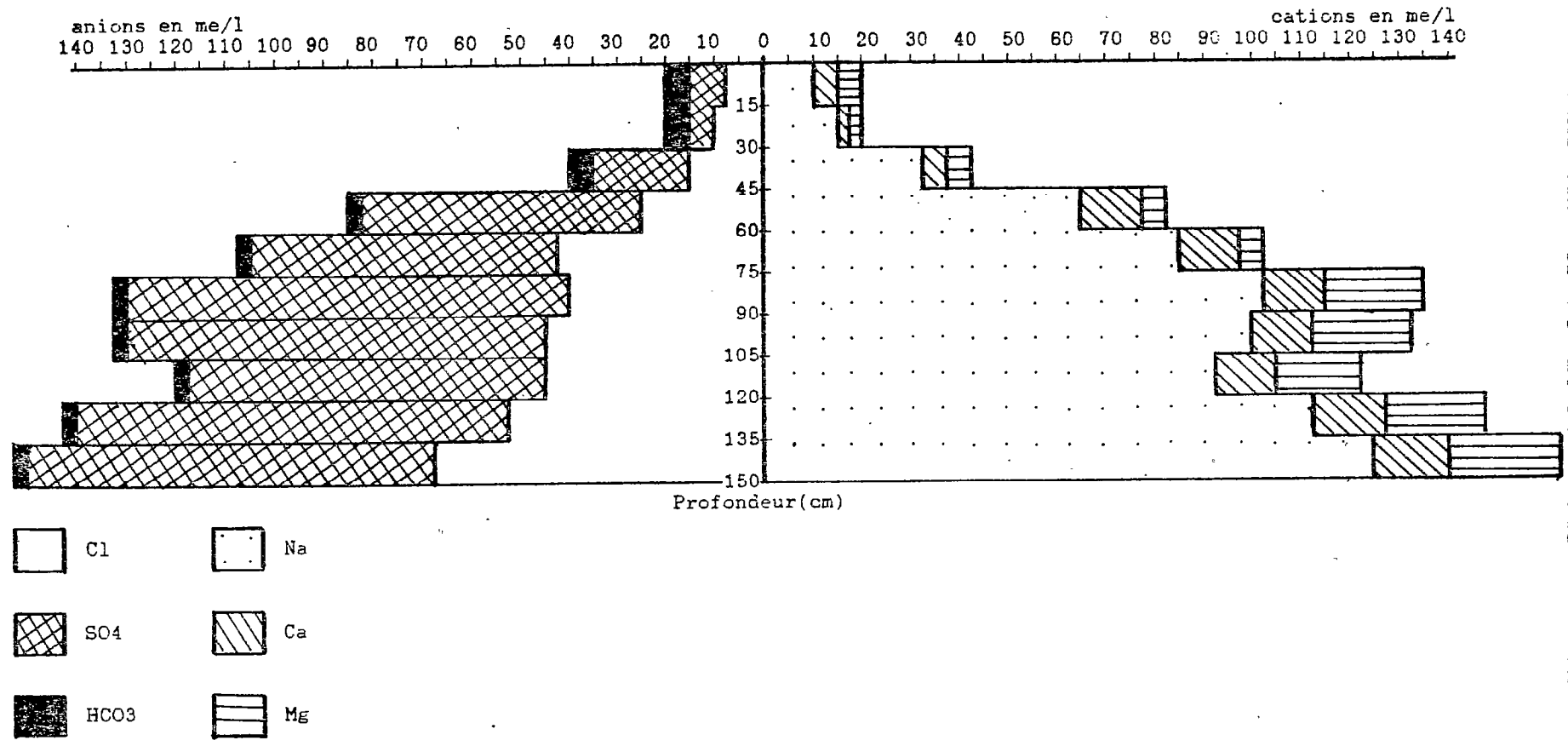


Fig. I-8. Composition cationique et anionique-Profil initial "a"-
Souk Sebt

II-2. Elaboration des données hydrodynamiques et physico-chimiques nécessaires à la simulation

II-2.1. Equipement des stations de mesure

Chacune des deux stations d'essai a été équipée d'un pluviomètre, d'un fût enterré rempli d'eau qui sert pour les comptages préalables à l'utilisation de la sonde à neutrons, et de deux dispositifs de capteurs: l'un d'humidité et l'autre de salure.

II-2.1.1. Capteurs d'humidité tensio-neutroniques (Fig I-9)

Ce dispositif comprend:

- un tube d'accès pour humidimètre neutronique qui permet des mesures depuis la surface jusqu'à la côte 150 cm. A SOUK SEBT ce tube arrive à 180 cm.
- deux batteries de tensiomètres raccordés à des manomètres multiples à mercure. Ces tensiomètres sont implantés aux côtes: 10.20.30.40.50.70.110 et 150cm. Les niveaux de surface, de mesure plus délicate, ont été doublés (niveau 10 et 20 cm). Quelques adaptations ont été apportées à ce dispositif à SOUK SEBT: on a installé un tensiomètre à 180 cm à la place du deuxième tensiomètre installé à 20 cm.

Pour vérifier le bon fonctionnement de ce dispositif avant l'essai d'infiltration, nous avons effectué des mesures pendant une vingtaine de jours.

II-2.1.2. Capteurs de salure (Fig.I-10)

A un mètre du dispositif de mesure hydrique, nous avons installé un dispositif de capteurs de salure constitué de :

- salinity-sensor: il permet de suivre l'évolution de la CE de la solution du sol in situ.
- sondes quadripôles: ce sont des capteurs cylindriques comportant 4 anneaux en fil de nickel tenant lieu d'électrodes quadripôles. On mesure une résistance qu'on convertit en une conductivité globale: CEG, qui intègre la conductivité liée aux surfaces d'échange du complexe absorbant.
- électrode spécifique aux ions calcium: l'utilisation d'électrode Ca présente un intérêt par sa sensibilité à un élément important des eaux et des sols, elle permet de suivre l'activité de l'ion Ca.

Nous avons installé cinq salinity-sensors et cinq sondes quadripôles à 10,20,35,65 et 85 cm. Le but de l'utilisation de ces capteurs de salure est de contrôler et de vérifier les résultats qu'on obtient par le modèle de simulation. A SOUK SEBT, seules les mesures de la CEG ont été effectuées régulièrement.

Fig.1-9.Emplacement des tensiomètres et du tube de sonde à neutrons-Zelba

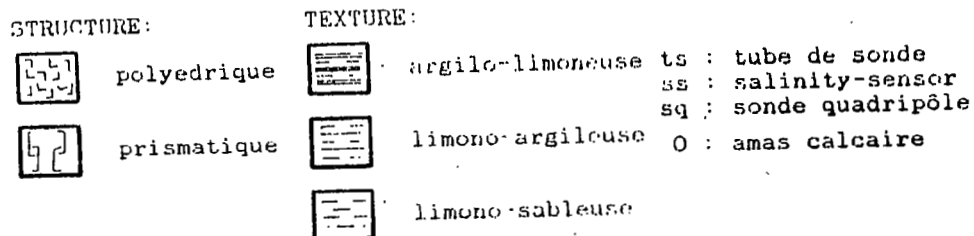
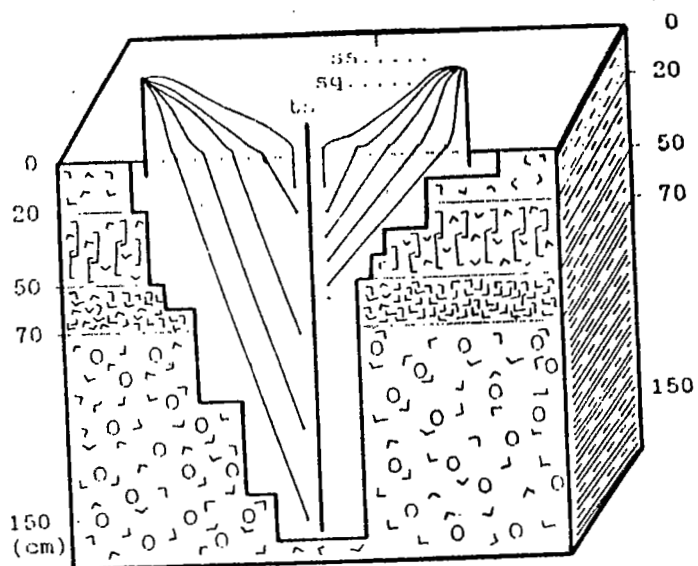
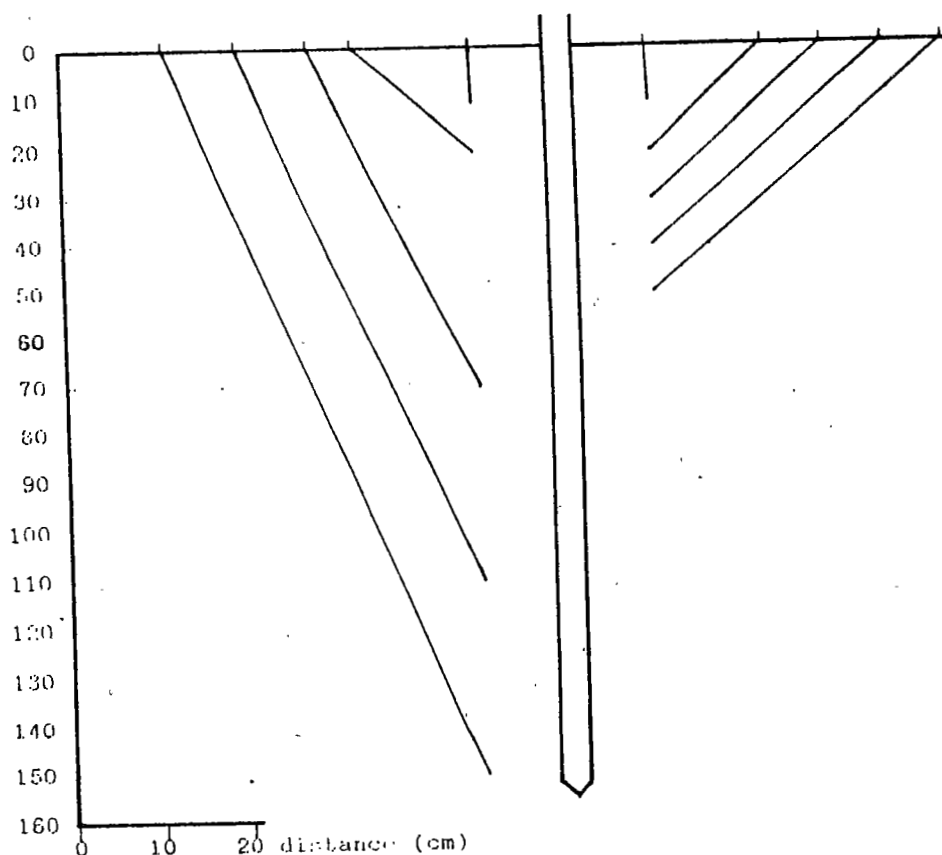


Fig.1-10.Coupe schématique de la disposition des capteurs et de la différenciation structurale et texturale des horizons-Zelba



II-2.2. Conduite d'un essai d'infiltration

II-2.2.1. Méthodologie

L'essai d'infiltration rapporté ci-après était destiné à permettre le calcul des caractéristiques hydrodynamiques du site qui a été ultérieurement modélisé par simulation numérique à l'aide du programme SIMUL (RIEU ,1983).

Cet essai a comporté le suivi conjoint des variations de la teneur en eau et de la succion matricielle d'un certain nombre de niveaux choisis dans le profil. Le suivi ,réalisé à l'aide de capteurs neutroniques (sonde à neutrons) et tensio-métriques, a été poursuivi durant les trois phases de l'essai, à savoir :

- Infiltration proprement dite ,conduisant à la saturation hydrique du sol,
- Drainage interne (sol couvert sans évaporation),
- Bilan naturel (sol découvert).

Afin de couvrir au cours de l'essai la plus large gamme de teneur en eau ,il a été souhaitable de faire ces mesures en dehors de la période de pluie. Cependant, bien que cet essai n'ait pu être mené à ZELBA qu'assez tard dans la saison au mois de novembre, on a bénéficié de conditions clémentes qui ont permis de prolonger la phase de bilan naturel pendant un mois .Ceci n'était pas le cas à SOUK SEBT ,ou durant l'essai réalisé en octobre, des pluies sont intervenues empêchant ainsi l'infiltration de l'eau et limitant notre essai uniquement à une tranche de sol de 70 cm de profondeur.

A. Déroulement des opérations

1) Parcelle de ZELBA

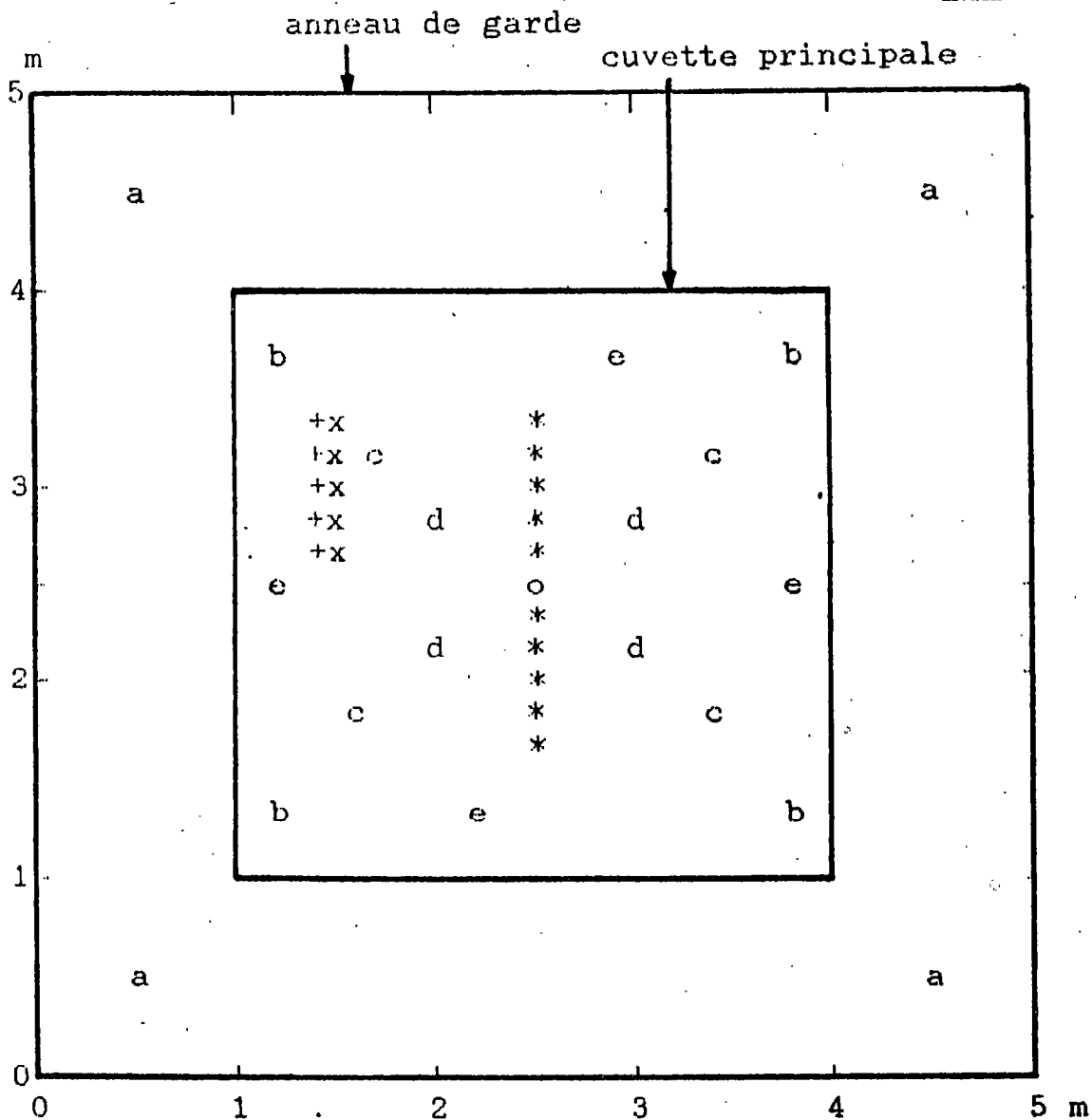
a) Préparation du site

L'irrigation a été faite par submersion ,nous avons donc préparé une cuvette principale contenant tous les dispositifs de mesure.

Afin de limiter les infiltrations latérales lors de l'irrigation, nous avons dressé des diguettes formant un anneau de garde autour de la cuvette principale (Fig. I-11).

b) Phase d'infiltration (11 novembre 1985)

L'irrigation a été faite à l'aide d'une citerne de 3000 l et dont le niveau a été relevé à chaque apport dans la cuvette principale et dans l'anneau de garde.



- o : tube de sonde à neutrons
- * : tensiomètre
- x : salinity-sensor
- + : sonde quadripôle
- a,b,c,d,e : prélèvements de contrôle

Fig. I-11. Emplacement du dispositif tensio-neutronique et des capteurs-Zelba

Nous avons commencé par la submersion de l'anneau de garde puis de la cuvette principale. Nous avons poursuivi selon ce rythme.

La fin de l'irrigation a été décidée quand le tensiomètre installé à la cote 150 cm a indiqué 150 mbars, c'est-à-dire que le sol était à saturation jusqu'au niveau 150 cm. Ceci a nécessité un apport de 470 mm d'eau dans la cuvette et a duré deux jours. Pendant ce temps des mesures tensio-neutroniques se faisaient toutes les 30 mn. La nuit, le sol était couvert pour éviter l'évaporation.

A la fin de l'irrigation nous avons couvert la cuvette par une nappe en plastique afin d'empêcher toute évaporation. Une couche de 10 cm de terre a été déposée sur cette nappe pour éviter tout effet serre.

c) Drainage interne (période de 10 jours du 12 au 21 novembre 1985)

Dès la couverture du sol, nous avons effectué des lectures tensio-neutroniques toutes les heures pendant 48 heures.

A partir du 6ème jour, le suivi des mesures tensio-neutroniques se faisait 3 fois par jour.

d) Bilan naturel (jusqu'au 7 décembre 1985, date de la première pluie)

Le drainage interne a duré 10 jours, au terme de cette période le sol a été découvert. Nous avons continué le suivi des mesures à raison de 2 fois par jour, puis ces mesures étaient devenues plus espacées: une fois par semaine.

2) Parcelle de SOUK SEBT

a) Préparation du site

L'essai a été réalisé le 9 octobre 1986. Nous avons procédé d'une manière identique à ZELBA sauf que l'irrigation a été effectuée par aspersion qui est la méthode pratiquée dans la région:

b) Phase d'infiltration, 9 octobre 1986

L'apport total en eau est de 340 mm et l'infiltration a nécessité trois jours pour amener le sol à saturation,

c) Phase de drainage interne

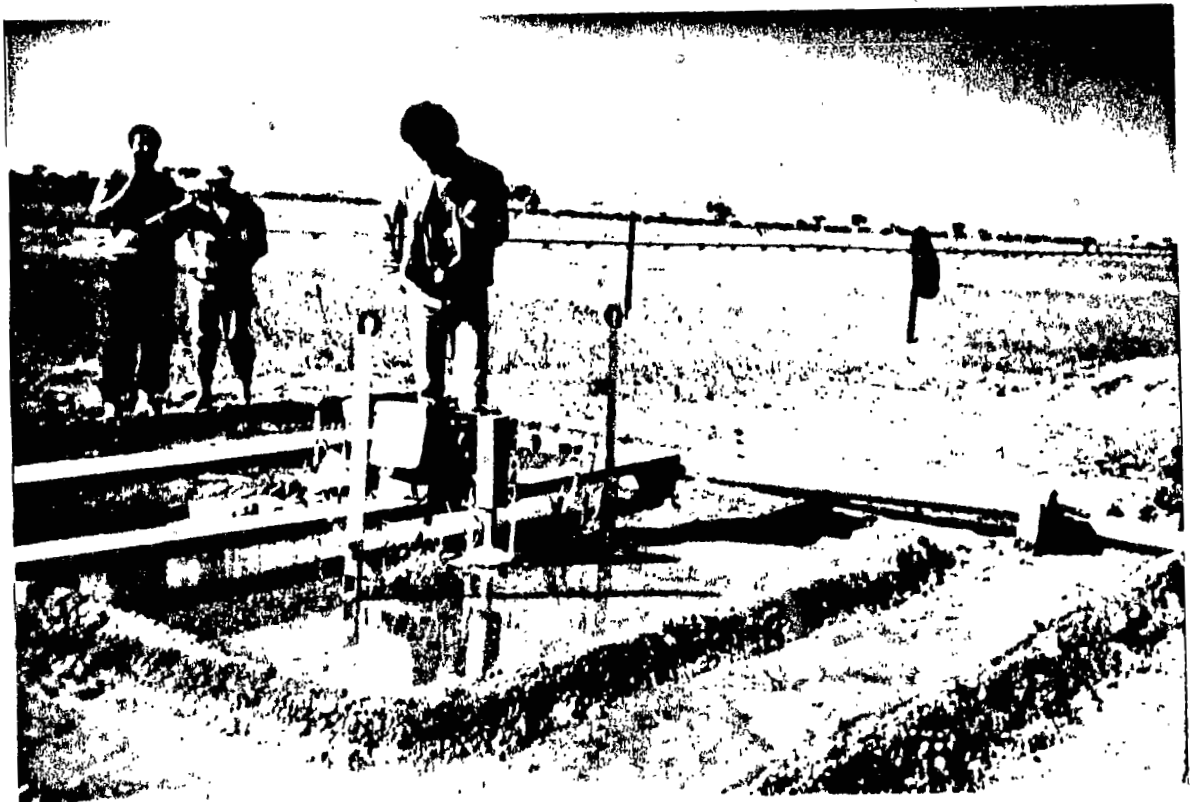
nous avons eu des pluies pendant cette phase,

d) Suivi sous conditions naturelles

le suivi a été fait durant tout l'hiver, en mars nous avons semé de la luzerne.



Vue générale du périmètre de Zelba qui venait juste d'être aménagé en d'irrigation (défoncement et nivellement)



Essai d'infiltration-Zelba:

Un dispositif Müntz géant servait pour l'irrigation faite par submersion. Des mesures tensio-neutroniques permettaient de déterminer les paramètres hydrodynamiques utilisables dans le modèle de simulation.

B. Suivi de l'humidité et de la salure

1) Mesures tensio-neutroniques

- Phase d'infiltration: observation de la progression du front d'humectation par lectures toutes les 30 minutes,
- Phase de drainage interne : observation toutes les heures pendant 48 heures, puis toutes les 2 heures chaque jour du drainage interne,
- Phase de bilan naturel : suivi journalier à bi-hebdomadaire en fin de période.

Chaque jour une ou deux séries de mesures neutroniques ont été réalisées dans un fût rempli d'eau d'irrigation, protégé de l'évaporation, de façon à ramener les comptages dans le sol à une eau de composition sensiblement voisine.

2) Capteurs de salure

Pendant l'infiltration ces capteurs ont été utilisés pour obtenir une estimation qualitative de l'influence de l'irrigation à l'eau salée, et pour vérifier leur bon fonctionnement. Au cours du drainage interne et du bilan naturel, ils ont été systématiquement relevés en même temps que les capteurs hydriques.

II-2.2.2. Suivi de l'essai

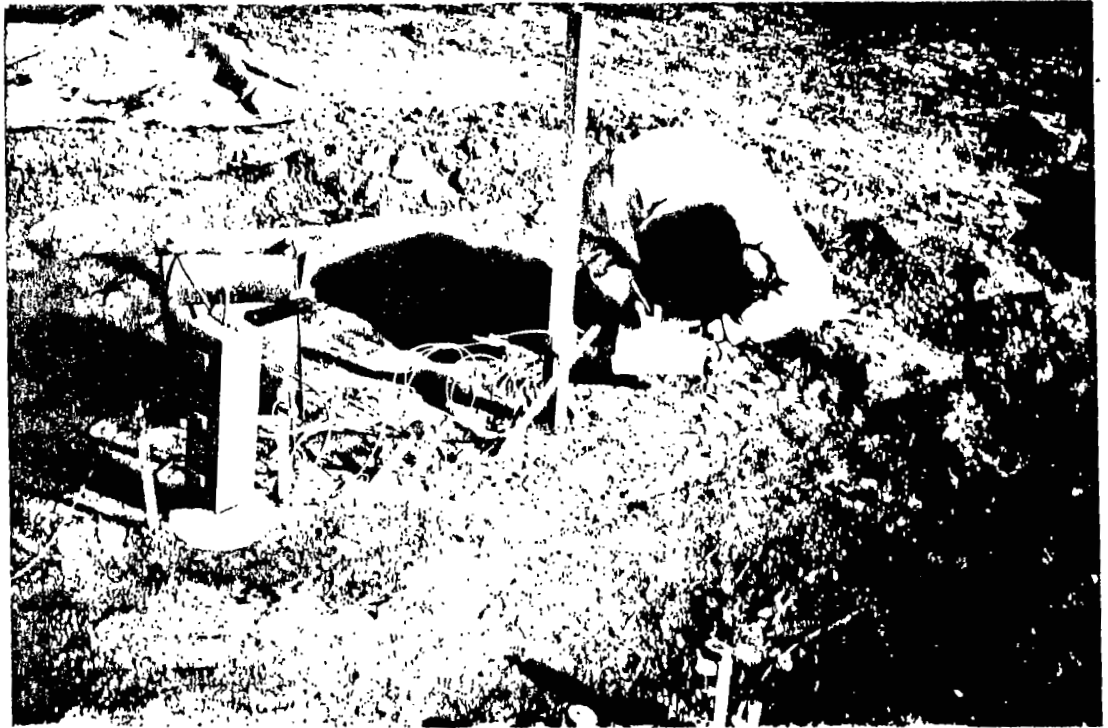
A. Contrôle des variations d'humidité et des caractéristiques chimiques

Un plan de prélèvements périodiques a été choisi (Fig. I-11) comportant 4 répétitions, radialement centrées sur le tube de sonde, pour chacune des dates suivantes:

- avant irrigation : prélèvement "a",
- juste après la saturation (début de drainage interne) : prélèvement "b",
- à mi-drainage interne : prélèvement "c",
- en fin de drainage interne : prélèvement "d",
- en fin de bilan naturel : prélèvement "e".

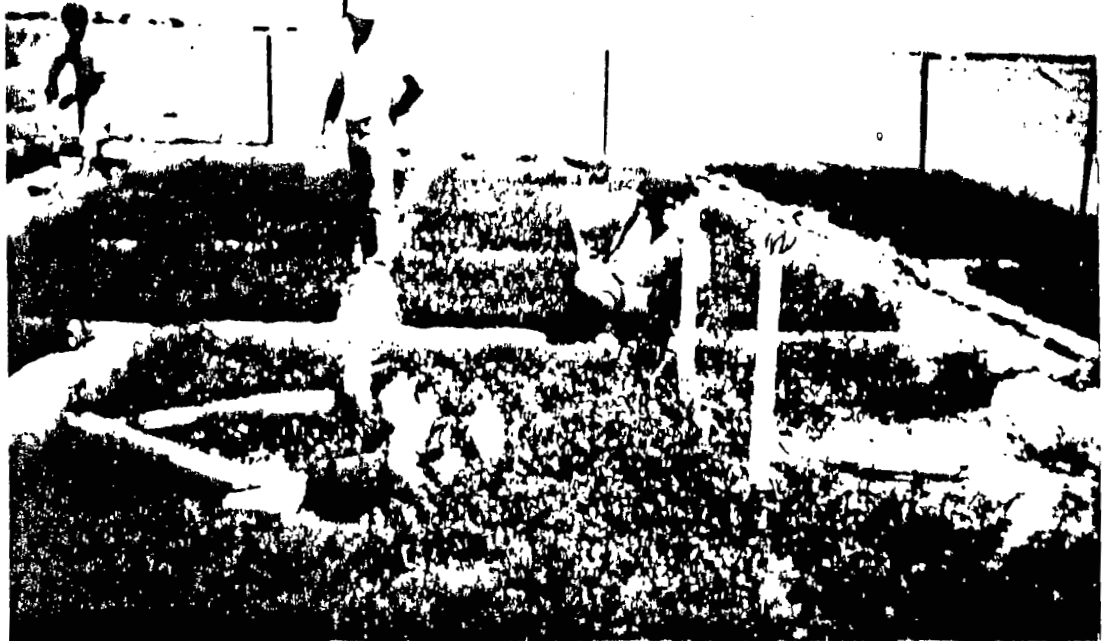
Cet ensemble de prélèvements réalisés de 15 en 15 cm de profondeur a permis de réaliser l'étalonnage des comptages neutroniques, qui ont été ensuite confrontés aux données de l'analyse des caractéristiques neutroniques effectuées au C.E.A à CADARACHE, sur quelques niveaux sélectionnés en fonction de la description pédologique du site.

D'autre part, les données hydriques et chimiques ainsi collectées ont servi au calage du modèle de simulation. D'ailleurs dans cet objectif de validation du modèle pour des périodes plus ou moins longues, nous avons réalisé environ tous les deux mois d'autres prélèvements de contrôle :

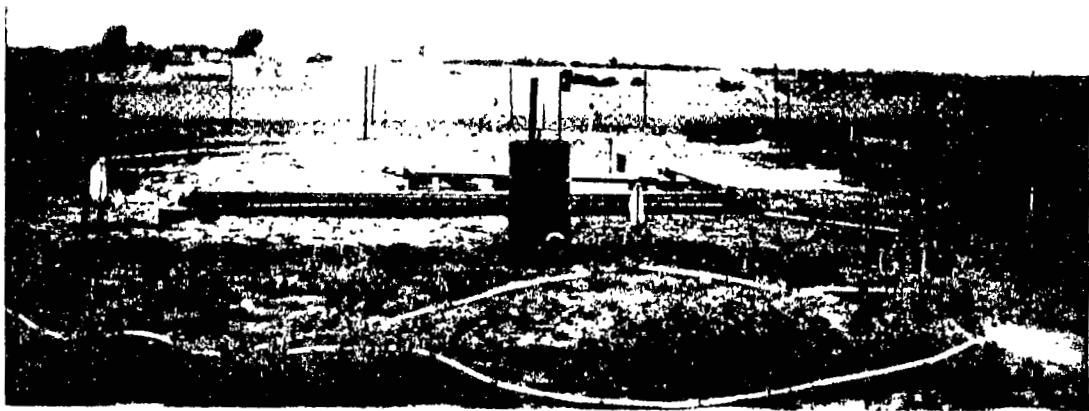


Fin de drainage interne-Zelba:

Après une phase de drainage interne pendant laquelle le sol était couvert, le suivi continuait sous-conditions naturelles (phase de bilan naturel).

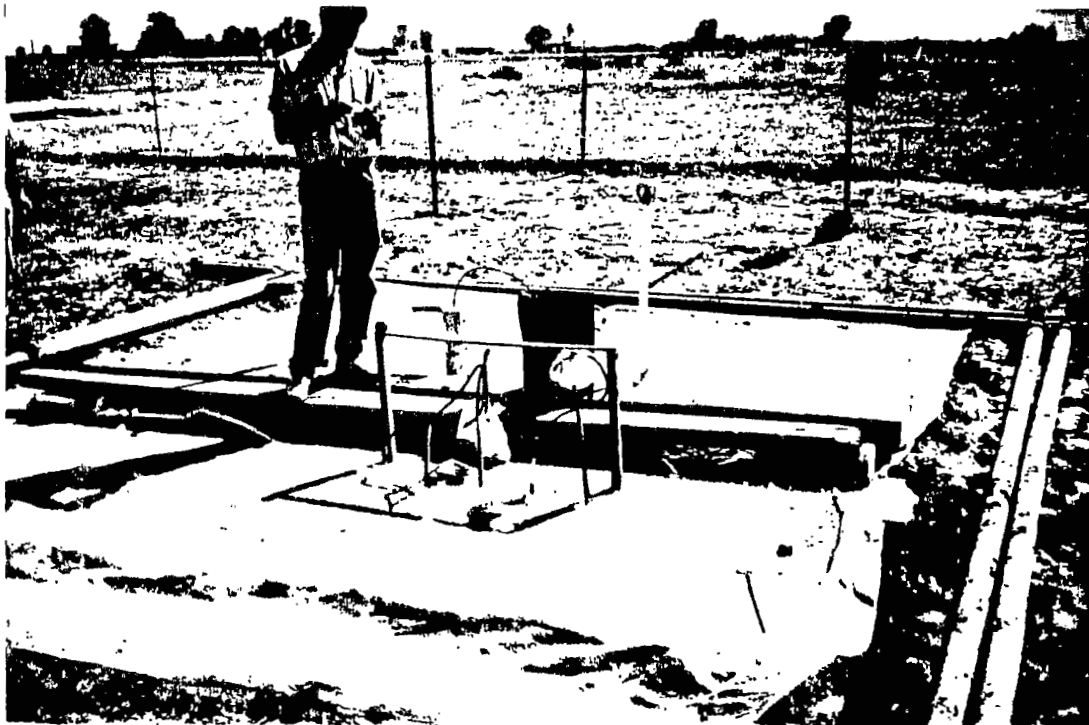


Suivi sous-culture de luzerne-Zelba:



Essai d'infiltration à Souk Sebt:

L'irrigation est réalisée par aspersion jusqu'à la saturation complète du sol.



Suivi pendant le drainage interne-Souk Sebt:

Le sol étant saturé et couvert; des mesures tensio-neutroniques en continu, permettaient le suivi de la dynamique de l'eau (phase de drainage interne).

- prélèvement "f" :le 22 mai 1986,début des irrigations,
- prélèvement "g" :le 21 juillet 1986,
- prélèvement "h" :le 25 septembre 1986,
- prélèvement "i" :le 5 février 1987,
- prélèvement "j" :le 13 avril 1987,

B. Evolution de l'humidité au cours de l'essai

1) ZELBA

Deux jours avant l'essai d'infiltration ,la teneur en eau du sol était à un niveau très faible,de l'ordre de 6% .Le sol était légèrement plus humide entre 30 et 60 cm (Fig. I-12).

Par l'apport d'eau,le sol a été ramené à saturation jusqu'à la côte 150 cm.Juste après couverture: début de drainage interne,un prélèvement a été effectué.Les prélèvements "c" et "d" réalisés successivement à mi-drainage et en fin de drainage montraient une diminution de la teneur en eau dans les horizons superficiels.La diminution est moins nette en profondeur.

Après découverte ,le sol a été soumis à l'évaporation, la teneur en eau continuait à baisser.L'écart entre l'état d'humidité à saturation et à la fin du suivi est plus important pour les niveaux superficiels.En fin de suivi le sol était toujours à un état d'humidité assez élevé (prélèvement "e").

2) SOUK SEBT

Durant le mois de juillet,date du creusement du profil, le sol était sec entre 0 et 50 cm,et assez humide au delà de ce niveau.Ceci résulte de la proximité de la nappe qui se trouvait à cette date à 1.60 m de profondeur.

Nous avons effectué à chaque phase de l'essai,les mêmes prélèvements que ceux réalisés à ZELBA.

En dehors d'une augmentation sensible de l'humidité en surface avant et après l'essai d'infiltration,le sol a conservé son état d'humidité sauf une légère diminution en surface (Fig. I-13).

C. Evolution de la salure au cours de l'essai

1) ZELBA

La CEes (Conductivité Electrique sur extrait de pâte saturée) inférieure à 1 mmhos jusqu'à 60 cm de profondeur,augmente légèrement entre 60 et 150 cm (Fig. I-14). Elle atteint en surface, suite à l'apport de sels contenus dans l'eau d'irrigation, 4 mmhos au début du drainage .

Les prélèvements "c","d" et "e" permettent de constater une diminution de la CEes essentiellement dans les niveaux superficiels,toutefois elle garde des valeurs supérieures à 3 mmhos.

Fig.I-12.Evolution de l'humidité au cours de l'essai de drainage interne-bilan naturel-Zelba

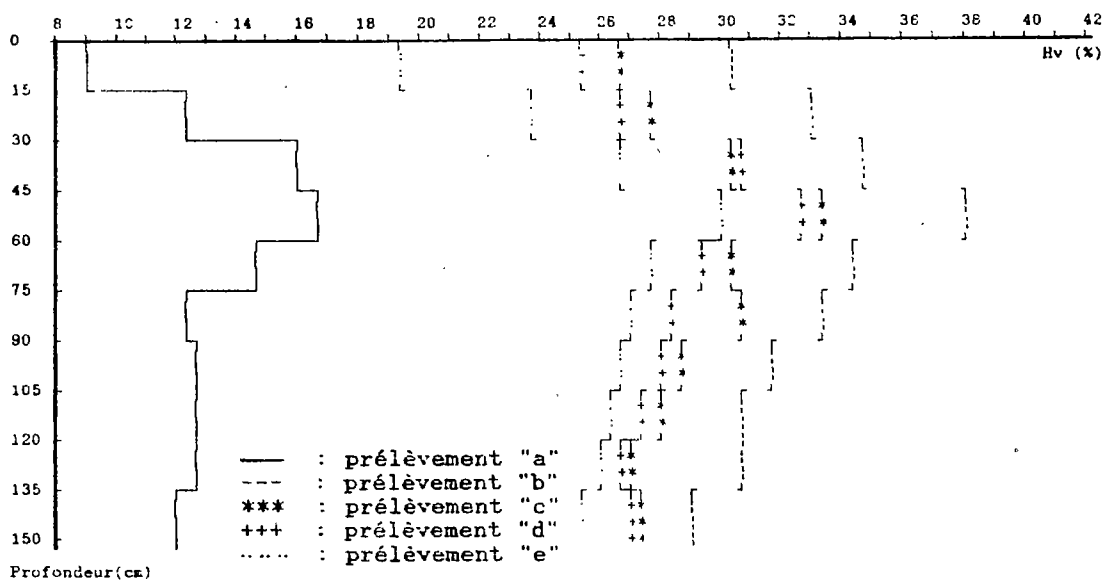


Fig.I-13.Evolution de l'humidité au cours de l'essai de drainage interne -bilan naturel-Souk Sebt

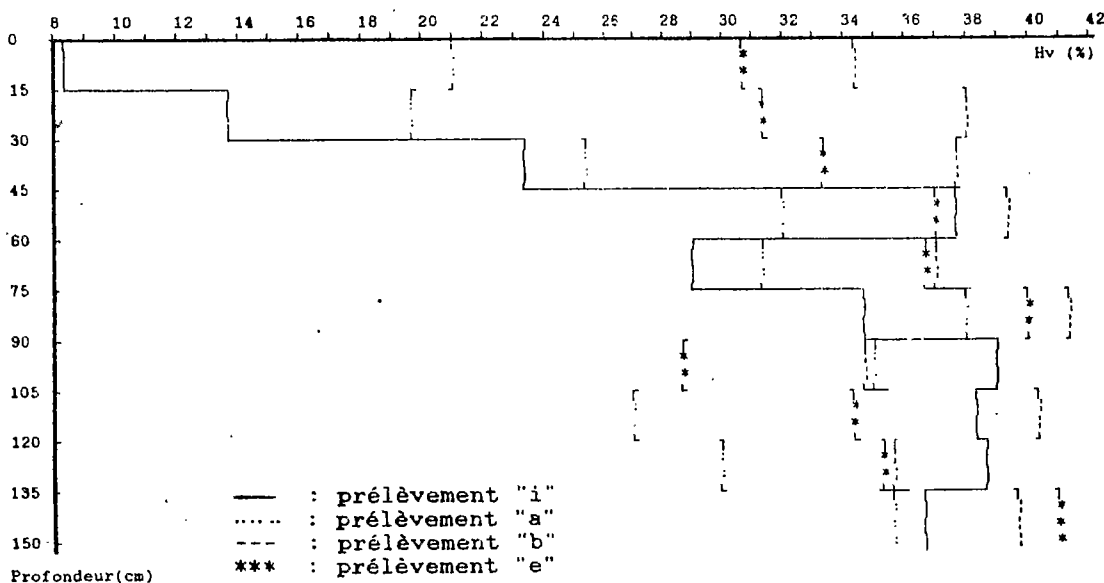
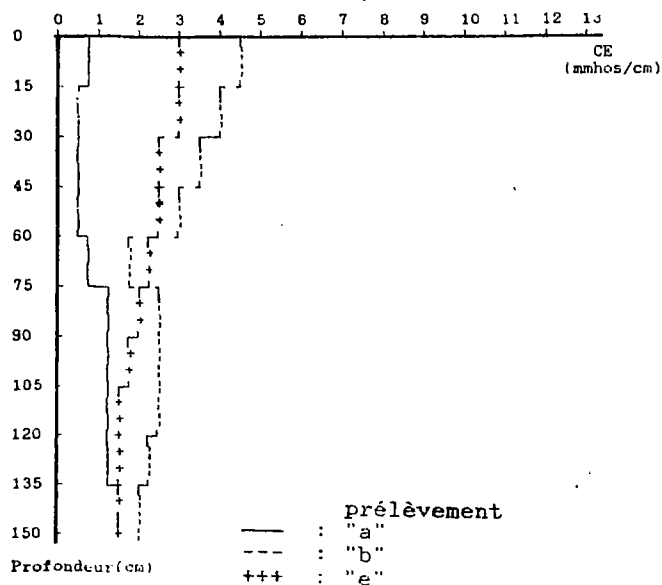


Fig.I-14.Evolution de la CEes au cours de l'essai de drainage-Zelba



2) SOUK SEBT

Le profil salin établi à partir de la CE du sol prélevé le 23 juillet 1986, montre un profil du type descendant: la salure est forte à partir même de 15 cm, elle baisse à 75 cm, sol sablo-limoneux (Fig. 1-15).

Le prélèvement "a" effectué avant l'essai de drainage interne a permis de dresser la courbe de variation de la CE. Elle est nettement plus faible à tous les niveaux. Les seuls facteurs qui auraient pu agir dans le sens d'une diminution de la salure sont les pluies de septembre et d'octobre. Elles ont agi essentiellement sur les chlorures et les sulfates, dont les quantités ont baissé entre ces deux périodes. Le profil initial renfermait une quantité importante de sulfates, le sol contenait 1.8 % de gypse entre 15 et 30 cm, cette teneur augmente progressivement jusqu'à atteindre 7.8 % entre 60 et 75 cm puis redescend à des teneurs de 0.3 % vers la base du profil.

Ces observations sont importantes car elles montrent bien qu'avec les premières pluies d'automne, un lessivage prononcé s'est effectué.

La quantité de sels apportée durant l'essai d'infiltration est de 170 g/m²: le résidu sec de l'eau est de 0.49 g/l, pour un apport total de 340 mm d'eau.

A la fin de l'irrigation, la CE a augmenté dans tous les niveaux, cette augmentation de la salure est plus importante en profondeur.

A la fin de l'essai, nous avons constaté qu'elle avait tendance à rejoindre son état initial, sauf dans le niveau de surface où le sol a subi une salinisation vraisemblablement par l'accumulation des sels. Il faut signaler qu'une telle qualité et un tel apport d'eau ont un effet lessivant plutôt qu'un effet salinisant.

D. Suivi de la salure du sol par les capteurs in situ

1) ZELBA

Au cours de l'infiltration, la CE_{ss} (Conductivité Electrique de la solution du sol mesurée par salinity-sensor) a augmenté rapidement (Fig. 1-16 a, b, c, d et e). Cette augmentation a été retardée vers la base du profil. Elle a atteint un maximum en fin de drainage interne. La CE_{ss} a diminué légèrement dans les niveaux de surface alors qu'elle est restée assez stable durant la période de suivi en profondeur. La valeur de CE_{ss} enregistrée a correspondu à celle de l'eau d'irrigation (6.7 mmhos), donc un équilibre a eu lieu entre l'eau d'irrigation et la solution du sol dans les niveaux 10 et 20 cm. La CE_{ss} était légèrement plus faible en profondeur: 5 à 5.5 mmhos.

Fig.I-15.Evolution de la CE au cours de l'essai de drainage-Souk Sebt

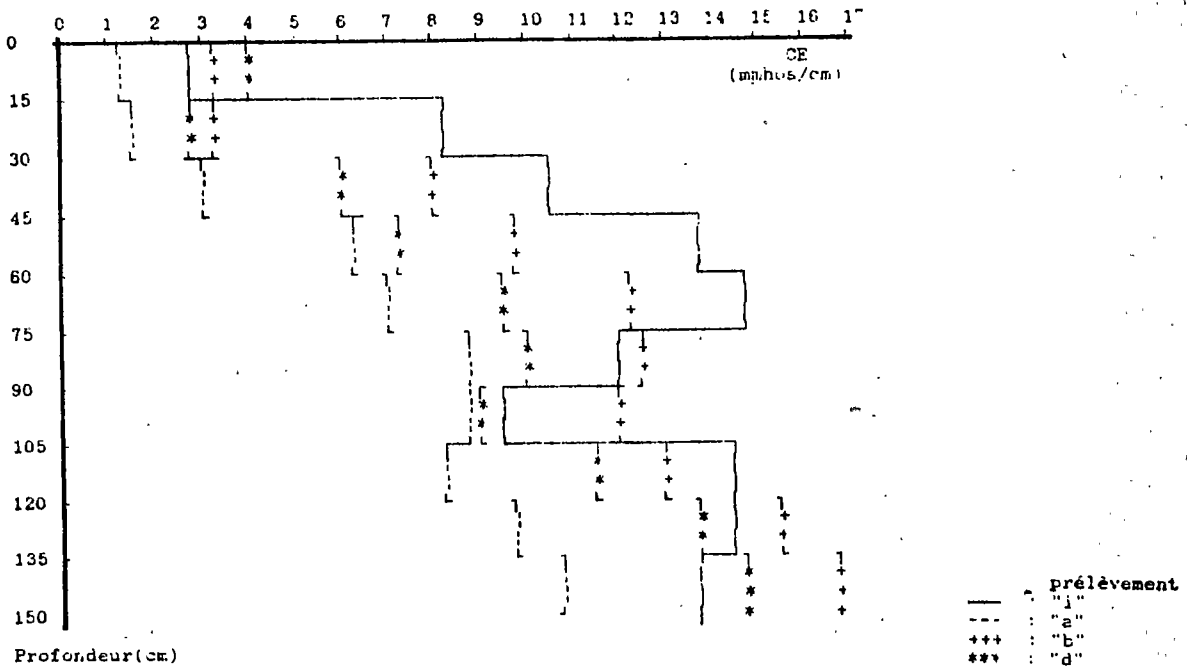


Fig.I-16.a.Variation de CEss et CEG au cours de l'essai de drainage interne-bilan naturel-Profondeur 10 cm.

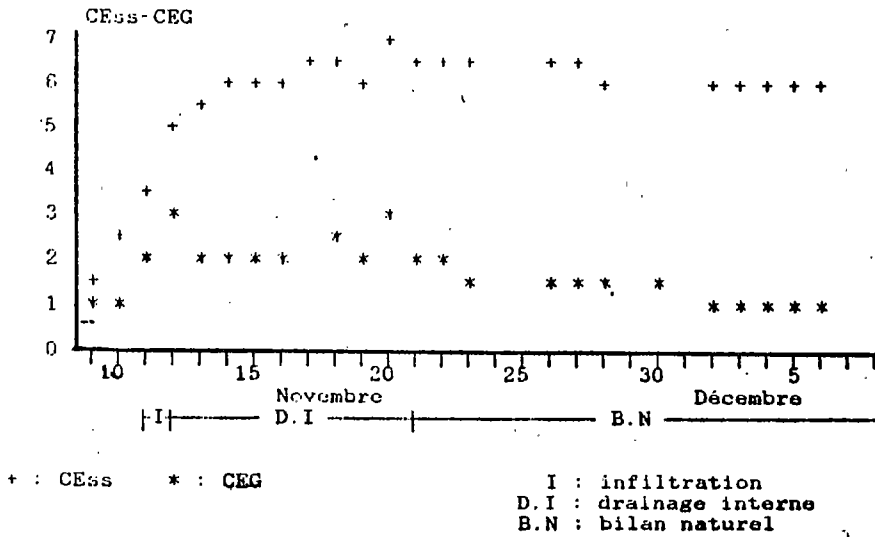


Fig.I-16.b.Variation de CEss et CEG au cours de l'essai de drainage interne-bilan naturel-Profondeur 20 cm.

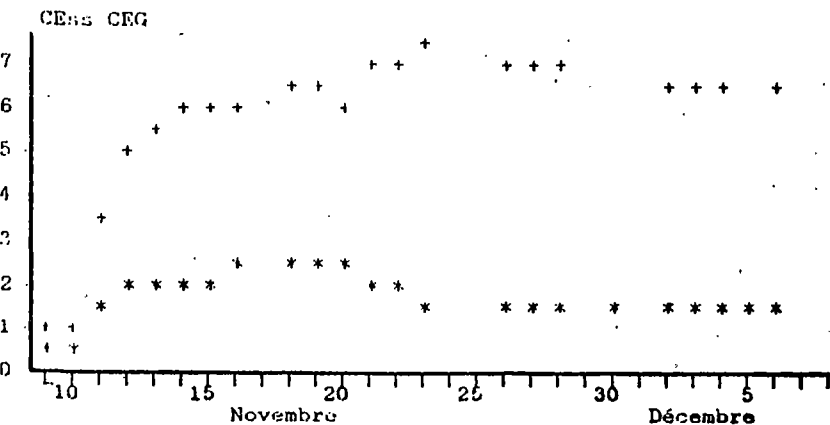


Fig.I-16.c.Variation de CEss et CEG au cours de l'essai de drainage interne-bilan naturel-Profondeur 35 cm.

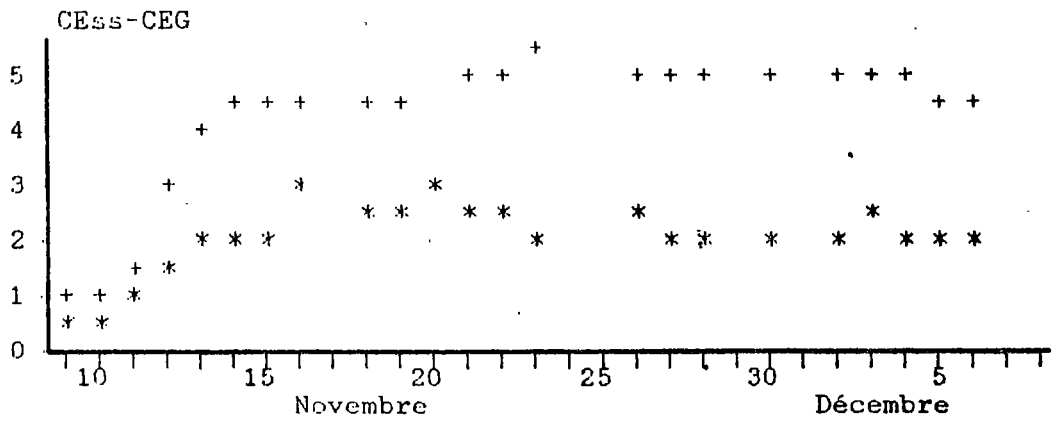


Fig.I-16.d.Variation de CEss et CEG au cours de l'essai de drainage interne-bilan naturel-Profondeur 65 cm.

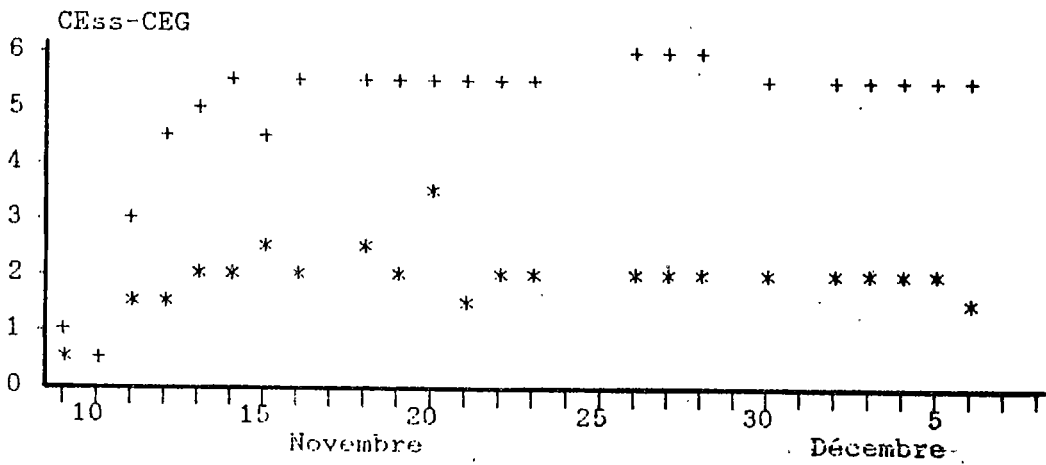
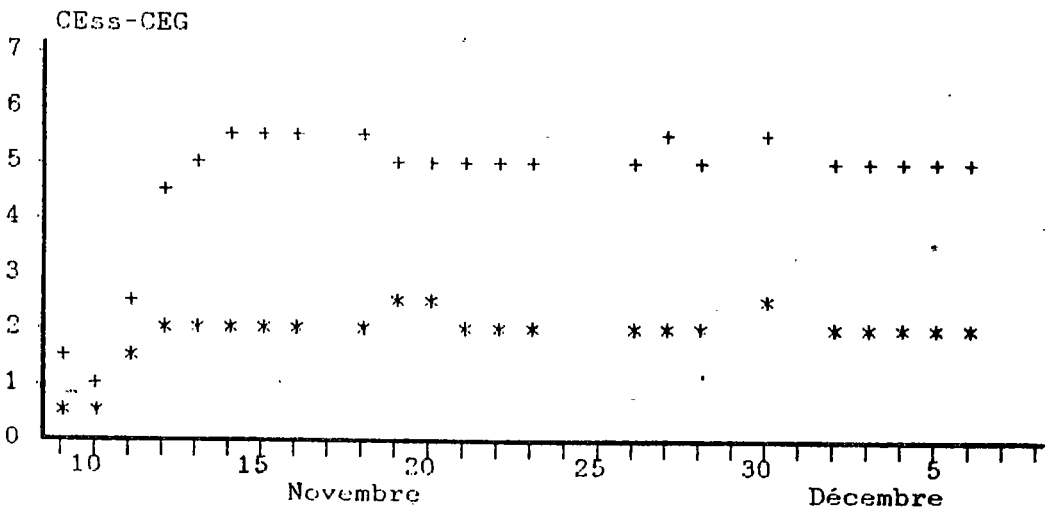


Fig.I-16.e.Variation de CEss et CEG au cours de l'essai de drainage interne-bilan naturel-Profondeur 85 cm.



Les variations de la CEG (Conductivité Electrique Globale mesurée par sonde quadripôle) ont été sensiblement parallèles, mais elles ont été stabilisées plus rapidement que CEss (l'état d'équilibre entre la solution du sol et la solution interne du salinity sensor nécessite un certain temps pour s'établir, le temps de réponse est de l'ordre de 6 heures). La CEG s'est stabilisée donc aux alentours de 2 mmhos, elle a gardé cette valeur durant toute la période de suivi, sauf entre 0 et 20 cm où elle a baissé à 1.2 à 1.7 mmhos.

A signaler, qu'en fin d'infiltration la CEss était très proche à chaque niveau de la CEes, ce qui s'explique par le fait que le sol était alors à saturation.

Au niveau des électrodes spécifiques aux ions calcium (ESI), nous avons constaté :

- à 20 cm, diminution régulière de l'activité de l'ion calcium pendant la phase de drainage interne suivie d'une remontée lente pendant la phase de bilan naturel,
- à 85 cm, diminution plus faible mais qui s'est poursuivie jusqu'à la fin du bilan naturel (Fig. I-17).

Les explications possibles seraient :

1. Augmentation de la mise en solution du calcium, donc de l'activité par la saturation du milieu après l'infiltration.
2. Lors du drainage interne, diminution de la teneur en eau entraînant une légère concentration et sans doute une complexation du calcium en solution qui se traduit par une baisse de l'activité.

Les valeurs voisines de zéro enregistrées en fin du drainage et en début du bilan naturel, dans le cas de l'électrode installée à 20 cm coïncident avec le passage du plan de flux nul à 20 cm. La tranche de sol au dessus de 20 cm est soumise à la remontée capillaire, alors que la zone en dessous continue à subir un drainage.

3. Pendant le bilan naturel, le dessèchement est plus accentué en surface, l'augmentation de concentration du calcium en solution se traduit par une augmentation de l'activité.

A 85 cm, le plan de flux nul est toujours supérieur à ce niveau, même en fin de bilan naturel. L'examen des profils hydriques confirme ce résultat.

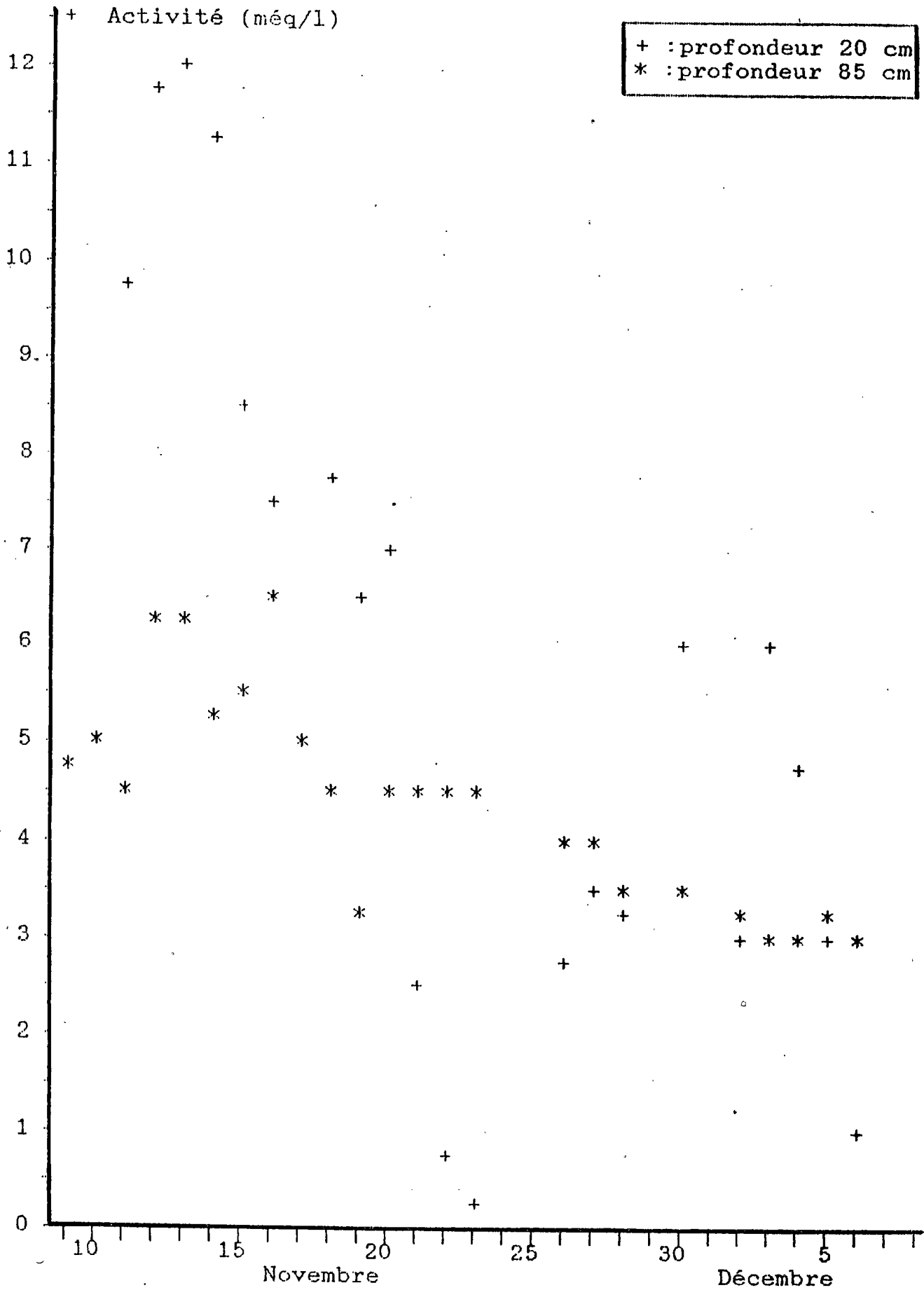


Fig.I-17.Variation de l'activité de l'ion Ca^{++} au cours de l'essai

II-2.3. Détermination des caractéristiques hydrodynamiques dans le sol saturé

Les mesures ont été effectuées à partir de prélèvements en cylindre de sol non perturbé. Ces échantillons ont été initialement saturés d'eau.

○ Les expérimentations menées au laboratoire, exception faite des mesures de densité, n'ont servi réellement qu'à voir si les résultats obtenus étaient cohérents entre eux, et avec les caractéristiques pédologiques du sol. Nous avons préféré à ces mesures, celles réalisées au champ, au cours du drainage interne, et qui étaient assez fiables et reflétaient mieux la réalité du sol en place.

II.2.3.1. Ksat (Perméabilité à saturation)

Lorsque le sol est saturé d'eau, $h(\theta)$ est nulle et la mesure de la conductibilité hydraulique (conductivité hydraulique) se ramène à la mesure habituelle de la perméabilité.

Elle est donnée par l'expression:

$$K_{sat} = 2.303 * (L / t_i - t_o) * \log((H_i + L)/(H_o + L))$$

avec:

- L = hauteur de l'échantillon,
- t_o = temps initial,
- t_i = temps final,
- H_o = hauteur d'eau initiale,
- H_i = hauteur d'eau finale.

Un programme " Ksat " calcule des valeurs de Ksat.

La perméabilité à saturation ainsi déterminée est (Tableau I-6):

-A ZELBA: elle est de l'ordre de 0.16 à 9.98 cm/j, le sol est plus perméable en surface et le devient de moins en moins en profondeur parallèlement à une augmentation de la teneur en argile.

-A SDUK SEBT: elle est comprise entre 1.6 et 60.65 cm/j, elle subit ainsi des variations importantes. Cependant, on peut constater qu'elle est comprise entre 1.8 et 5.8 jusqu'à 60 cm, et qu'au delà de ce niveau, elle subit des fluctuations brusques. Ceci pourrait être attribué à une teneur importante en argile dans ce niveau, et qu'au delà de cette profondeur la texture sableuse intercalée avec des niveaux plus argileux est à l'origine de ces variations en dent de scie.

OCHI (1984) a trouvé à BRAHMI, sur un sol analogue à celui de SDUK SEBT sur la tranche 0-80 cm, des valeurs de perméabilités variant de 5.6 à 22 cm/j. RIEU et al (1985), travaillant sur le même site, ont attribué cette perméabilité médiocre à la forte teneur en argile du sol et à sa compacité.

Tableau I-6 Ksat déterminées au laboratoire

Profondeur (cm)	ZELBA	SOUK SEBT
	Ksat cm/j	Ksat cm/j
0-15	9.98	2.11
15-30	3.71	5.83
30-45	1.72	1.82
45-60	0.40	5.45
60-75	4.09	21.37
75-90	0.64	1.62
90-105	1.82	29.88
105-120	0.48	2.96
120-135	0.21	60.65
135-150	0.15	36.87

II-2.3.2.h(0) (Succion/Teneur en eau)

Les mêmes cylindres sont ensuite resaturés et équipés d'un microtensiomètre, pesés et posés sur une masse de terre sèche. On effectue des mesures couplées du poids du cylindre de terre et la hauteur de la colonne de mercure .

$-h(t)$:

Les lectures faites au cours du temps ,ont permis d'observer pour les échantillons de ZELBA, que la succion passe par deux phases:

Phase-1: au cours de laquelle, l'évolution de la succion est lente, cette phase dure environ une heure.

Phase-2: au cours de cette phase, l'évolution est rapide, elle dure environ deux heures. Au delà de cette période, d'autres phénomènes semblent intervenir pour fausser les résultats, probablement, une pénétration de bulles d'air car les valeurs de la succion chutent anormalement.

En assimilant l'évolution dans chaque phase à une évolution linéaire, nous avons déterminé les paramètres de chaque portion de droites : $h = A \log(t) + B$

Pour la phase-1: A est comprise entre $1 E-2$ et $6 E-2$.
B est comprise entre $1.3 E1$ et $1.6 E1$

Pour la phase-2: A est comprise entre 1.5 et 4.8
B est comprise entre 2.3 et 10.8

$-h(\theta)$:

D'autre part, comme la succion est reliée à l'humidité par une relation du type $h = B * (\theta^A)$, nous avons recherché les paramètres A et B (Tableau I-7) :

Tableau I-7 Paramètres A et B de la relation de la succion en fonction de l'humidité

Profondeur	A	B
0-15	-1.18	7.30E2
60-75	-0.22	3.02E1
120-135	-1.16	3.70E1

II-2.3.3. Densité apparente

Ces mêmes cylindres sont utilisés pour la détermination de la densité apparente de chaque niveau.

La densité apparente augmente progressivement vers la base du profil pour le sol de ZELBA traduisant un enrichissement en éléments fins en profondeur (Fig. I-18).

Elle présente des valeurs assez proches à SOUK SEBT, (Tableau I-8) résultant des dépôts alluvionnaires assez récents (Fig. I-19).

Tableau I-8 Densité apparente

Profondeur (cm)	ZELBA	SOUK SEBT
	D.A g/cm ³	D.A g/cm ³
0-15	1.36	1.66
15-30	1.52	1.68
30-45	1.59	1.67
45-60	1.74	1.73
60-75	1.80	1.65
75-90	1.88	1.77
90-105	1.85	1.68
105-120	1.86	1.87
120-135	1.90	1.66
135-150	1.92	1.69

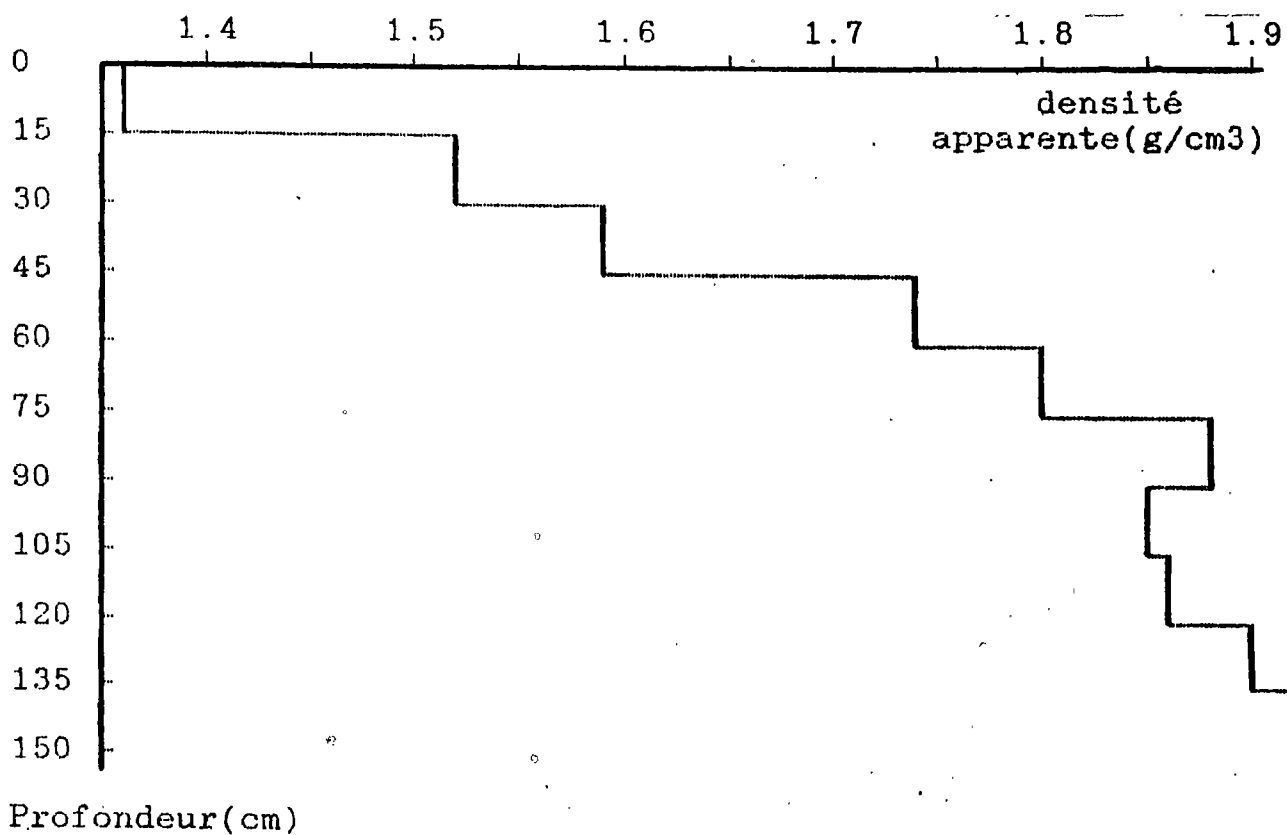


Fig. I-18. Densité apparente -Zelba

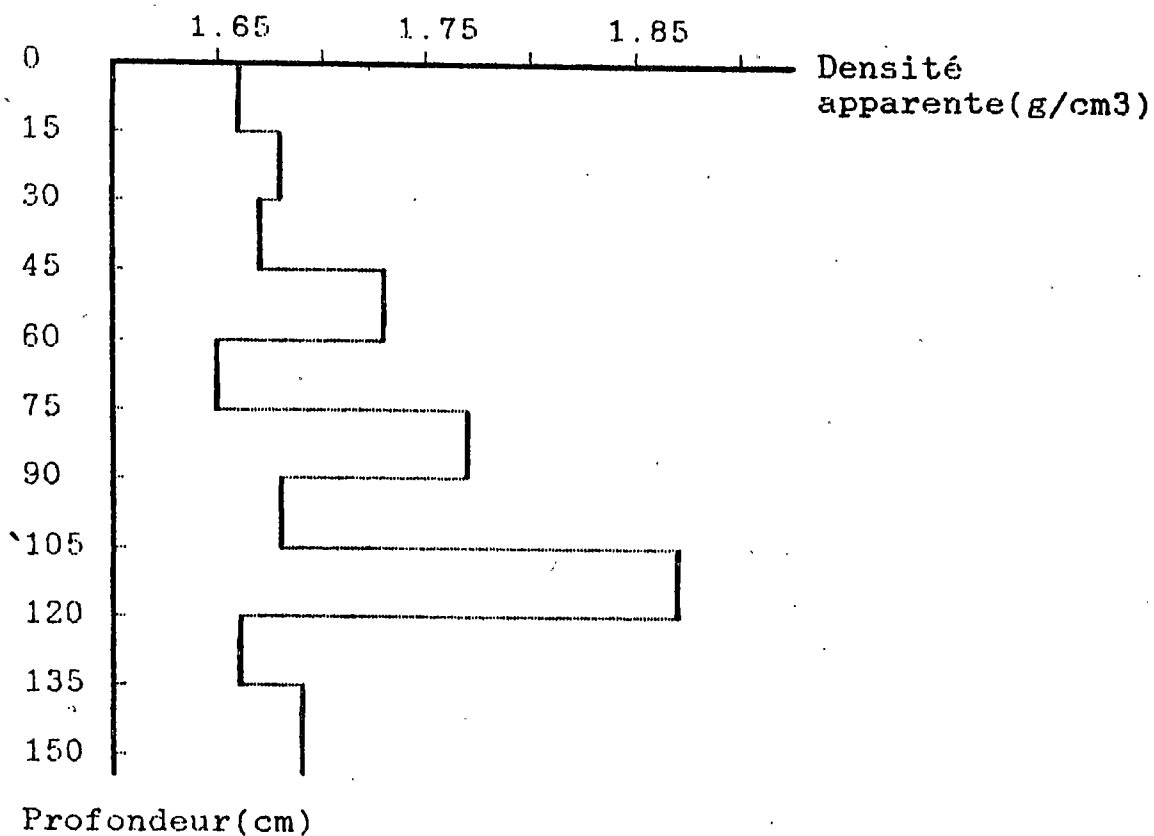


Fig. I-19. Densité apparente -Souk Sebt

II.2.4. Depouillement des mesures de l'essai d'infiltration et calcul des caractéristiques hydrodynamiques

Ces caractéristiques: conductibilité hydraulique ($K(\theta)$) et relation succion/teneur en eau ($h(\theta)$) sont en effet indispensables pour employer le modèle SIMUL.

On procède donc à l'analyse de l'évolution, pour chaque niveau de mesure, des valeurs de la teneur en eau (comptages neutroniques) et de la charge hydraulique (relevés tensio-métriques), au cours des différentes phases de l'essai d'infiltration, après avoir déterminé l'étalonnage des comptages en fonction de la teneur en eau.

II-2.4.1. Etalonnage neutronique

Deux méthodes ont été employées:

- l'étalonnage en bloc graphite au CEA: la méthode est fondée sur la mesure des coefficients d'absorption et de diffusion des neutrons d'un échantillon représentatif,

- l'étalonnage gravimétrique par comptages et prélèvements simultanés pour différents états hydriques.

La première méthode permet de calculer les paramètres d'étalonnage de la relation $Hv = a * N + b$, N représentant les comptages obtenus après pondération par un comptage dans l'eau, et ce pour tous les échantillons ou niveaux analysés.

La seconde, plus simple, n'est réalisable que si les teneurs en eau extrêmes sont suffisamment différentes, ce qui n'est généralement pas le cas que pour les horizons supérieurs, l'humidité variant beaucoup moins en profondeur.

La comparaison des deux méthodes pour les profondeurs où elles ont pu être utilisées parallèlement montre, comme cela avait déjà été remarqué antérieurement dans le Sud tunisien (VIEILLEFON, ZANTE 1982), que si les pentes des droites d'étalonnage sont en général semblables, on observe souvent des différences dans l'ordonnée à l'origine.

On a donc considéré, dans cette étude, que si l'étalonnage CEA pouvait être choisi pour les pentes (coefficient a), il convenait par contre de corriger les ordonnées à l'origine (coefficient b) en s'appuyant sur les moyennes des valeurs mesurées au cours des différentes phases de l'essai, notamment pour les horizons non superficiels.

On trouvera dans le tableau I-9, les résultats obtenus pour les 15 niveaux du profil témoin de ZELBA.

Tableau I-9 Exemples de sortie du programme PERMAL

JOUR NUMERO 11					
ECART MOYEN = -1,4					
PLAN DE FLUX NUL A 31,9 CM					
H CALCULE	H AJUSTE	NIVEAU	K	Ø%	h
174	182	10	-2,2E-1	24,6	163,6
156	146	20	-2,2E-1	26,2	136,4
152	152	30	-3,1E-1	27,7	122,2
153	157	40	4,1E-1	30,1	113,4
157	162	50	5,4E-1	32,0	107,5
		60	6,3E-1	30,5	103,4
172	172	70	6,8E-1	28,2	100,7
		80	7,0E-1	28,1	98,8
		90	7,5E-1	27,8	97,7
		100	7,9E-1	27,3	97,2
207	201	110	8,4E-1	27,0	97,1
		120	8,9E-1	26,6	97,4
		130	9,4E-1	26,3	98,0
		140	1,0E 0	26,3	98,9
250	250	150	1,0E 0	26,4	100,0

JOUR NUMERO 24					
ECART MOYEN = -8,3					
PLAN DE FLUX NUL A 81,2 CM					
H CALCULE	H AJUSTE	NIVEAU	K	Ø%	h
466	465	10	-5,8E-2	19,3	456,4
366	368	20	-9,9E-2	22,6	345,7
316	315	30	-1,3E-1	25,1	285,9
290	287	40	-1,6E-1	27,9	246,8
269	263	50	-1,7E-1	30,2	219,2
		60	-1,9E-1	28,7	198,8
253	252	70	-1,1E-1	27,0	183,3
		80	-1,5E-1	27,4	171,5
		90	1,7E-1	27,0	162,4
		100	1,8E-1	26,6	155,6
260	290	110	1,9E-1	26,3	150,5
		120	2,1E-1	25,9	146,9
		130	2,3E-1	25,6	144,5
		140	2,5E-1	25,6	143,2
293	274	150	2,6E-1	25,8	142,7

II-2.4.2. Ajustement des variations tensio-neutroniques en fonction du temps

Divers essais ont montré que lors des expériences en drainage interne comme en bilan naturel, les comptages neutroniques et les valeurs de charge évoluaient linéairement, en sens opposés, en fonction du logarithme du temps (VIEILLEFON 1983).

Il est donc très utile de porter ces mesures sur des graphiques semi-logarithmiques, d'une part pour s'assurer de ce fait, d'autre part pour déterminer les dates de changement d'allure de ces phénomènes, qui se traduisent par des pentes différentes des relations:

$$N = a * \log t + b$$

$$H = a' * \log t + b'$$

On notera sur les figures I-20, I-21 que les changements de pente sont généralement décalés de la surface vers la profondeur, traduisant ainsi le passage progressif d'un régime de drainage seul à un régime combiné remontée capillaire-drainage.

II-2.4.3. Calcul des caractéristiques $K(\theta)$ et $h(\theta)$

A. Méthodologie: mise au point du programme PERMAL

1) Principe

A partir des relations élaborées précédemment, il est possible de calculer, pour toute date choisie, qu'elle corresponde exactement ou non à une date de mesure effective sur le terrain, des valeurs estimées des comptages ou de la charge hydraulique à des niveaux choisis.

2) Modélisation du profil de charge

A l'aide de ces valeurs, on recherche alors un ajustement du profil de charge à une fonction numérique qui se rapproche suffisamment du profil réel, en ayant l'avantage de permettre les calculs automatiques.

Une fonction de la forme $H = A*Z + LN Z + C$, Z étant la profondeur, semble convenir généralement, si le sol ne présente pas de trop fortes discontinuités texturales. Cette courbe présentant 3 paramètres, il suffit de tester toutes les combinaisons de 3 valeurs tensiométriques et de choisir celle qui se rapproche le plus des valeurs non prises en compte, par exemple par la méthode des moindres carrés.

Il devient ainsi facile d'obtenir les données nécessaires au calcul de $K(\theta)$ et $h(\theta)$, c'est-à-dire:

- profondeur du plan de flux nul qui sépare les domaines soumis au drainage naturel et à la remontée capillaire,
- pente du profil de charge dH/dZ ,
- valeur de la succion h .

Fig.I-20.Evolution des comptages en fonction du logarithme du temps

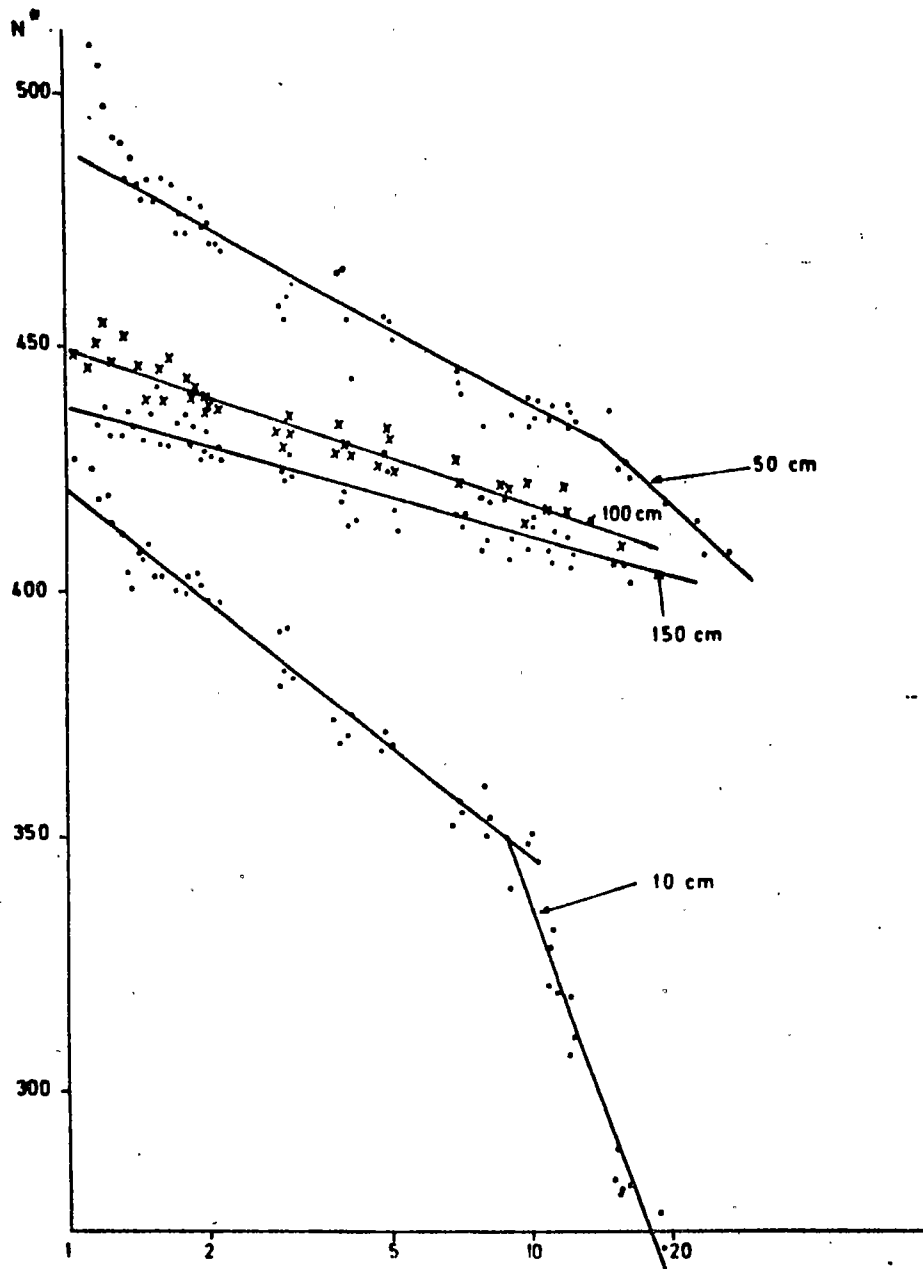
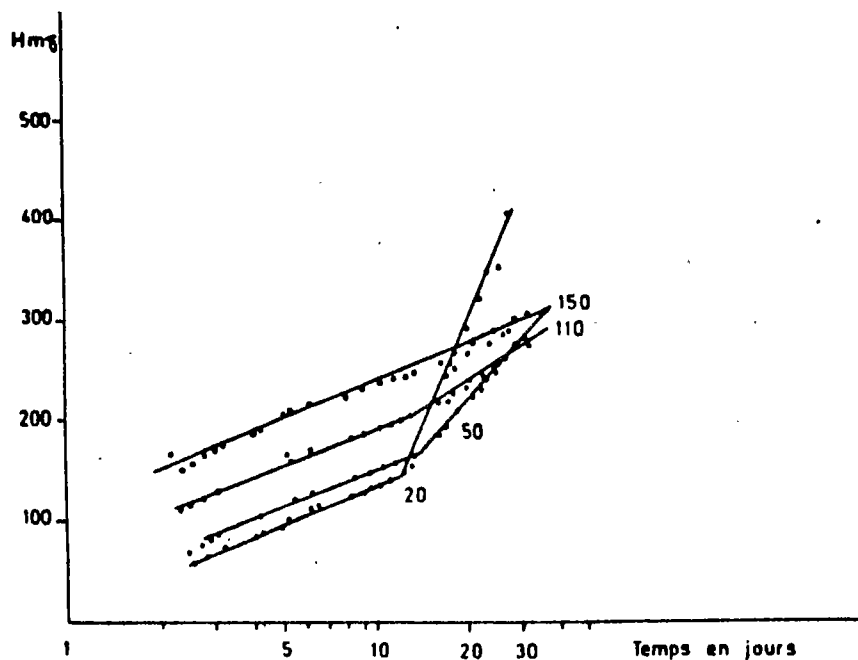


Fig.I-21.Evolution de la charge en fonction du logarithme du temps



3) Calcul de $K(\theta)$

Le plan de flux nul étant fixé, il est aisé de calculer automatiquement les variations instantanées de stock d'eau de chaque niveau choisi, soit par cumul ascendant, au-dessus du plan de flux, soit par cumul descendant au dessous.

En effet, le flux instantané correspondant à une teneur en eau donnée est égal au rapport de la variation de stock à la pente motrice, soit: $q = (dS/dt) / (dH/dZ)$ (en valeur absolue)

Or la variation de stock au dessous (zone de drainage) ou au dessus (zone de remontée capillaire) d'un niveau donné, est égale à la somme des variations de teneurs en eau des couches sus- ou sous-jacentes. Ces variations se calculent par la dérivée de la fonction qui lie la teneur en eau au temps, par l'intermédiaire des comptages. Il suffit donc de faire la somme de ces dérivées, et de les diviser par la pente motrice du même niveau obtenue auparavant pour connaître une valeur de $K(\theta)$.

Le modèle PERMAL permet ainsi le calcul automatique, pour une suite de dates choisies, et pour chaque niveau du profil étudié, de K , h et θ (Tableau I-9). Ces données étant enregistrées en séquence, il est ensuite facile de calculer les relations $K(\theta)$ et $h(\theta)$, soit pour chacun des niveaux élémentaires, soit pour des horizons entiers.

On remarquera que les valeurs de H ajustées à l'aide de l'équation sont assez voisines des valeurs estimées par les regressions $H = A \cdot \text{LOG } T + B$ (Fig. I-22). Les valeurs de K sont affectées du signe - dans le domaine de remontée capillaire (flux en direction de la surface), et du signe + dans le domaine du drainage.

B. Résultats obtenus pour la parcelle de ZELBA

Les valeurs journalières du plan de flux nul (PFN), de K , h et θ ont été calculées sur la durée des phases de drainage interne et de bilan naturel soit 30 jours, de l'essai d'infiltration de novembre 1985.

Les figures I-23 et I-24 présentent les résultats obtenus et montrent un regroupement effectif des données en 3 horizons pour $K(\theta)$. Pour $h(\theta)$, ainsi que le remarque RIEU (1983), on a pu se contenter d'une seule équation.

Les paramètres suivants ont donc été retenus pour les essais de calage du modèle.

	$K(\theta)$		$h(\theta)$	
	A	B	A	B
Couche 0-30	7.67 E8	15.81		
Couche 30-60	5.70 E10	20.61	29.79	-6.441
Couche 60-150	9.67 E19	35.21		

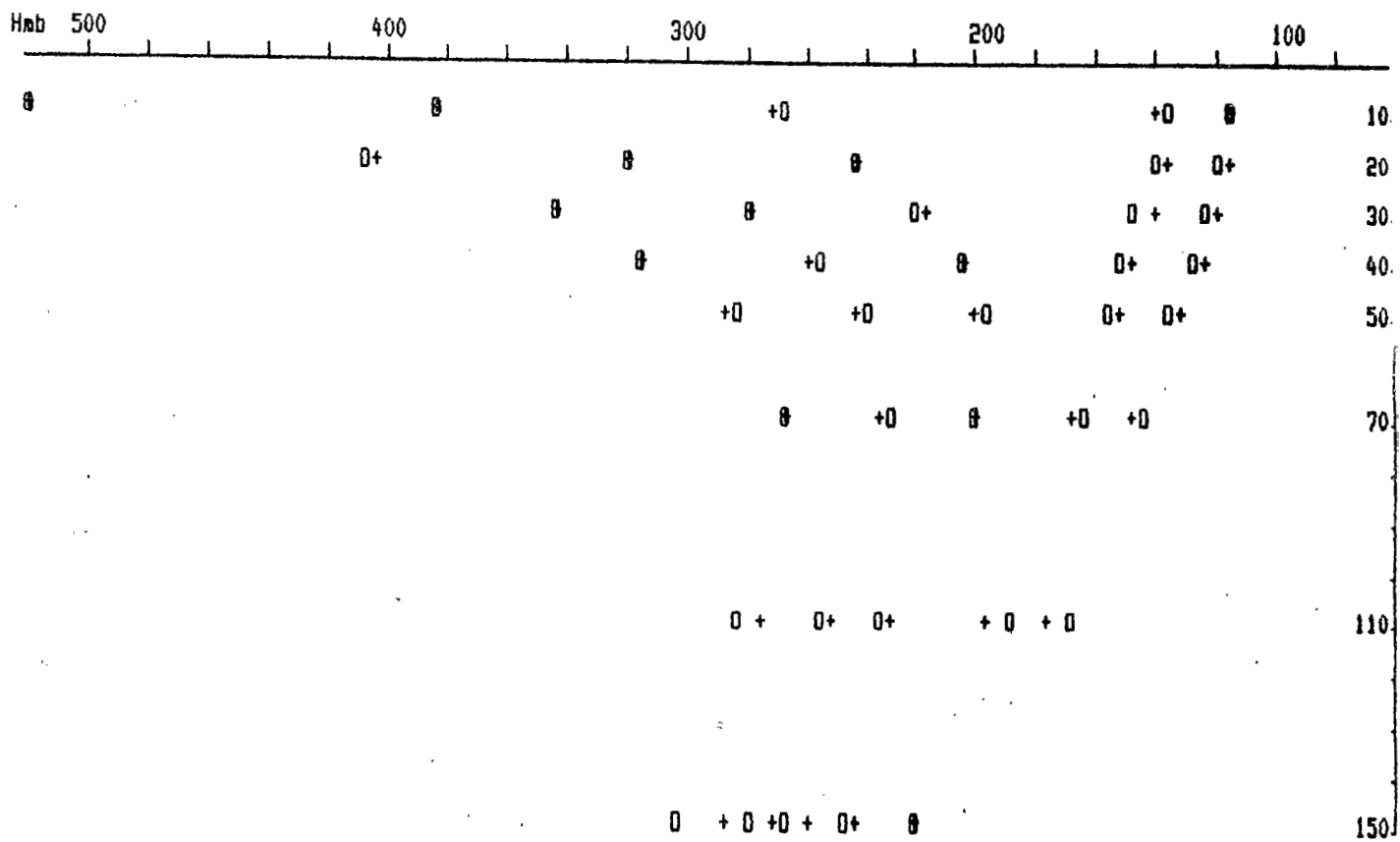
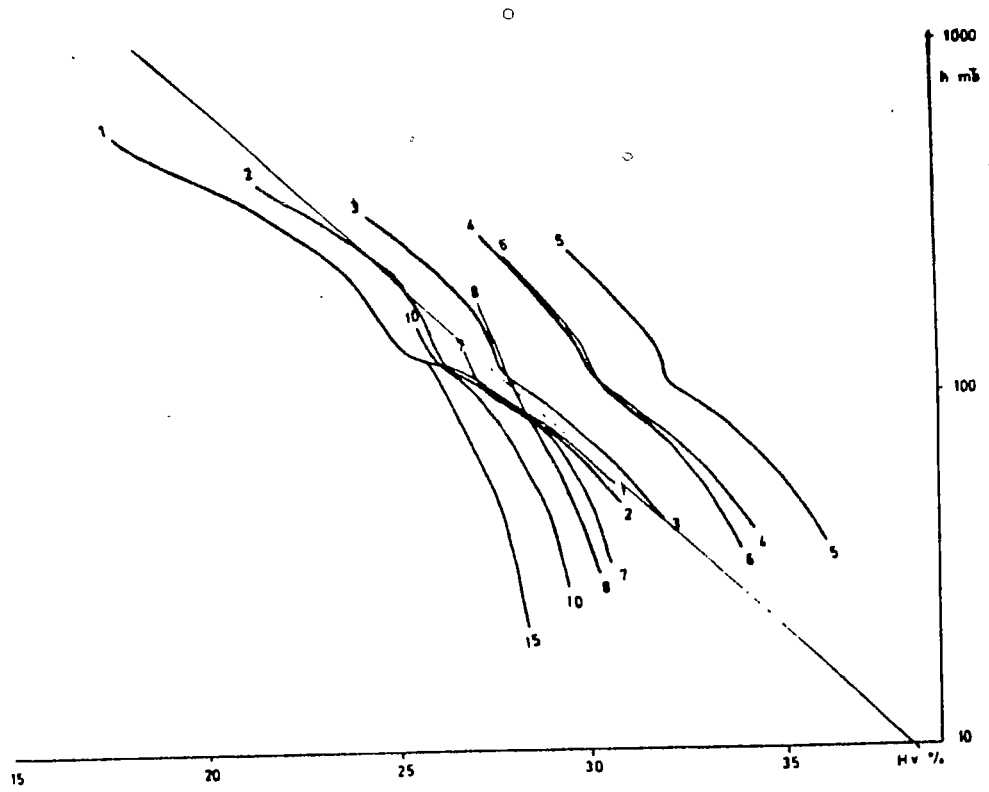
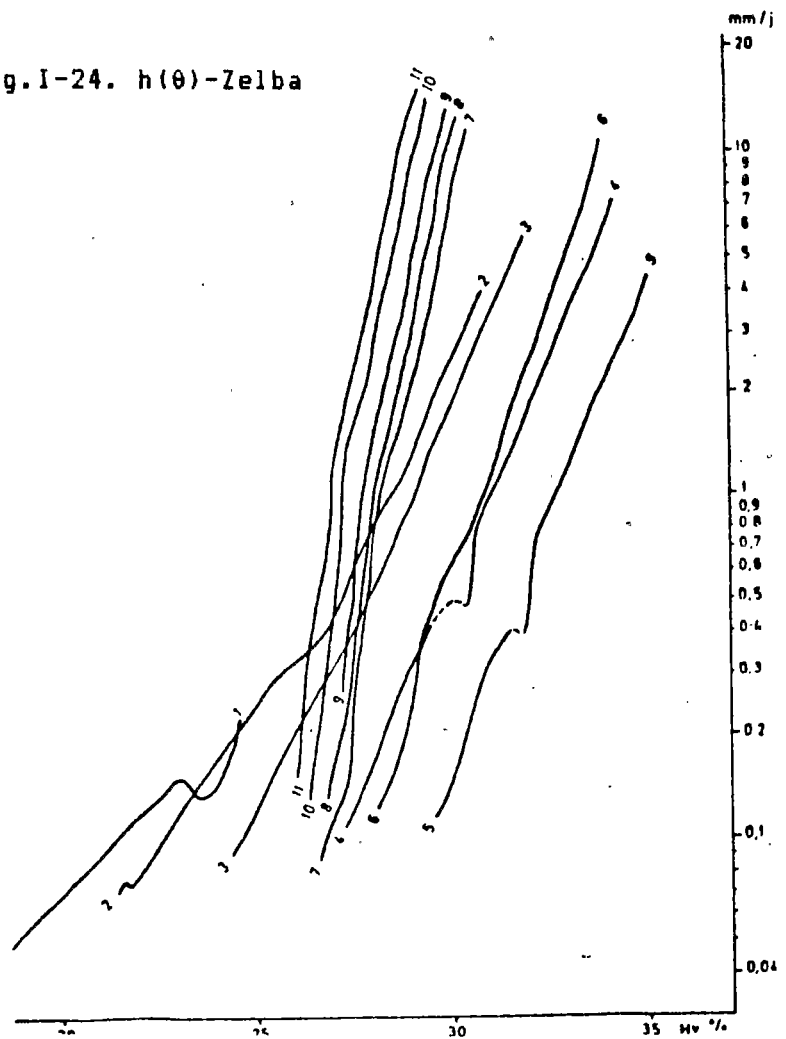


Fig.I-22.Profils de charge estimés(0) et ajustés(+) pour les jours n° 5,10,15,20 et 25

Fig. I-23. $K(\theta)$ -ZelbaFig. I-24. $h(\theta)$ -Zelba

II-3. Conduite de l'irrigation sur une culture.

II-3.1. Station de ZELBA

II-3.1.1. Préparation du sol et semis de la luzerne

Après un labour à la charrue araire suivi d'un recroisement et un épandage de 10 kg de superphosphate, des cuvettes ont été aménagées afin de recevoir les eaux d'irrigation.

Le semis de la luzerne (*Medicago sativa*) a été effectué à la volée le 5/3/86 après une pré-irrigation de 89.6 mm. Immédiatement après le semis, une irrigation de 96.6 mm a été réalisée.

II-3.1.2. Doses et fréquences d'irrigation

Les irrigations ont été poursuivies après le semis, à raison d'une fois tous les dix jours (Tableau I-10).

Tableau I-10 Dates et quantités des apports d'eau durant un cycle-ZELBA.

Date	Apport (cm)	Débit l/s	Période
27/02/86	8.96	14.0	pré-semis
05/03/86	9.66	11.2	semis
26/03/86	3.06	2.8	
14/04/86	5.12	4.2	
30/04/86	7.40	6.2	
12/05/86	7.52	6.3	
22/05/86	8.03	7.0	contrôle f
27/05/86	6.06	4.5	
04/06/86	6.09	6.1	
11/06/86	7.72	8.6	
18/06/86	7.45	5.5	
27/06/86	6.75	4.1	
07/07/86	6.88	4.2	
14/07/86	7.44	5.5	
19/07/86	7.70	7.3	contrôle g
28/07/86	7.88	6.5	
04/08/86	7.25	6.1	
08/08/86	6.62	6.5	
18/08/86	10.50	6.4	
29/08/86	8.87	6.2	
13/09/86	8.50	7.6	
22/09/86	7.62	6.8	contrôle h
06/10/86	9.47	7.0	
23/10/86	8.93		
06/11/86	7.26		
04/03/87	14.30		
28/03/87	13.08		

Le débit prévu avant la création du périmètre était de 36 l/s. Toutefois, après la mise en eau il s'est avéré inférieur à ce chiffre. Ainsi, pour notre parcelle, le débit était de 14 l/s au moment du pré-semis, 11.2 l/s au semis et environ à 7 l/s au cours des autres irrigations.

II.3.1.3. Efficience de l'irrigation de la luzerne

Au cours d'un cycle cultural, huit coupes ont été réalisées (Tableau I-11).

Tableau I-11 Dates et productions de la luzerne

Date	Production kg/400 m ²
19/5/86	90
17/6/86	140
13/7/86	170
14/8/86	180
13/9/86	150
18/10/86	135
1/12/86	177
3/3/87	178

Exception faite de la première coupe durant laquelle la luzerne était en cours d'installation, la production était en moyenne de 150-180 kg/400 m² soit 3750-4500 kg/ha.

A partir du 22/5/86 jusqu'au 3/3/87, l'apport total en eau, précipitations comprises, était de 1567.7 mm, dont 1470.2 par les eaux d'irrigation.

Pour une production de 28250 kg/ha, l'efficience de l'utilisation de l'eau est de 18 kg/mm/ha (en matière verte).

Se référant à la bibliographie qui mentionne que pour la luzerne la teneur en matière sèche (MS), est de 20 % de la matière verte (FAO, 1975), nous trouverons que 1 mm d'eau a servi à produire approximativement 3 à 4.5 kg de MS/ha.

Cette valeur apparaissant faible, est cependant satisfaisante si on tient compte de la qualité de l'eau d'irrigation et des conditions climatiques de la région. D'ailleurs une chute de production de 25 à 50 % est observable lorsque la CE de l'extrait de pâte est de 5.4 mmhos/cm (FAO).

II-3.1.4 Evaluation de la quantité de sel apportée par les eaux d'irrigation

Cette eau assez chargée en sels a déposé depuis le début des irrigations et durant environ un cycle cultural et

pour un apport d'eau de 793.96 m³, 3501.36 kg de sels (9 kg/m²), dont la majorité sont des chlorures de sodium.

Si on considère que la densité apparente du sol est de 1.5 g/cm³, et si on raisonne sur une tranche de sol de 150 cm de profondeur, nous trouverons une teneur de 0.39 g de sels/100 g de sol. La teneur en sel est considérée salinisante lorsqu'elle atteint 0.3 g/100 g (in P. WIDMOSER, 1984). Ce chiffre est déjà dépassé dans notre station.

II-3.2. Station de SOUK SEBT

II-3.2.1 Installation de la luzernière

Une luzerne de variété africaine (*Medicago africana*) a été introduite dans la parcelle le 19 Mars 1987. Cette culture étant répandue dans le périmètre, elle fait partie intégrante de l'assolement cultural.

Après un labour avec une charrue araire, et un épandage de 10 kg de P₂₀₅ et 5 kg d'ammonitre, on a semé cette luzerne à raison de 20 kg/ha.

II-3.2.2 Irrigations réalisées sur une compagne

Dates et volumes des apports (Tableau I-12 a et b).

Les irrigations ont démarré vers le mois de mai 1987.

Tableau I-12 a. Dates et quantités des apports d'eau- SOUK SEBT

Date	Apport mm		Période
	Pluviométrie	Irrigation	
12/03/87	21.4		pré-semis semis
19/03/87			
23/03/87	15.1		
30/03/87	24.6		contrôle f
02/04/87	36.5		
16/05/87	31.9		
15/05/87	13.2		
26/05/87	1.2	26.5	
08/06/87	22.1	34.4	contrôle g
15/06/87	3.0	29.3	
22/06/87		46.3	
26/06/87			
01/07/87		41.3	
08/07/87		36.7	
15/07/87		48.5	

Tableau I-12 b. Dates et quantités des apports d'eau -SOUK SEBT

Date	Apport mm		Période
	Pluviométrie	Irrigation	
27/07/87			coupe-I
28/07/87		70.0	
08/08/87		49.7	
13/08/87		47.1	
27/08/87		47.3	
02/09/87			coupe-II
17/09/87		49.5	
24/09/87			contrôle h
29/09/87		39.9	
01/10/87	13.1		
07/10/87	15.8		
08/10/87	0.4		
06/11/87	4.1		
12/11/87	10.5		
17/11/87	12.4		
23/11/87	13.1		
30/11/87	8.8		
03/12/87	2.6		
05/12/87			coupe-III

II-4. Evolution de la salure au cours de la culture

II-4.1. Suivi de la salure par analyse classique de laboratoire

A partir des prélèvements de contrôle, on a vu que lors de l'essai d'infiltration, où plus de 400 mm d'une eau titrant 4.5 g/l ont été apportés, le sol avait subi un début de salinisation dans ses horizons supérieurs (3 à 4 mmhos contre 1 avant l'essai).

Au cours de la culture de la luzerne, il est normal que les fortes irrigations pratiquées aient poursuivi cette évolution dont les effets peuvent être très importants sur les rendements.

Il était donc essentiel de vérifier si cette tendance se confirmait, et surtout d'en observer la progression dans le profil.

On trouvera dans le tableau I-13 les profils de conductivités mesurés sur extrait de saturation pour les différents contrôles effectués (Fig. I-25 et I-26).

Fig.I-26.Evolution de la CEes-Zelba

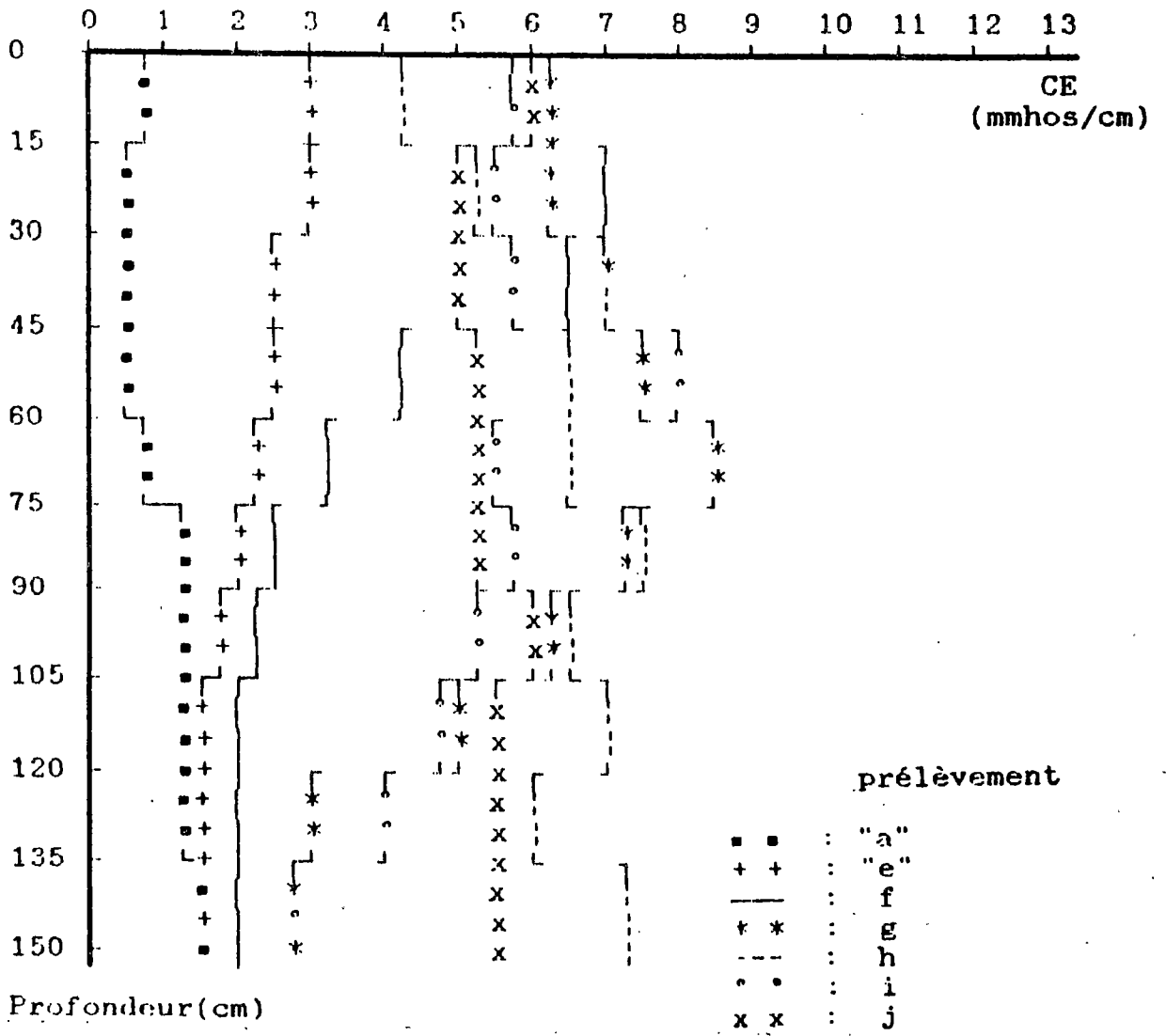


Fig.I-25.Evolution de la CEes dans les contrôles

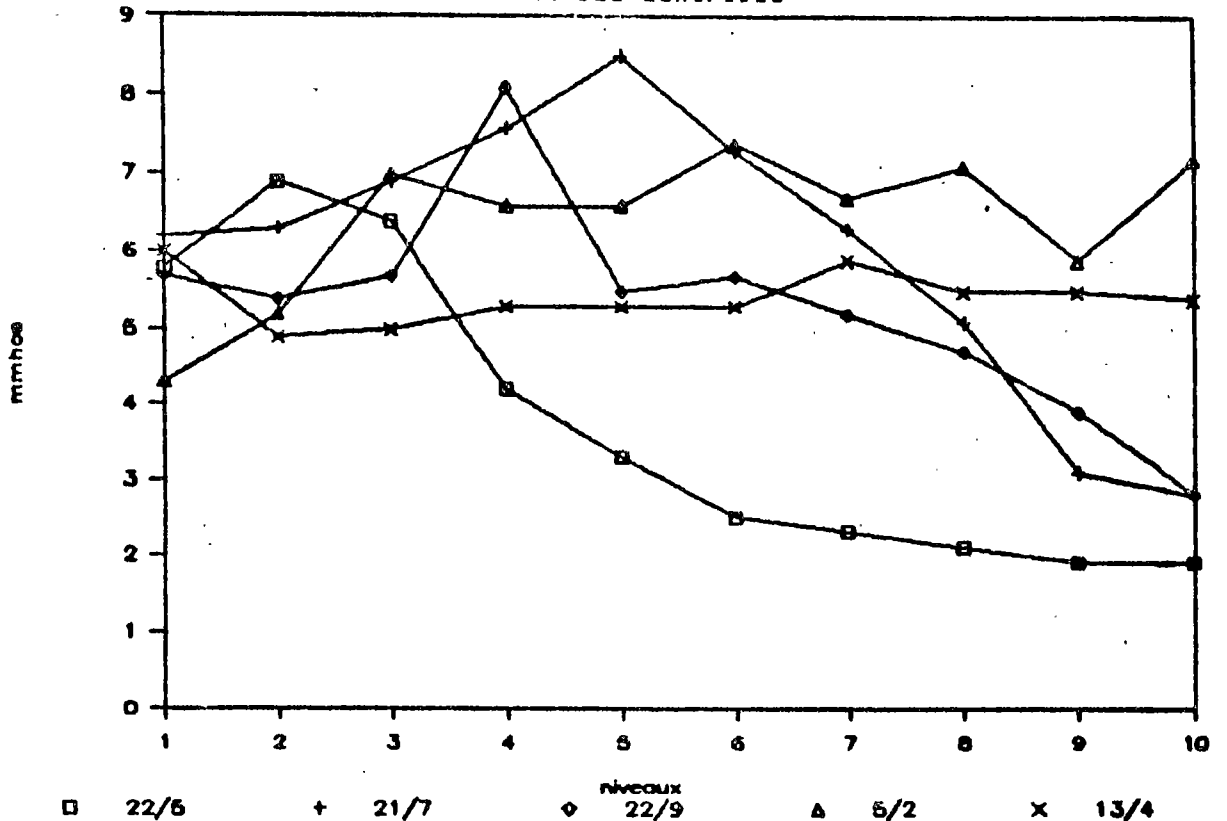


Tableau I-13 Profils de conductivité des contrôles
(sur extraits de pâte saturée)

Profondeur	22/5/86	21/7/86	22/9/86	5/2/87	13/4/87
0 - 15	5.8	6.2	5.7	4.3	6.0
15 - 30	6.9	6.3	5.4	5.2	4.9
30 - 45	6.4	6.9	5.7	7.0	5.0
45 - 60	4.2	7.6	8.1	6.6	5.3
60 - 75	3.3	8.5	5.5	6.6	5.3
75 - 90	2.5	7.3	5.7	7.4	5.3
90 - 105	2.3	6.3	5.2	6.7	5.9
105 - 120	2.1	5.1	4.7	7.1	5.5
120 - 135	1.9	3.1	3.9	5.9	5.5
135 - 150	1.9	2.8	2.8	7.2	5.4

On constate d'abord que la salinisation des horizons supérieurs, avec des fluctuations dues aux apports d'eau, ne dépasse pas beaucoup ce qui avait été obtenu dès la première irrigation.

Par contre, elle a tendance à se développer dans les horizons profonds, pour conduire, après près d'un an de culture, à une stabilisation entre 5 et 6 mmhos pour l'ensemble du profil (Fig. I-27 a et b).

A l'aide de ces données et des teneurs en eau de ces profils de contrôle, il est possible d'évaluer les quantités de sels stockées dans le sol, pour en déduire, compte tenu des apports par l'eau d'irrigation, les quantités drainées au dessous du profil de sol étudié, dont la profondeur a été limitée à 150 cm (Tableau I-14).

Tableau I-14 Bilan des sels (en g pour 1.5 m³)

Date	22/5	21/7	25/9	5/2	13/4	Total
Apports	2872	2564	1150?	1227		7813
Stock	2582	4348	3808	5050	3947	
Accumulé	+1766	-540	+1242	-1103		+1345
Drainé	1106	3104	0 ?		2330	6540

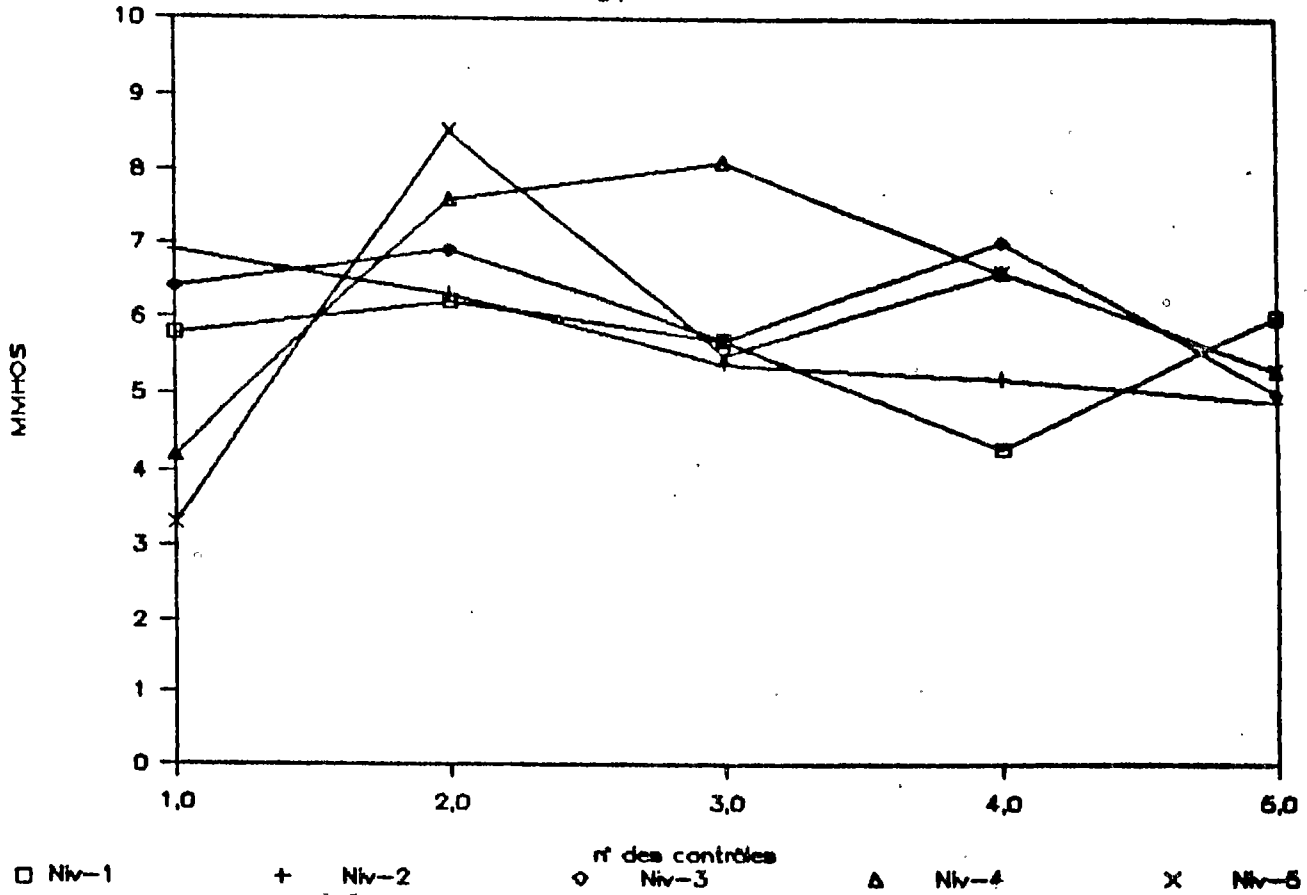


Fig.I-27 a.Evolution de la CEes par niveau (1 à 5)

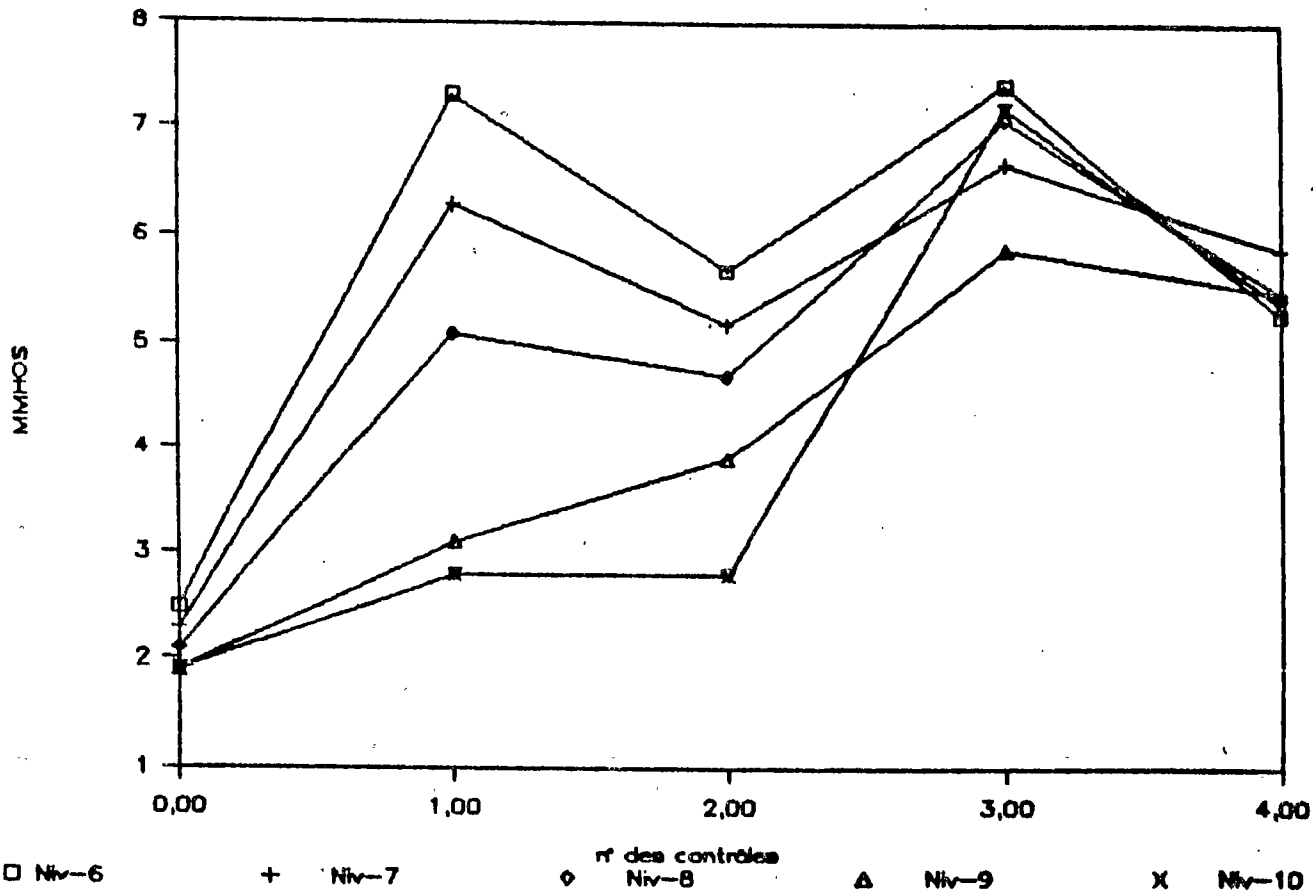


Fig.I-27 b.Evolution de la CEes par niveau (6 à 10)

Ce tableau appelle quelques commentaires:

- les apports ont été calculés en fonction des quantités d'eau d'irrigation en supposant une valeur constante de sa conductivité, mais on peut s'étonner qu'entre le 25/9 et le 5/2 l'accumulation dans le sol soit supérieure à l'apport; pour expliquer cela il faut faire appel, soit à une irrigation supplémentaire qui n'aurait pas été prise en compte, soit à une variation momentanée de la conductivité de l'eau, deux hypothèses peu probables, soit encore à une remontée capillaire qui pourrait se concevoir, l'hiver 86/87 ayant été particulièrement sec (118,7 mm de pluies du 11/10 au 11/4),

- sur la ligne "Stock" on remarque que la progression est loin d'être régulière, ce qui se traduit sur la ligne "Accumulations" par des valeurs tantôt positives, tantôt négatives; ceci ne doit pas trop surprendre car la position relative dans le temps de la date du contrôle par rapport à l'apport précédent joue forcément un rôle, chaque irrigation ayant pour effet de lessiver une partie des sels accumulés dans la période inter-irrigation qui la précède,

- sur l'année on constate finalement une accumulation globale de seulement 1365 g de sels, alors que la quantité apportée par l'irrigation se monte à 7813 g; le lessivage porterait donc sur près de 86% de la salure apportée, constatation favorable, mais qu'il sera nécessaire de confirmer.

Par ailleurs, à la reprise des irrigations, prélèvement "j", la salure était assez constante sur tout le profil, la CEes était de 5 à 6 mmhos. Cette valeur était assez voisine de celle de l'eau d'irrigation, probablement un certain équilibre était en train de se réaliser conformément à ce qui a été observé dans les travaux du CRUESI, qui mentionnait qu'un équilibre s'établit entre l'eau d'irrigation et le sol après une durée de 4 à 5 années.

Toutefois, pour notre cas, l'augmentation progressive de la CEes en profondeur permet d'envisager une remontée future de la salure vers les niveaux de surface. Nous remarquons que les apports d'eau sur la parcelle étaient fréquents et suffisants, nous pouvons même affirmer qu'une fraction lessivante d'au moins 15 % a été administrée.

Le bilan des sels (Tableau I-15) entre l'état initial et l'état "j" ($\sum(Sj-Si)$) était de 3.424 kg /m² pour un apport de 9 kg (800 m³). Ainsi, 5.576 kg ont été lessivés, ceci durant moins d'un cycle exact.

La teneur en sels durant cette phase reste en dessous de 0.3 g/100g, elle varie entre 0.144 et 0.174. Mais cela n'empêche pas de constater déjà une augmentation nette de cette teneur qui n'était initialement que de 0.015 à 0.042 seulement.

Tableau I-15 Bilan des sels entre l'état initial et le prélèvement "j"

Profondeur cm	CEi mmho	CEj mmho	Si g/m ²	Sj g/m ²	Sj-Si g/m ²	Ti g/100g	Tj g/100g
0-15	0.8	6.0	43.4	342.7	299.3	0.021	0.168
15-30	0.5	4.9	34.3	328.5	294.1	0.015	0.144
30-45	0.5	5.0	40.1	375.6	335.6	0.017	0.158
45-60	0.6	5.3	60.3	455.1	394.8	0.023	0.174
60-75	0.8	5.3	72.6	450.8	378.2	0.027	0.167
75-90	1.3	5.3	115.5	439.4	323.9	0.041	0.156
90-105	1.3	5.9	108.6	481.4	372.8	0.039	0.173
105-120	1.2	5.5	105.5	451.1	345.7	0.038	0.162
120-135	1.3	5.5	116.7	460.8	344.1	0.041	0.162
135-150	1.4	5.4	121.4	457.2	335.9	0.042	0.159
Total					3424.4		

CEi = conductivité initiale en mmhos/cm.

CEj = conductivité du prélèvement "j" en mmhos/cm.

CEf = conductivité finale réalisée le 21/10/87.

Si = Ci * 0.7 * SP * DA * E

Sj = Cj * 0.7 * SP * DA * E

Sf = Cf * 0.7 * SP * DA * E

Ti = Teneur initiale en g de sel/100 g de sol.
 Tj = Teneur du prélèvement "j"
 Tf = Teneur finale (21/10/87)
 E = Epaisseur de la couche en m
 DA = densité apparente en g/cm³
 SP = Pourcentage de saturation

Après deux cycles d'irrigation (Tableau I-16), et pour un apport en sels estimé à au moins 18 kg/m²:

a) Si on considère une tranche de sol de 150 cm, nous aurons:

$$\Sigma(Sf-Si) = 14.455 \text{ kg de sel}$$

Pour un apport total de 18 kg, une quantité de 3.545 kg a été lessivée.

Vu que jusqu'au prélèvement "j", sur un apport de 9 kg/m², 5.576 kg ont été lessivés. Il en résulte qu'entre "j" et l'état final, tout le sel apporté a précipité dans cette tranche. Il en reste même un surplus de 2 kg (5.576-3.545) qui ne pourrait être expliqué que par un apport d'eau durant la deuxième année d'irrigation, plus élevé que celui estimé. Il serait de l'ordre de 444.5 l (2 kg / (4.5 g/l)).

La teneur en sels a augmenté sensiblement durant cette période, de l'ordre de 0.3 % en surface, elle atteindrait 0.9 % à 45 cm de profondeur. La salinisation du sol est manifeste.

b) Si on considère une tranche de sol de 2.95 m, et si on suppose que la CEi était voisine de 1.3 mmhos/cm entre 1.5 et 3 m, nous aurons:

$$\Sigma(Sf-Si) = 21.628 \text{ kg}$$

Pour un apport de l'ordre de 20 kg de sel (18 + 2), cela traduirait grossièrement, que la quantité de sels apportée se retrouve sur cette tranche de sol, et ce qui a été lessivé jusqu'à 150 cm a précipité un peu plus bas.

Cependant, l'augmentation de la CE au delà de 3 m, ce qui est très probable, vu qu'à 2.95 m elle est de 6.2 mmhos/cm, ne peut s'expliquer que par le fait que le sol même au delà de 3 m a été enrichi en sels. La question qui se pose est de savoir si ce lessivage s'étend profondément, ou bien s'il s'arrête à un niveau relativement proche de la surface du sol, et dans un tel cas quel danger futur existe-il de voir une remontée progressive de la salure jusqu'au niveau de surface?

Cette situation est déjà assez grave pour le reste du périmètre, si on tient compte de l'insuffisance des quantités distribuées aux agriculteurs.

Tableau I-16 Bilan des sels entre l'état initial et l'état final

Profondeur cm	CEi mmho	CEf mmho	Si g/m ²	Sf g/m ²	Sf-Si g/m ²	Ti g/100g	Tf g/100g
0-15	0.8	9.6	43.4	514	471	0.021	0.252
15-30	0.5	11.6	34.3	787	753	0.015	0.345
30-45	0.5	16.5	40.1	1309	1268	0.017	0.549
45-60	0.6	27.0	60.3	2343	2283	0.023	0.898
60-75	0.8	23.5	72.6	2110	2037	0.027	0.781
75-90	1.3	26.5	115.5	2223	2108	0.041	0.788
90-105	1.3	23.0	108.6	2011	1902	0.039	0.725
105-120	1.2	18.5	105.5	1716	1611	0.038	0.615
120-135	1.3	14.8	116.7	1181	1064	0.041	0.414
135-150	1.4	12.6	121.4	1080	958	0.042	0.375
150-165	1.3	20.0	116.7	1696	1579	0.041	0.595
165-180	1.3	10.2	116.7	865	748	0.041	0.303
180-195	1.3	9.7	116.7	871	754	0.041	0.306
195-210	1.3	9.8	116.7	929	812	0.041	0.326
210-225	1.3	9.4	116.7	938	821	0.041	0.329
235-250	1.3	9.8	116.7	929	812	0.041	0.326
250-265	1.3	7.6	116.7	682	566	0.041	0.239
265-280	1.3	6.7	116.7	635	518	0.041	0.223
280-295	1.3	6.2	116.7	680	564	0.041	0.239
Total					21628		

II-4.2. Bilan des sels - SOUK SEBT

II-4.2.1 Evolution de la salure

Comme il a été mentionné précédemment, l'eau d'irrigation utilisée, celle de Bou Heurthma, ne contenait que 0.49 g de sels /l. Les bicarbonates sont les plus prédominants (244 mg/l). Durant le cycle d'irrigation, du 26/5/1987 au 24/9/1987, et au cours duquel on a apporté 210.64 m³ d'eau d'irrigation, 103.21 kg de sels ont été déposés dans la parcelle, soit 258 g/m².

Si on pose comme densité apparente moyenne 1.7 g/cm³. Sur une tranche de sol de 1.50 m, l'eau d'irrigation entraîne une salinisation du sol d'environ 0.01 g de sels pour 100 g de sol.

Par ailleurs, on constate une diminution de CE (prélèvement h) surtout dans les couches supérieures. Les valeurs oscillent entre 1 et 3 mmhos/cm. Par contre en profondeur, une augmentation intense et progressive de la salure est souvent enregistrée, la CE est de l'ordre de 17 mmhos/cm.

L'analyse de l'eau de drainage au niveau de la station montre une baisse de la salure de cette eau durant l'hiver:

juillet 1986 R.S = 19.5 g/l

décembre 1987 R.S = 6 g/l

Le bilan des sels entre le début de l'irrigation (contrôle f) et la fin de l'irrigation (contrôle h) serait négatif vu que la salure de l'eau d'irrigation est inférieure à celle du sol. Pour un apport de sels de 258 g/m² (210.64 m³ d'eau), le bilan des sels est de l'ordre de 843.93 g/m² (Tableau I-17). Ceci dénote un lessivage des sels par les eaux d'irrigation.

Tableau I-17 Bilan des sels entre le début de l'irrigation (contrôle f) et la fin de l'irrigation (contrôle h)

Profondeur cm	CE f mmho	CE h mmho	Sf g/m ²	Sh g/m ²	Sh-Sf g/m ²	Tf g/100g	Th g/100g
0-15	1.8	2.6	163.10	226.59	+63.49	0.065	0.091
15-30	2.2	0.6	213.40	55.03	-158.37	0.084	0.021
30-45	6.3	3.6	629.69	328.25	-301.43	0.025	0.131
45-60	10.4	6.6	1076.82	623.42	-453.04	0.414	0.240
60-75	13.4	8.8	1207.20	869.02	-338.18	0.487	0.351
75-90	15.0	9.3	1031.46	864.02	-167.26	0.388	0.325
90-105	13.2	12.2	861.53	796.26	-65.27	0.341	0.315
105-120	13.9	14.8	955.24	929.09	-28.34	0.034	0.331
120-135	14.1	17.0	860.17	1096.34	+236.17	0.345	0.044
135-150	14.6	17.0	828.04	965.32	+136.28	0.327	0.380
150-165	13.9	16.3	912.62	925.57	+12.96	0.036	0.365
165-180	12.2	14.8	692.76	919.19	+219.43	0.273	0.362
Total					843,93		

La teneur en sels durant cette période varie de 0.02 à 0.38g/100g de sol. Au début de l'irrigation, elle était beaucoup plus forte (0.07 à 0.50). Une diminution progressive des valeurs de teneur en sels est enregistrée dans les couches de 15 à 90 cm. Les couches sous-jacentes, beaucoup plus sableuses sont enrichies.

Quant à la situation avant et après irrigation (état : i=initial, f = final), elle pourrait être résumée dans le tableau suivant (tableau I-18). Pour un apport total des sels de 170.25 kg, soit 425 g/m² et en considérant une tranche de sol de 1.50 m, on aura :

$$\Sigma(Sf - Si) = - 2510.28 \text{ g/m}^2.$$

Tableau I-18 Bilan des sels entre l'état final et l'état initial

Profondeur cm	CEi mmho	CEf mmho	Si g/m ²	Sf g/m ²	Sf-Si g/m ²	Ti g/100g	Tf g/100g
0-15	2.7	2.6	225.89	226.59	0.63	0.091	0.091
15-30	8.3	0.6	878.47	55.03	-823.44	0.347	0.021
30-45	10.5	3.6	1159.94	328.25	-831.69	0.463	0.131
45-60	13.7	6.6	1443.39	623.42	-819.97	0.556	0.240
60-75	14.8	8.8	1487.17	869.02	-618.15	0.60	0.351
75-90	11.9	9.3	840.41	864.04	+ 23.99	0.316	0.325
90-105	9.4	12.2	580.35	796.26	+215.09	0.230	0.315
105-120	14.4	14.8	989.06	929.09	- 59.07	0.352	0.331
120-135	14.4	17.0	828.27	1096.34	+268.07	0.332	0.440
135-150	13.4	17.0	832.24	965.32	+135.08	0.328	0.380
Total					2510.28		

Au bout d'un cycle d'irrigation, le sol a perdu approximativement 2511 g/m² pour un apport de 425 g/m² par les eaux d'irrigation. Autrement dit, cette eau a participé à évacuer, en plus de ce qu'elle apporte, 2.086 kg/m² soit 20.86 T/ha.

Les couches supérieures initialement peu chargées, sont souvent dessalinisées. Quant à la teneur en sels qui varie de 0.1 à 0.6 g/100g au début, elle a baissé en fin de l'irrigation pour atteindre 0.1 à 0.5 g/100 g de sol.

II-4.2.2. Evolution de l'Alcalinité

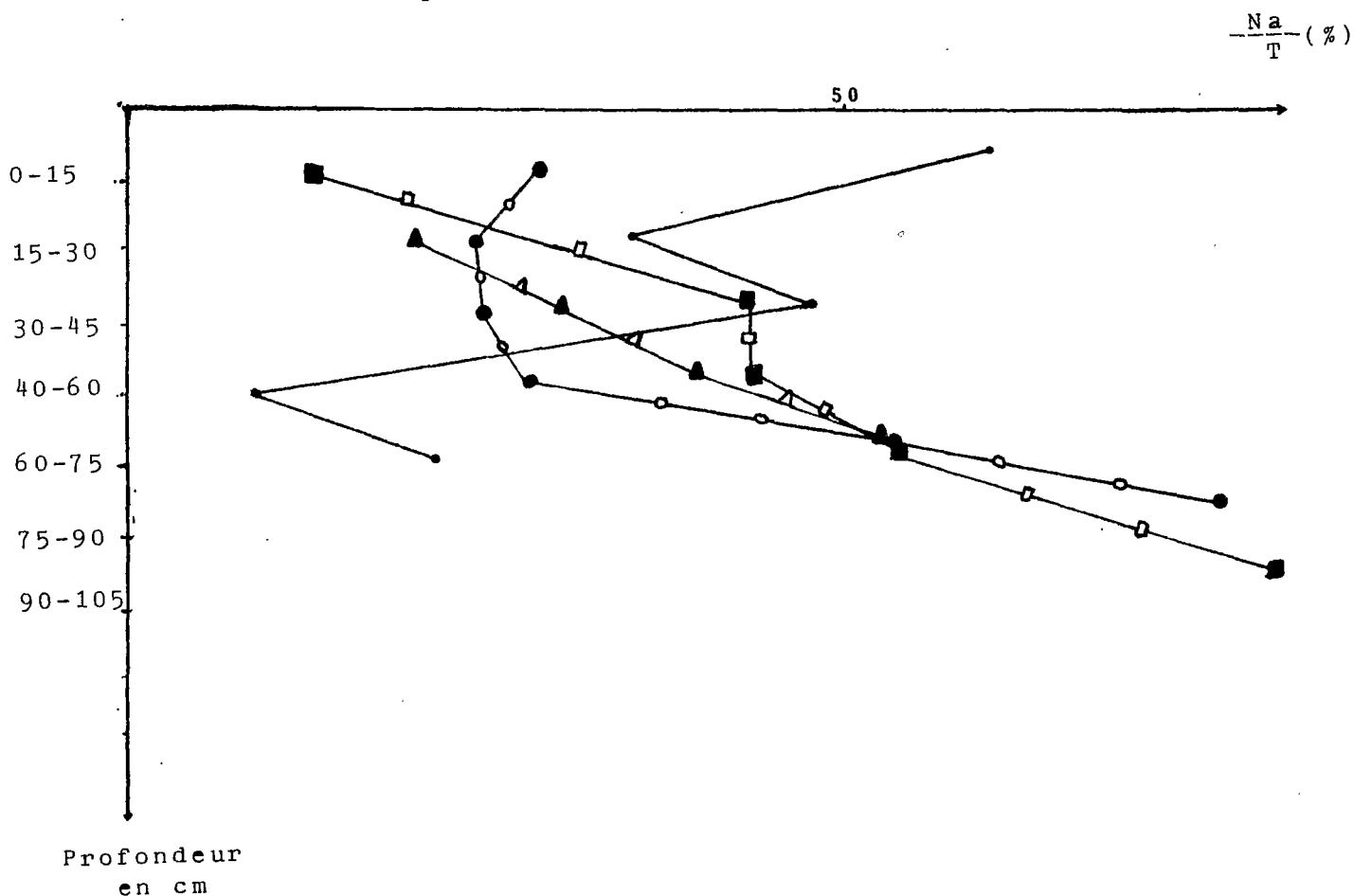
Avant le démarrage des irrigations, le sol était salso-dique en surface, et très salé en profondeur (Tableau I-19).

Après un cycle d'irrigation, l'alcalinisation a affecté le sol jusqu'à 90 cm, ceci s'est réalisé en même temps qu'une dessalinisation en surface (entre 0 et 45 cm) (Fig. I-28).

Tableau I-19 Valeurs de Na/T-SDUK SEBT

Profondeur cm	I	c	f	h	
0-15	60.0	28.7	-	12.8	contrôle initial :I
15-30	35.0	24.3	20.0	-	:c
30-45	47.0	24.6	30.0	42.3	:f
45-60	8.6	27.5	38.4	42.6	:h
60-75	21.0	52.9	52.6	53.1	
75-180	s a b i e u x				

Fig. I-28. Evolution de Na/T-Souk Sebt



Légende:

- Etat initial
- Contrôle c
- ▲ Contrôle f
- Contrôle h

II-4.3. Suivi de la salure par des capteurs opérant in-situ

Pour la période allant au 25/9/86 (M.HACHICHA, 1987-ES 235), on a observé:

-Salinity-sensor: La CESS était au cours de cette période de 6 à 8 mmhos/cm à 10 et 20 cm, et entre 4 et 5 mmhos/cm à 35, 65 et 85 cm de profondeur.

-Sonde quadripôle: La CEG était d'environ 3 mmhos/cm à 10 cm, fluctuait entre 1 et 3 mmhos/cm à 20 cm, et atteignait 6-7 mmhos/cm à 35 cm. Elle se maintenait à 3-4 mmhos/cm aux niveaux 65 et 85 cm.

Durant la période de suivi, les capteurs ont indiqué une augmentation de la salure à un niveau modéré, mais n'ont pas reflété un état critique de la salure du sol durant cette phase.

III- SIMULATION NUMERIQUE : MISE AU POINT ET CALAGE

III-1. Methodologie

III-1.1. Rappels sur le modèle SIMUL

III-1.1.1. Principe

Ces quelques lignes sont tirées de la publication de M. RIEU: Simulation numérique des flux hydriques et prévision de la salinité dans les sols, ORSTOM-PARIS 1983, à laquelle on se référera pour plus de détails.

"L'apologie de la méthode de simulation par modèles numériques, moyen par excellence d'analyse et de prévision, n'est plus à faire. Ses applications en pédologie sont nombreuses, que ce soit dans l'investigation des mécanismes de la pédogenèse ou dans l'estimation préalable de l'effet sur les sols des travaux d'aménagement et même des façons culturales."

Le problème posé ici est d'évaluer, compte tenu des propriétés du sol à irriguer et de celles de l'eau que l'on envisage d'utiliser, les risques de salinisation secondaire, puis de tester les procédures de limitation possible de ce phénomène, afin de conserver un niveau de salure acceptable par les plantes.

Le modèle SIMUL a donc été créé pour reproduire par le calcul les processus majeurs qui gouvernent les transferts et les immobilisations des espèces solubles dominantes (chlorures, sulfates, carbonates), ainsi que les modifications du taux d'alcalinisation (SAR de la solution du sol et rapport Na/T du complexe).

A côté des caractéristiques hydrodynamiques du sol, qui conditionnent les transferts de la phase liquide, et des propriétés physico-chimiques, qui favorisent sa réactivité vis à vis de l'eau d'irrigation, le modèle intègre les facteurs externes qui gèrent le bilan hydrique, apports d'eau d'une part, consommation, évaporation et drainage d'autre part.

"Il faut d'abord évaluer les quantités d'éléments solubles transportés d'un élément de sol à un autre pendant un espace de temps donné. Les phénomènes de diffusion moléculaire pouvant être le plus souvent négligés, on admet que ces transferts se produisent par convection grâce aux flux hydriques dont le sol est le siège. Dans cette perspective, le sol apparaît comme un substrat poreux dont les caractéristiques hydrodynamiques règlent le mouvement des flux.

Mais le sol est également un milieu réactif, constitué par l'assemblage d'éléments minéraux et organiques solubles dans l'eau à des degrés divers et dont le complexe absorbant peut échanger des ions avec la solution à son contact. A tout instant et en tout point, il doit y avoir équilibre, du point de vue

thermodynamique, entre les quatre phases: gazeuse (atmosphère du sol), liquide (solution du sol), solide (silicates et sels cristallisés) et échangeuse d'ions (capacité d'échange du sol)."

Transferts en phase liquide

Les flux sont déterminés par la loi de DARCY qui, selon l'axe vertical, s'exprime par:

$$q = - K(\theta) * dH/dZ$$

L'équation de continuité traduit la variation de teneur en eau liée aux flux par:

$$d\theta/dt = - dq/dZ$$

soit, compte tenu de la diffusivité $D(\theta)$:

$$d\theta/dt = (d (D(\theta)d\theta/dZ - K(\theta)))/dZ$$

Cette dernière équation a été discrétisée aux différences finies en choisissant $\Delta Z = 5$ cm.

Par ailleurs, Δt est déterminé par les flux de telle façon que l'on ait

$$q_{\max} * \Delta t \leq .35 * \Delta Z$$

Consommation

Cette dernière est exprimée par une fonction "puits" qui est la combinaison des valeurs de l'ETP, du "crop factor" de la période végétative considérée, et du pourcentage racinaire du niveau (KP):

$$S = ETP * CF * KP$$

On commence donc par soustraire de la teneur en eau d'une couche élémentaire de sol la quantité d'eau consommée par le végétal, sauf si l'on atteint la teneur en eau à pF 4,2, auquel cas les besoins de la culture ne sont pas complètement couverts. S'il reste de l'eau, elle peut contribuer au drainage en fonction de la valeur de $K(\theta)$ correspondante.

Le bilan s'effectue sur des segments de sol de 15 cms.

Transferts de solutés

"La simulation du transfert des espèces solubles repose sur le postulat que tout soluté migre librement par convection dans le sol, au gré des flux hydriques pendant un intervalle de temps et que les mélanges entre solutions de provenance différente ne s'effectuent qu'à la fin de l'intervalle de temps. Cette approximation est d'autant moins grossière que l'intervalle de temps est bref.

La méthode utilisée consiste à effectuer, à la fin de chaque intervalle de temps, un bilan des masses de solutés contenues dans un élément de sol donné dont l'état initial est connu. Ce dernier est défini par le volume d'eau que contient l'élément de sol et les molalités des espèces solubles: K^+ , Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Cl^- , $SO_4^{=}$, $(HCO_3^- + 2 CO_3^{=})$ et H_4SiO_4 . On admet, à ce stade des calculs, que le pouvoir tampon du sol est suffisant pour neutraliser les variations de pH dues aux flux d'ions H^+ en solution.

Après avoir calculé la masse de chaque espèce soluble que contient l'élément de sol, on évalue, en fonction du volume d'eau ayant flué vers les éléments adjacents, les masses de solutés perdues. Les masses de solutés gagnées aux dépens des éléments de sol voisins sont évaluées de manière identique, en fonction de l'état initial de ces derniers et des volumes d'eau ayant pénétré dans l'élément de sol considéré. Le bilan de masse est alors établi pour chaque espèce en fonction des masses conservées, gagnées ou perdues par l'élément de sol. Enfin, le nouveau contenu en eau de ce dernier ayant été calculé, les molalités de la nouvelle solution du sol sont déterminées. Il s'agit alors de valeurs globales qui peuvent exprimer des saturations éventuelles.

Ces molalités constituent les données initiales des programmes de calcul de l'équilibre thermodynamique qui interviennent ensuite."

Traitements complémentaires

Le modèle calcule les quantités de sels peu solubles précipitées ou solubilisées, puis les échanges avec le complexe.

III-1.1.2. Structure du modèle

La figure I-29 présente l'organisation des différents sous-programmes de calcul du modèle SIMUL.

Au début de chaque jour simulé, le programme principal (MAIN) appelle le sous-programme qui calcule la date calendaire correspondante (THE), puis celui qui calcule la consommation d'eau par la culture en cours (VEGT).

Les calculs de la conductibilité hydraulique et de la diffusivité sont effectués par CODI, et ensuite SOLUTE analyse les flux et calcule les nouvelles teneurs en eau et les nouvelles concentrations. Selon l'intensité des flux hydriques, l'ensemble CODI-SOLUTE est appelé à plusieurs reprises jusqu'à l'achèvement de la journée simulée.

Les données finales sont transmises à VENTIL qui, par l'intermédiaire de EQU SOL, GYPCAL et ECHANG, fournit les données de l'équilibre thermodynamique entre les espèces gazeuses (CO_2), dissoutes et cristallisées ou adsorbées.

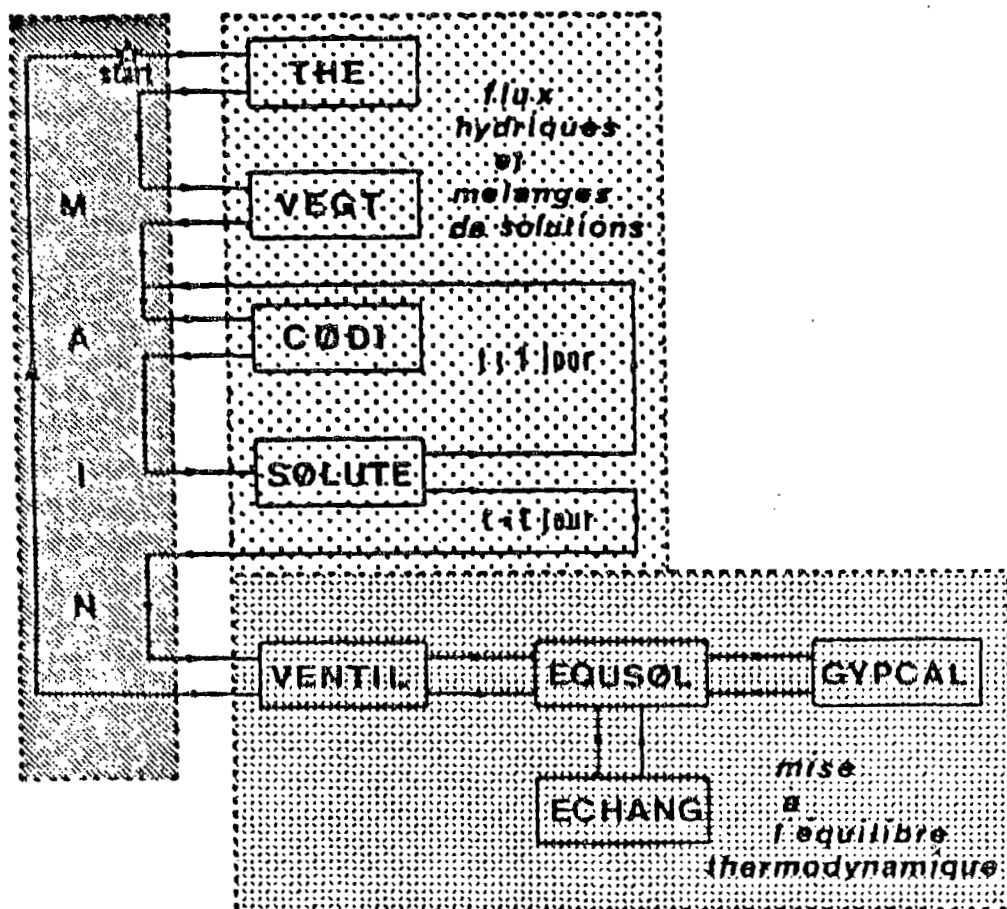


Fig. I-29. Structure du programme SIMUL

En fonction des besoins, les résultats des calculs hydriques peuvent être imprimés par jour ou fraction de jour, voire par quinzaine, tandis que les données physico-chimiques sont données par jour ou par quinzaine. On reviendra plus loin sur le détail des informations que peut fournir le modèle.

III-1.1.3. Contraintes d'utilisation

L'importance du programme et des sous-programmes (1463 lignes), le nombre de données à manipuler, et surtout la nécessité de recourir à des procédures de calcul rapides pour réaliser des simulations de longue durée, a imposé le choix d'ordinateur de grande capacité et du langage FORTRAN, particulièrement adapté aux calculs scientifiques.

L'utilisation de ce dernier langage n'est cependant pas aisée aux non-initiés et l'entrée des nombreuses données, sous la forme de cartes perforées ou similaires, est une source d'erreurs multiples.

Par ailleurs, les changements, même mineurs, de paramètres, sont relativement délicats et entraînent fatalement des délais, par suite de la nécessité d'employer un gros ordinateur, même pour exécuter la seule partie hydrodynamique du programme, que l'on est amené à utiliser de nombreuses fois au cours du calage du modèle sur un site particulier. Faute de disposer sur place de ce matériel, les déplacements, les travaux en temps partagé, l'attente des listings font rapidement perdre les avantages du calcul rapide, quand ils n'augmentent pas considérablement le temps nécessaire au calage (cf travaux sur BRAHMI).

Enfin, les coûts du calage risquent d'être fortement prohibitifs, pour peu que l'on ait quelques difficultés pour le réaliser. Il en est de même pour toutes les modifications ultérieures que nécessitent l'étude de procédures de restauration ou d'amélioration des sols risquant de se saliniser.

III-1.2. Réalisation d'un programme de calage des simulations en langage BASIC

III-1.2.1. Objectifs

- séparer les simulations de calage, nécessitant de nombreuses répétitions, de la simulation complète avec SIMUL,
- réduire les coûts au minimum, en utilisant un microordinateur de bureau maintenant largement répandu,
- assouplir les modalités d'emploi en rendant le programme interactif (conversationnel), et utilisable sans connaissances particulières en informatique.

Nous avons donc partiellement transcrit le programme SIMUL en langage BASIC, en ne prenant que la partie hydrodynamique, à laquelle a été jointe une version simplifiée du sous-programme de transformation des molalités de la solution du

sol (SOLUTE), représentée par les variations de la conductivité électrique de la solution du sol.

Les données nécessaires ont ainsi été limitées à celles qui concernant essentiellement l'hydrodynamique, avec, en sus, celles qui permettent d'estimer la conductivité de la solution du sol à partir des analyses de laboratoire (conductivité de l'extrait saturé et pourcentage de saturation), auxquelles ont été jointes les données agroclimatiques normales de SIMUL (apports d'eau, ETP, consommation).

III-1.2.2. Structure du programme PICPUS

Le programme PICPUS (Programme Interactif de Calage Pour l'Utilisation de Simul) reprend les sous-programmes suivants de SIMUL:

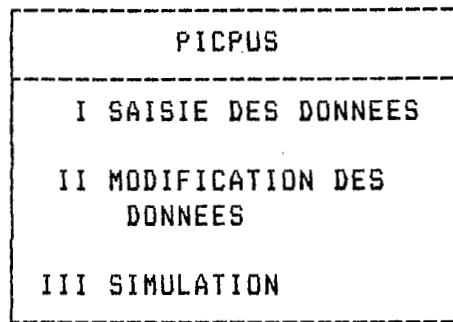
- THE qui transforme les dates des divers événements (contrôles, apports d'eau, mouvements de nappe, changement de stade végétatif, etc...) en numéros de jours dont la suite commence au premier jour de la simulation,
- VEGT qui calcule les consommations d'eau liées à une culture ou une friche,
- CODI qui calcule les paramètres de conductibilité hydraulique et de diffusivité,
- SOLUTE qui calcule les flux et les nouveaux profils hydriques à la fin de chaque itération de calcul, fraction de jour ou journée simulée, et calcule également sur demande le nouveau profil de conductivité.

PICPUS ne comprend donc pas les sous-programmes de mise à l'équilibre thermodynamique (VENTIL, EQU SOL, ECHANG et GYPCAL); il en résulte que la conductivité calculée en ne tenant compte que des phénomènes de dilution-concentration de la solution du sol peut s'écarter de la valeur réelle; cette approximation peut cependant se révéler suffisante dans la phase de calage du modèle qui n'intéresse que des périodes relativement courtes.

Le programme a été scindé en cinq parties:

- PICPUS pour l'orientation aux sous-programmes,
- DONHYD pour la saisie des données hydrodynamiques et de salure,
- DONAGR pour les données agroclimatiques
- CORRECT pour le contrôle ou la correction de ces données,
- HYDROSEL pour l'exécution des calculs et l'impression des résultats.

Les données d'entrée sont réparties sur 8 fichiers séquentiels (5 pour hydrodynamique et salure, 3 pour les données agroclimatiques).



I-Saisie des données:

DONHYD: données hydrodynamiques ($K(\theta)$, $h(\theta)$, θ_{sat} ..)

DONAGR: données agroclimatiques (apports d'eau, sta-
des végétatifs, ETP...)

II-Modifications de données:

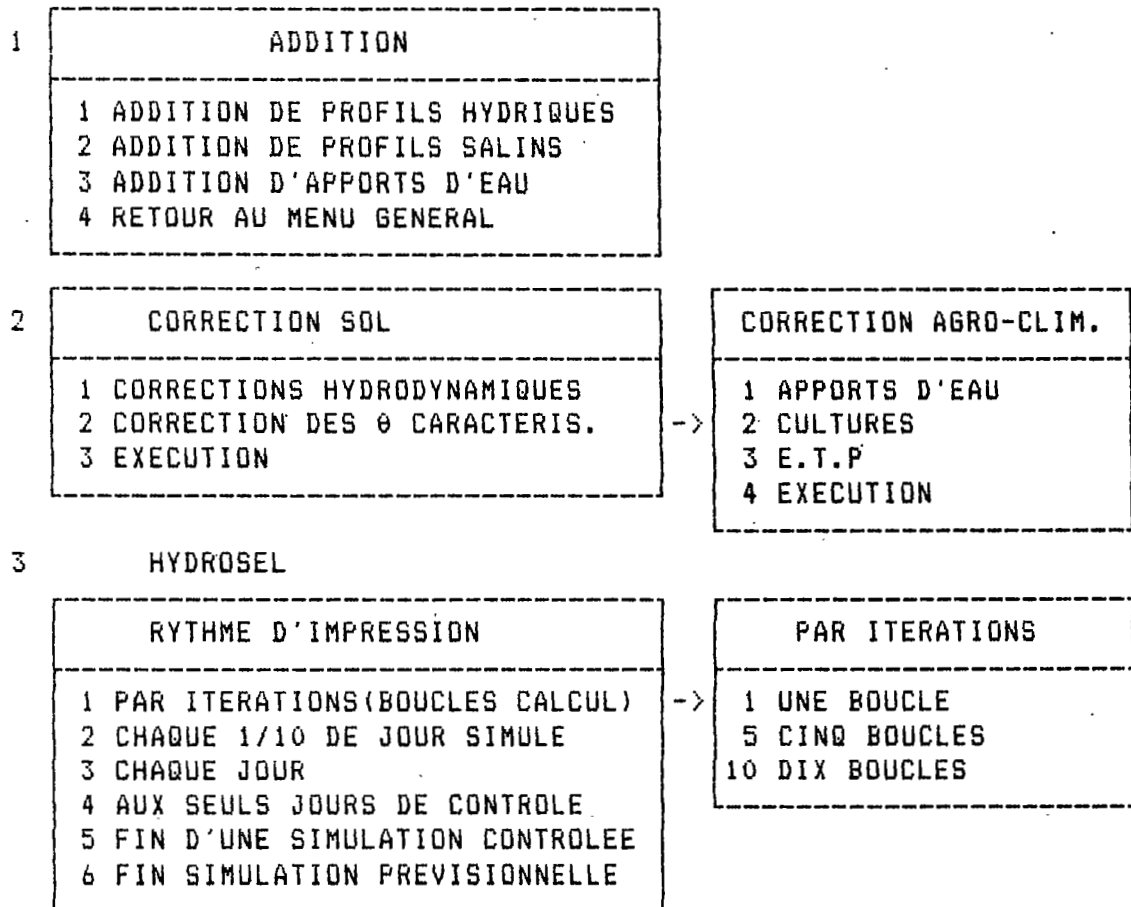
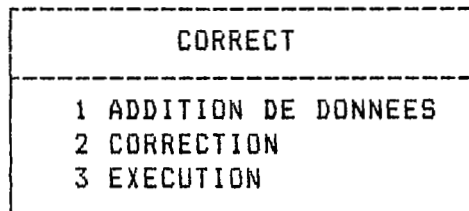


Fig. I-30. Structure du programme PICPUS

Chaque sous-programme fonctionne à l'aide de "Menus" explicatifs très faciles à utiliser (Fig. I-30). Il est ainsi possible, avant toute exécution des calculs, de vérifier les paramètres choisis, éventuellement de les modifier, notamment les coefficients de la relation $K(\theta)$.

On a reproduit à titre d'exemple les affichages d'écran du sous-programme "CORRECT" (Fig. I-31 a, b).

Pour l'exécution proprement dite (HYDROSEL), le programme permet de choisir les dates de début et fin de simulation à partir de l'ensemble des profils de contrôle répertoriés.

Le numéro du profil initial étant choisi, le programme effectue les décalages de dates nécessaires pour les contrôles ultérieurs et les apports d'eau.

Il est ensuite demandé de donner la date calendaire de la fin de simulation choisie. On choisira de préférence une date correspondante à un contrôle, mais il est possible de faire des simulations différentes si besoin est.

A ce stade, un menu propose le rythme des impressions de résultats possibles. Dans les premiers essais de calage, il peut être utile de limiter la simulation à quelques jours seulement, voire un jour ou une fraction de jour, en demandant des sorties nombreuses.

Pour les calages sur des simulations de longue durée, on demandera seulement soit la sortie imprimée de chaque jour de contrôle, soit une seule sortie en fin de simulation. Il est évident que d'autres partitions du temps, sorties décennales, bimensuelles, mensuelles peuvent être introduites moyennant de légères modifications du programme.

Après le choix du rythme d'impression, il est encore demandé si l'on souhaite, d'une part, l'impression des coefficients hydrodynamiques ($K(\theta)$ et θ sat de chaque horizon), d'autre part, l'impression des profils initiaux.

La simulation commence alors, et, pour chaque itération, le programme affiche à l'écran 2 nombres, le premier correspondant à la quantité d'eau qui reste à infiltrer, le second au total cumulé du drainage. Cela permet de surveiller l'infiltration et de contrôler les valeurs d'infiltration et de drainage.

L'état d'avancement du programme peut être contrôlé, après un "BREAK", en tapant "PRINT II,IT,XT":

II = numéro du jour
 IT = nombre d'itération du jour
 XT = fraction de jour écoulé

Corrections "sol"

CORRECTION DES DONNEES	
1	CORRECTION DU PROFIL (épaisseur, nombre et profondeur des couches hydrodynamiques) ET DES COEFFICIENTS $K(\theta)$ ET $H(\theta)$
2	CORRECTION DES TENEURS EN EAU CARACTERISTIQUES
3	EXECUTION OU CORRECTIONS AGRO-CLIMATO
VOTRE CHOIX ?	

Appuyer sur "1" donne:

PROFONDEUR PROFIL (HD)= 150 CM		NOMBRE DE ZONES HYDRODYN. (A)=3	
LIMITE INFERIEURE DE LA COUCHE SUPERIEURE (JA)= 25 CM			
LIMITE INFERIEURE DE LA COUCHE MEDIANE (JB)= 60 CM			
COEFFICIENTS DE $K(\theta)$ PAR COUCHE			
COUCHE 1	A SOIT A(1) = 1.35 E+8	B SOIT B(1) = 15.82	
COUCHE 2	A SOIT A(2) = 6.12 E+9	B SOIT B(2) = 20.61	
COUCHE 3	A SOIT A(3) = 4.00 E+10	B SOIT B(3) = 20.61	
COEFFICIENTS DE $h(\theta)$ PAR DOMAINE			
A SOIT C(1)= 19.79		B SOIT P(1)= -6.441	
A SOIT C(2)= 19.79		B SOIT P(2)= -6.441	
DOMAINE 1 = POUR THETA < THETA ENTREE D'AIR			
DOMAINE 2 = POUR THETA >= THETA ENTREE D'AIR			
SI CORRECTIONS ENTRER LA(LES) NOUVELLE(S) VALEUR(S) EN TAPANT:			
Symbole du paramètre à corriger = nouvelle valeur			
TAPER CONT(TOUCHE F5) QUAND LES CORRECTIONS SONT TERMINEES			
Break in 660			

exemple: pour modifier B(1) on tape:

B(1)=25 puis "Enter"

et ensuite "F5"

Fig. I-31.a. Affichage d'écran du sous-programme CORRECT

```

CORRECTIONS DES DONNEES AGRO-CLIMATO

1 CORRECTIONS AUX APPORTS D'EAU
2 CORRECTIONS AUX CULTURES
3 CORRECTIONS A L'ETP
4 EXECUTION DU PROGRAMME

VOTRE CHOIX ?

```

Si on tape 1 on obtient:

```

NOMBRE D'APPORTS D'EAU (AP)= 3

  APPORT N°    JOUR          MOIS          HAUTEUR      GENRE
  1    DATE(1)= 6    MOI(1)=10    AMT(1)=7    GENRE(1)=2
  2    DATE(2)=12   MOI(2)=10    AMT(2)=6    GENRE(2)=2
  3    DATE(3)=15   MOI(3)=10    AMT(3)=1.5  GENRE(3)=1

  GENRE( )=1  PLUIE
  GENRE( )=2  IRRIGATION

  CONDUCTIVITE DE L'EAU D'IRRIGATION (RIC)=6 MMHDS

  SI CORRECTIONS ENTRER LA(LES) NOUVELLE(S) VALEUR(S)...

```

Si on tape 2 on obtient:

```

NOMBRE DE CULTURES (NS)= 1

  STADE VEGETATIF  DUREE          CROP-FACTOR    CULTURE
  1    T(1,1)= 20   CF(1)=1        1
  2    T(2,1)= 98   CF(2)=1.2      1
  3    T(3,1)=120   CF(3)=0.8      1
  4    T(4,1)=120   CF(4)=0.9      1

  DATE DU SEMIS DE LA CULTURE N° 1  JOUR (I(1))=5 MOIS (J(1))=7

  SI CORRECTIONS ENTRER LA(LES) NOUVELLE(S) VALEUR(S).....

```

Fig. I-31.b. Affichage d'écran du sous-programme CORRECT

III-2. Calage du modèle sur l'essai d'infiltration

III-2.1. Simulation hydrique

On a vu plus haut que l'essai d'infiltration a été marqué par 5 séries de prélèvements encadrant ses différentes phases. On dispose ainsi des profils prélevés en croix, en se rapprochant progressivement du tube de sonde, de façon à s'éloigner des bords de la parcelle où les flux peuvent prendre une direction oblique (Fig. I-32).

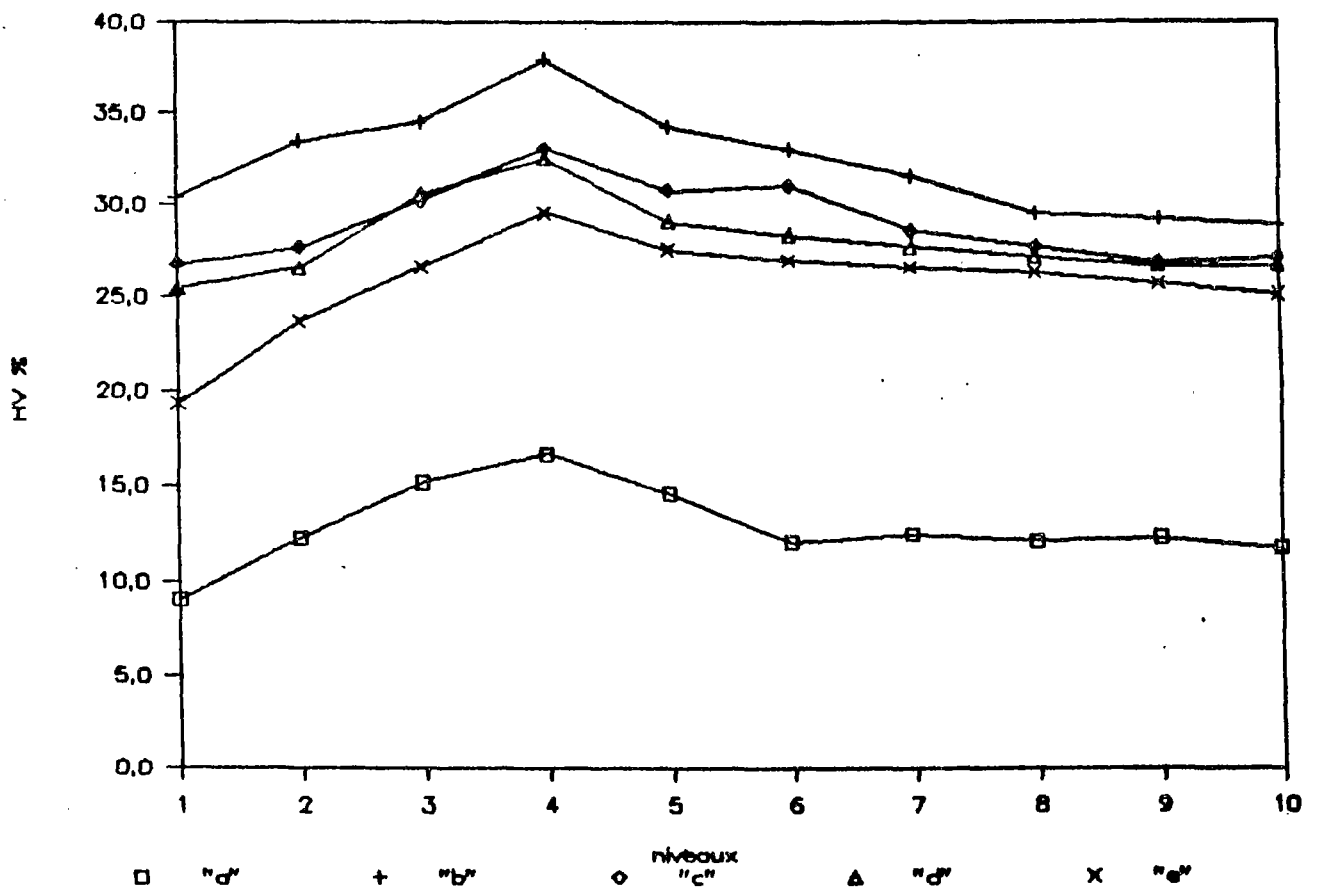


Fig. I-32 .Profils hydriques de l'essai

Ces cinq profils de contrôle sont les suivants:

- profil a: "sec", prélevé le 10/11/85 avant irrigation,
- profil b: "saturé", prélevé le 12/11
- profil c: mi-drainage interne, le 16/11) sol
- profil d: fin du drainage interne, le 21/11) couvert
- profil e: fin de bilan naturel, le 30/11

On trouvera dans le tableau I-20 les valeurs des teneurs en eau pondérales de 15 en 15 cm pour ces 5 profils.

Tableau I-20. Profils hydriques contrôlés au cours de l'essai

Profils	a	b	c	d	e
Prof.					
0-15	.090	.304	.269	.254	.194
15-30	.123	.334	.276	.266	.237
30-45	.152	.345	.297	.298	.272
45-60	.167	.379	.331	.326	.305
60-75	.147	.343	.306	.290	.275
75-90	.121	.331	.287	.283	.270
90-105	.126	.316	.287	.276	.267
105-120	.123	.296	.278	.273	.264
120-135	.124	.293	.269	.268	.258
135-150	.119	.290	.264	.268	.253

Les données initiales et de contrôle des prélèvements "b" à "e" s'expriment par segments de sol de 15 cms. Pour le calcul avec le programme PICPUS, nous avons effectué un lissage de ces valeurs afin de disposer d'un profil hydrique détaillé par niveaux espacés de 5 cms.

Pour cela, nous avons considéré que les niveaux "internes" (5 et 10 pour le segment 0-15, 20 et 25 pour le segment 15-30,...) prenaient la valeur moyenne du segment, et que l'on pouvait interpoler entre les valeurs moyennes des segments pour les niveaux "externes" (0 et 15 pour 0-15, 15 et 30 pour 0-30,...).

III-2.1.1. Essai de calage sur la phase d'infiltration

Les coefficients $K(\theta)$ et $h(\theta)$ calculés à l'aide du programme PERMAL ont été utilisés pour tester cette phase. Les essais ont montré, grâce à des sorties multiples tous les 1/10 de jour, la progression du front d'humectation dans le sol.

La figure I-33 représente quelques uns des profils simulés obtenus. La comparaison avec les profils neutroniques n'est pas entièrement satisfaisante, et ce pour deux raisons:

- le comptage neutronique a une sphère d'influence dont le diamètre dépasse généralement 15 cm,
- le sol subit forcément d'importantes modifications au cours d'une aussi forte irrigation.

On constate néanmoins que les coefficients employés ne doivent pas être trop éloignés des paramètres réels, car l'irri-

Fig.I-33.Simulation de l'essai d'infiltration (12/11 au 30/11/85)

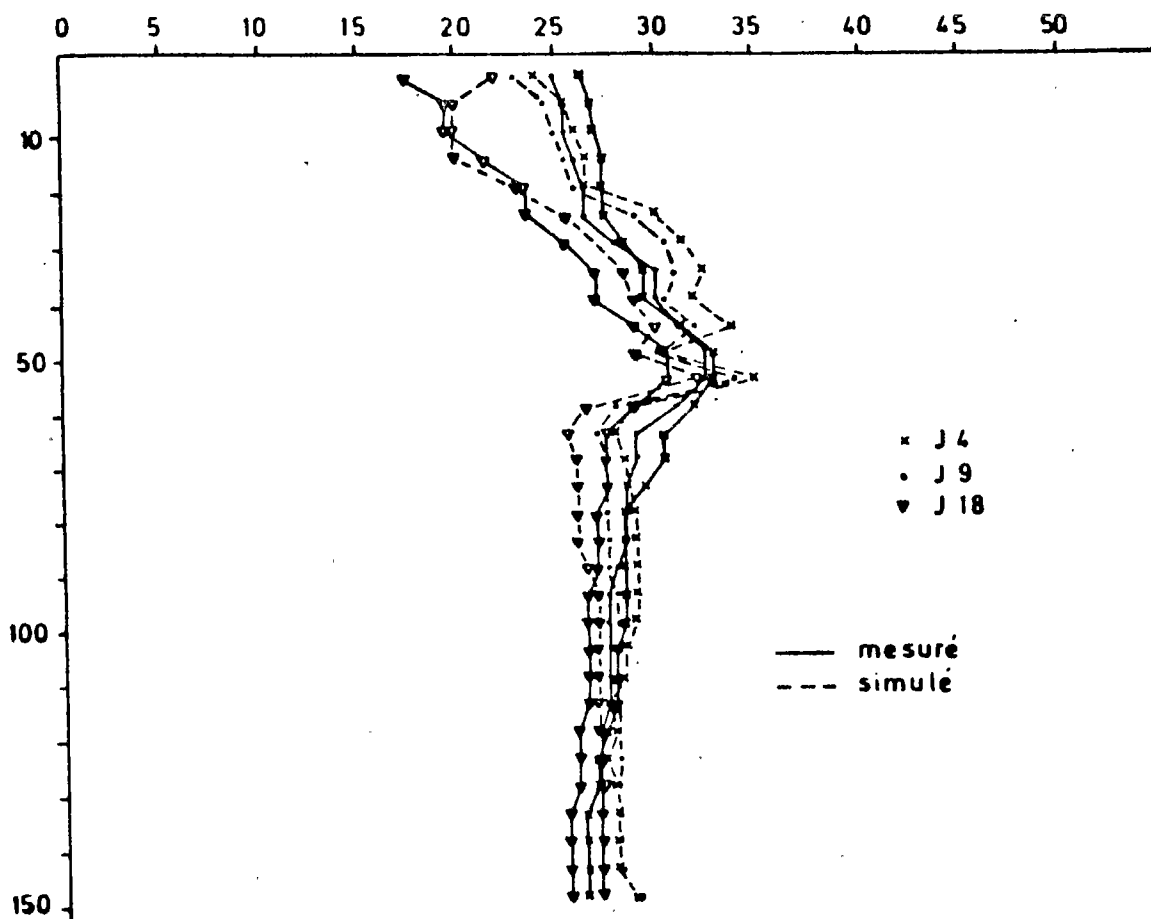
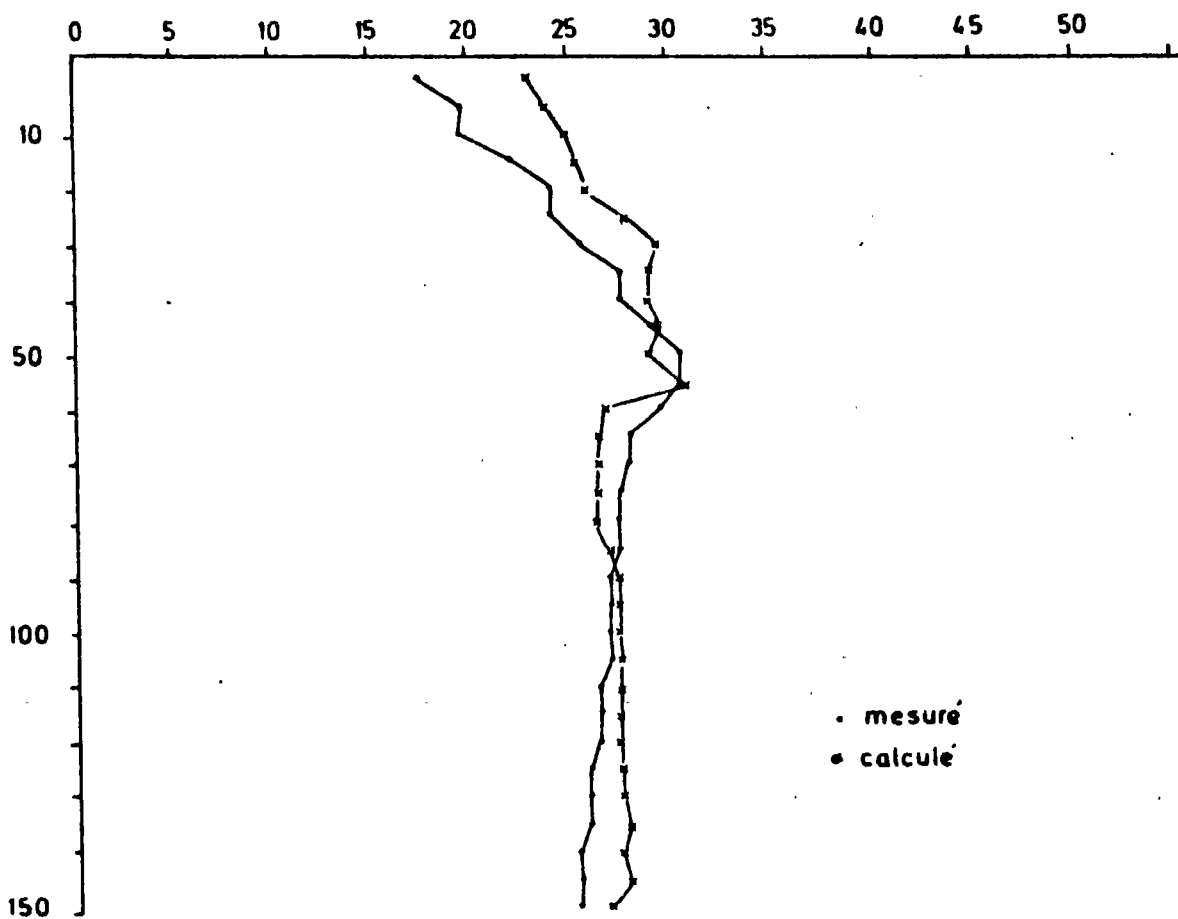


Fig.I-34.Simulation du 21 au 30/11(sans consommation)



gation est assez correctement prise en compte, même si le profil à saturation s'écarte un peu trop du profil mesuré.

III-2.1.2. Calage sur la phase de drainage interne

Pour l'épisode du 12 au 21/11/86, 9 essais ont été nécessaires. Les premiers, réalisés avec les coefficients calculés par PERMAL, ont donné un drainage excessif sur l'ensemble du profil. Cependant, les profils simulés étant grossièrement parallèles à ceux des contrôles du 16 et du 21, il a suffi de diminuer légèrement les coefficients A de $K(\theta)$ des trois couches. Par retouches successives on est parvenu à choisir les coefficients suivants:

Couche 1	$A(1) = 6.43 E7$	$B(1) = 15.81$
Couche 2	$A(2) = 2.55 E9$	$B(2) = 20.61$
Couche 3	$A(3) = 4.78 E10$	$B(3) = 20.61$

On trouvera dans la figure I-33 les résultats de la simulation n°9.

III-2.1.3. Calage en bilan naturel

Le sol ayant été découvert le 21/11, les observations ont été poursuivies jusqu'au 30/11.

Une première simulation, avec les coefficients précédents, et ne tenant pas compte de l'évaporation, fait apparaître un excès d'eau par rapport au contrôle, de 1,78 cm d'eau pour les 9 jours, soit une moyenne d'environ 2 mm/j (cf figure I-34 du profil simulé 10).

Le calcul des pertes par tranches de 15 cm permet de déduire une répartition racinaire fictive qui reproduirait l'évaporation du sol nu, soit:

00-15	47.7%
15-30	33.3%
30-45	19%

Les essais suivants, effectués à l'aide d'une estimation de l'ETP par la méthode de RIOU (1982), dont on peut voir la répartition annuelle dans le tableau I-21, soit 0.187 mm/j en novembre, ont permis de restituer un profil simulé assez voisin du profil de contrôle du 30/11 (figure I-33 simulation n°18).

Tableau I-21 ETP par quinzaine

ETP PAR QUINZAINE EN CM/JOUR		
Mois	Quinzaine	ETP
Janvier	1	.149
	2	.166
Février	1	.196
	2	.226
Mars	1	.258
	2	.303
Avril	1	.362
	2	.426
Mai	1	.496
	2	.564
Juin	1	.631
	2	.666
Juillet	1	.669
	2	.648
Aout	1	.601
	2	.545
Septembre	1	.480
	2	.408
Octobre	1	.329
	2	.266
Novembre	1	.221
	2	.183
Décembre	1	.154
	2	.143

III-2.2. Simulation saline

A ce moment nous avons ajouté au programme PICPUS le calcul de la conductivité électrique de la solution du sol.

Pour le profil initial nous avons estimé cette dernière (CEss) en multipliant la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée de chaque tranche de 15 cm (CEes), par le rapport (% de saturation/humidité pondérale) de chaque prélèvement de ce contrôle:

$$CEss = CEes * \frac{\%sat}{HP\%}$$

On sait qu'une telle approximation n'est qu'un pis-aller, car le pourcentage de saturation est toujours supérieur à la teneur en eau maximum à saturation. Dans le profil de ZELBA, le pourcentage de saturation se situe en effet de 37 à 50% pondéral suivant les couches, tandis que θ_{sat} ne dépasse pas 38% volumique! Il en résulte que dans l'extrait de saturation peuvent être dissous des sels normalement non solubilisés à saturation effective.

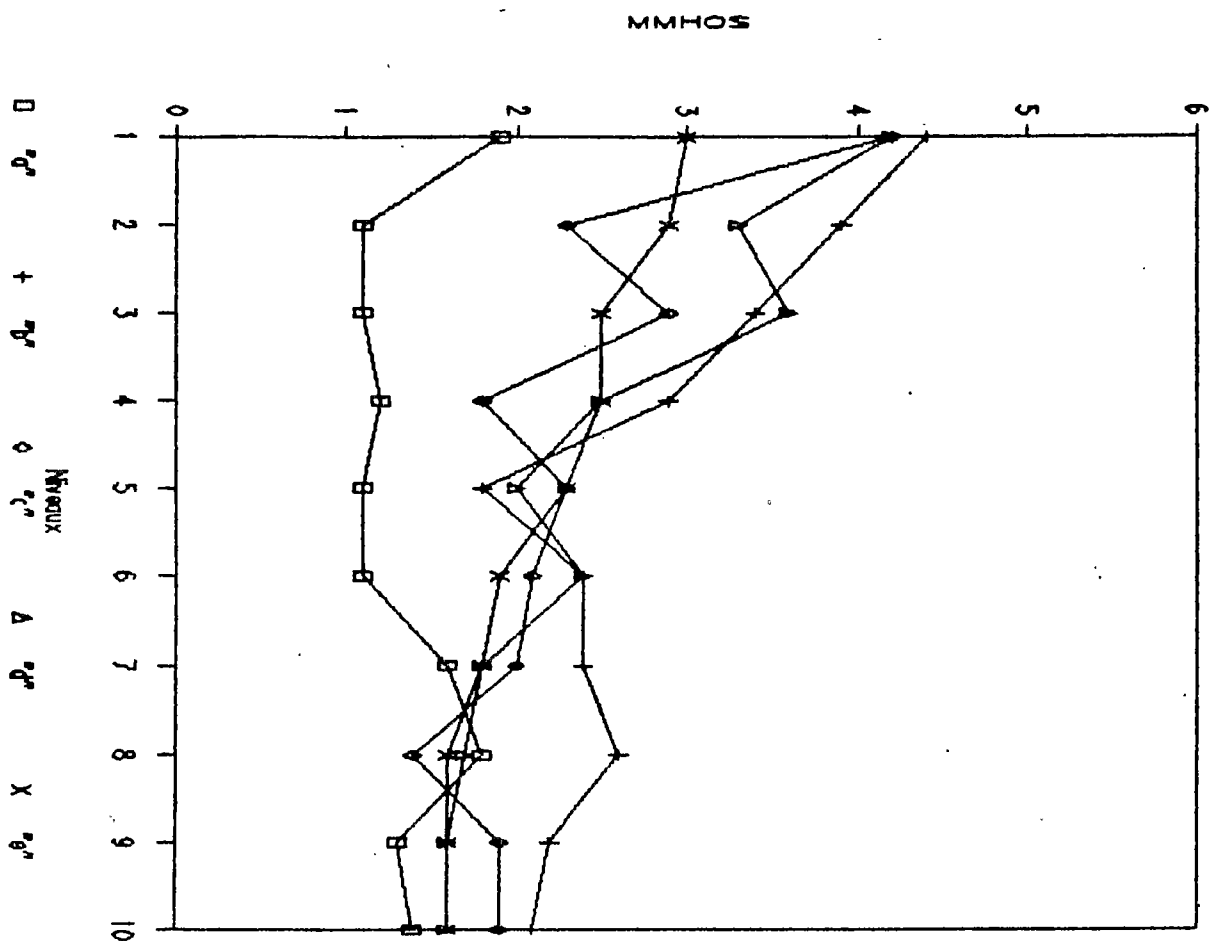
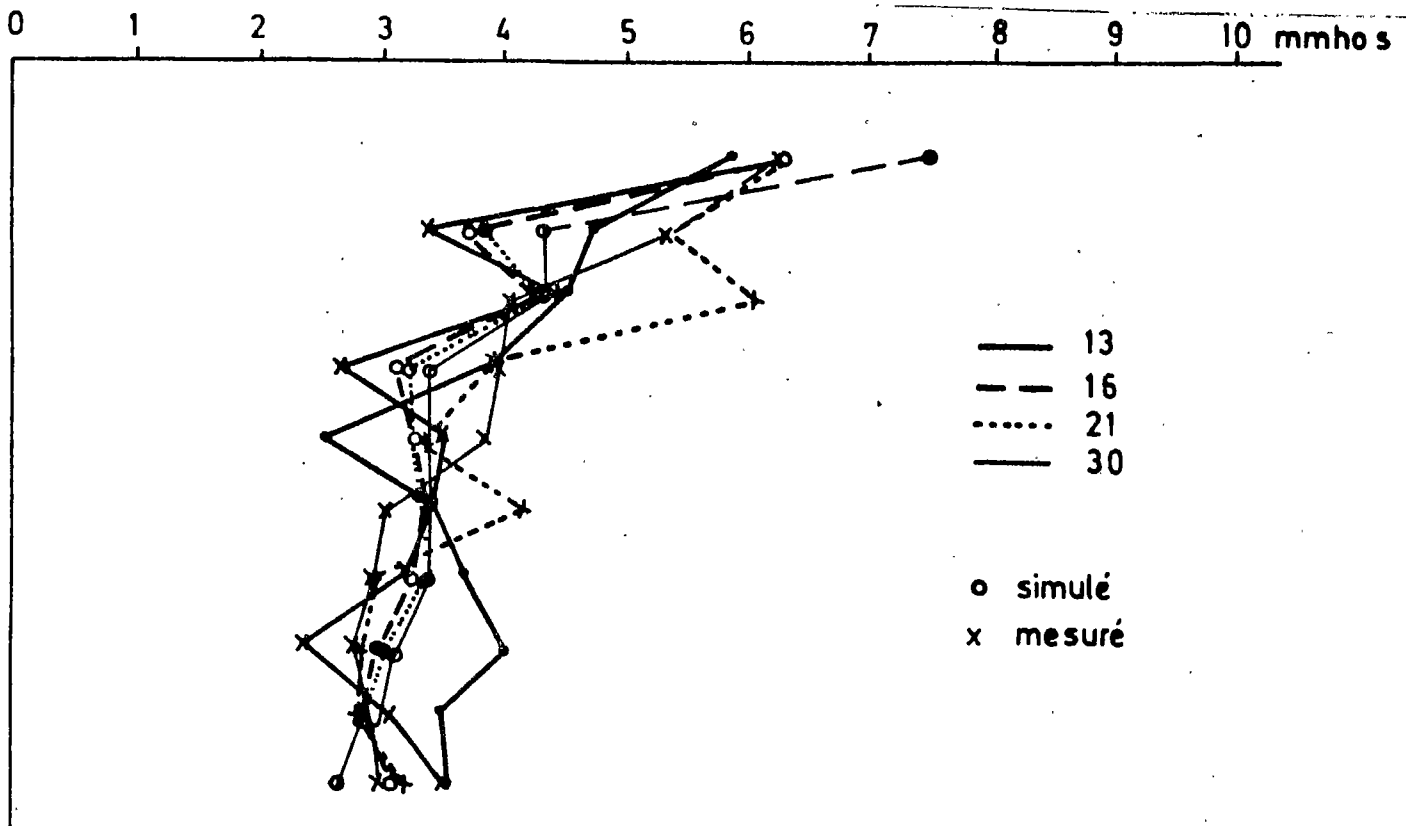


Fig. I-35.a. Evolution de la CEs en cours d'essai (extraits saturés sur prélèvements). Par niveaux.

Malgré cela, il nous a semblé que ce calcul simple nous permettrait de suivre l'allure des variations de salinité du profil au cours des simulations.

On trouvera sur les figures I-35.a, I-35.b les résultats des simulations qui sont assez satisfaisants: l'irrigation de 476 mm par une eau titrant 6,3 mmhos fait apparaître une salinisation commençante dans la partie supérieure du profil qui gagne légèrement en profondeur le 16, mais remonte ensuite vers la surface pendant la phase de bilan naturel, par suite de l'évaporation.



Profils mesurés

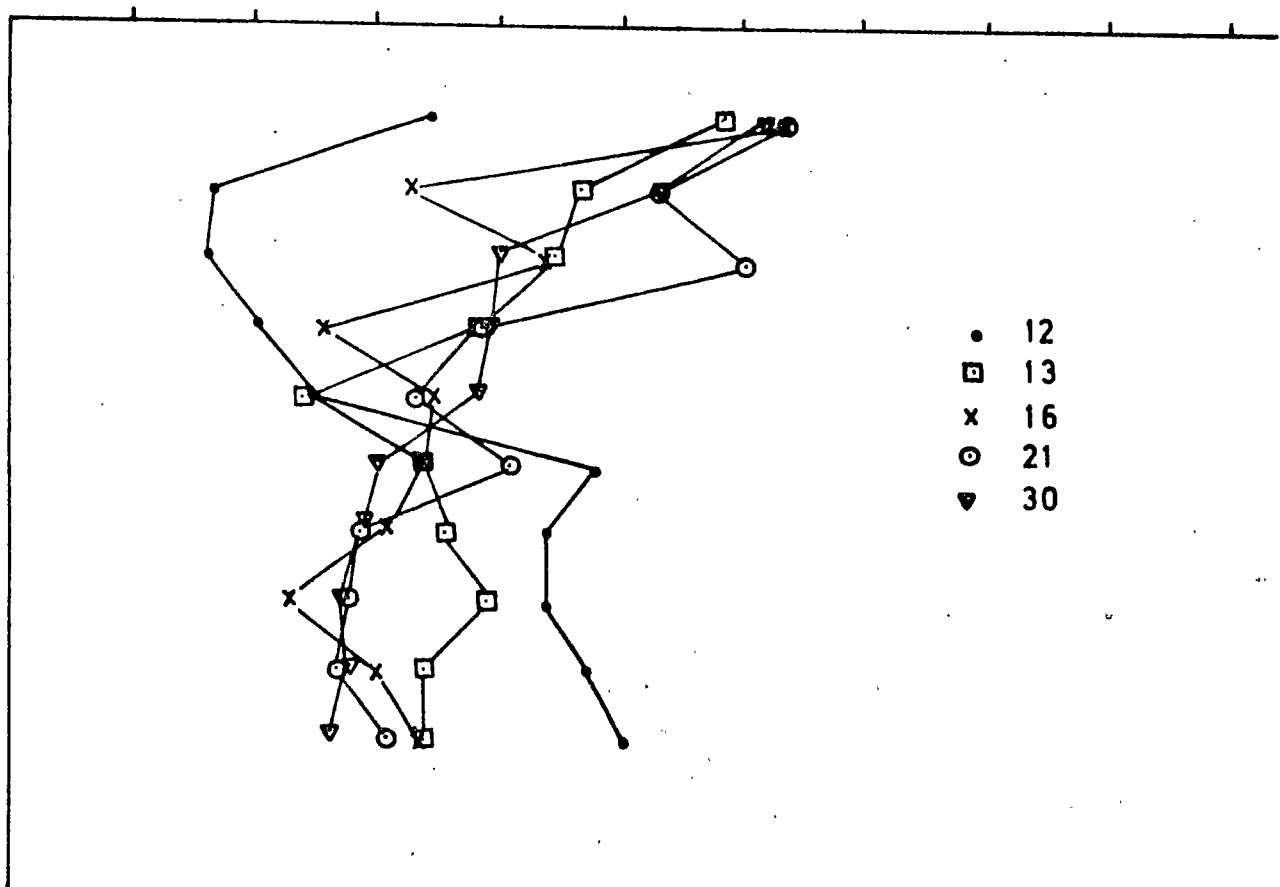


Fig.I-35.b.Evolution de la CEEs en fonction du temps

III-2.3. Estimation rapide des coefficients

L'obtention des coefficients de départ de $K(\theta)$ et $h(\theta)$ demandant un travail important d'expérimentation et de dépouillement qui, on l'a vu ci-dessus, ne conduit pas avec certitude aux paramètres de calcul les meilleurs, on a tenté de s'affranchir de ce travail en procédant à une estimation des coefficients à partir de l'analyse des profils de l'essai d'infiltration.

Pour cela, partant des valeurs de K_{sat} et θ_{sat} estimées lors de l'irrigation, on considère que la perméabilité moyenne, exprimée par les pertes en eau journalières de chaque couche pendant le drainage interne, est la moyenne géométrique de K_{sat} et de la perméabilité en fin de phase. Connaissant les teneurs en eau moyennes en fin de phase, il devient possible de calculer un premier jeu de coefficients pour K .

Là encore, naturellement, plusieurs essais ont été nécessaires, mais en nombre assez limité (7). Ils ont conduit à une restitution correcte des profils contrôlés, tant hydriques que salins (Fig. I-36).

Une telle approche pourrait s'avérer précieuse, évitant d'avoir à installer une station coûteuse et de procéder à des calculs fastidieux.

Il reste cependant à trouver un moyen d'estimer de même la relation $h(\theta)$; la référence à des résultats obtenus sur des sols voisins peut éventuellement suffire.

Cela permettrait, à l'aide d'irrigations contrôlées en différents points d'un périmètre, de contrôler la validité des paramètres définis sur une station principale de référence. On y reviendra plus loin (cf chapitre-IV).

III-3. Contrôle du calage sur une séquence d'irrigation normale

On a déjà évoqué les modifications que peut entraîner une très forte irrigation sur les propriétés d'un sol ordinairement soumis à un régime hydrique de tendance aride.

Il était donc nécessaire de tester la validité des paramètres retenus après l'essai d'infiltration au cours d'une période normale de culture. Une luzerne ayant été semée sur la parcelle expérimentale le 5/3/86, nous avons choisi une période entre deux irrigations, du 27/6 au 7/7/86 pour simuler.

A cette occasion des profils d'humidité neutroniques ont été relevés presque chaque jour, après une irrigation de 6.75 cm le 27/6. Les comptages ont été transformés en humidité volumique après quelques retouches de l'étalonnage. A titre indicatif on a représenté sur la figure I-37, l'évolution des mesures tensiométriques entre ces deux irrigations.

Fig.I-36.Simulation par méthode rapide

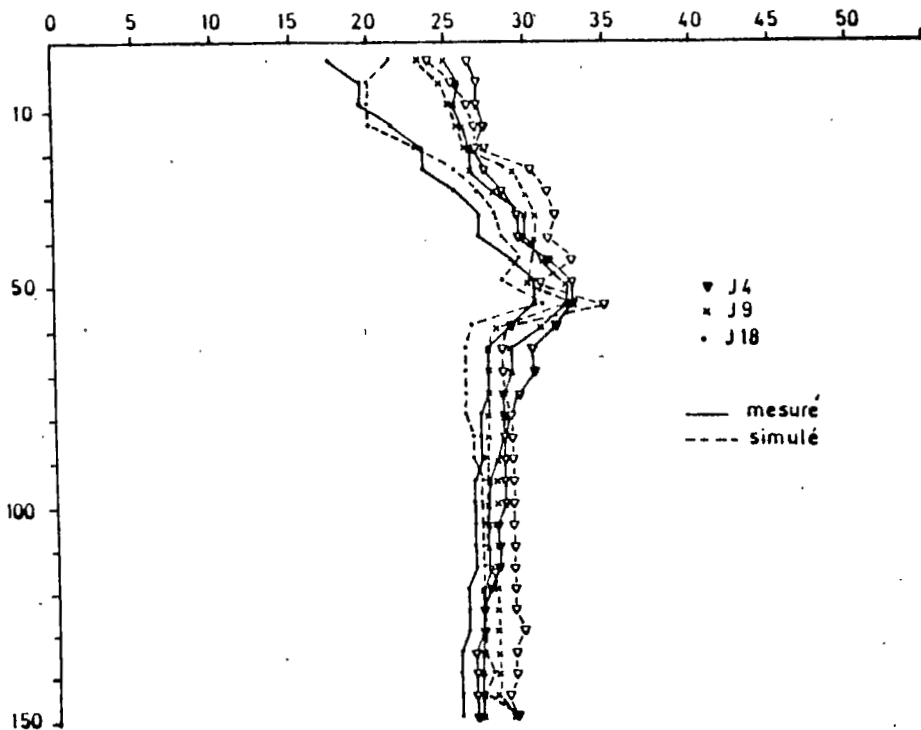
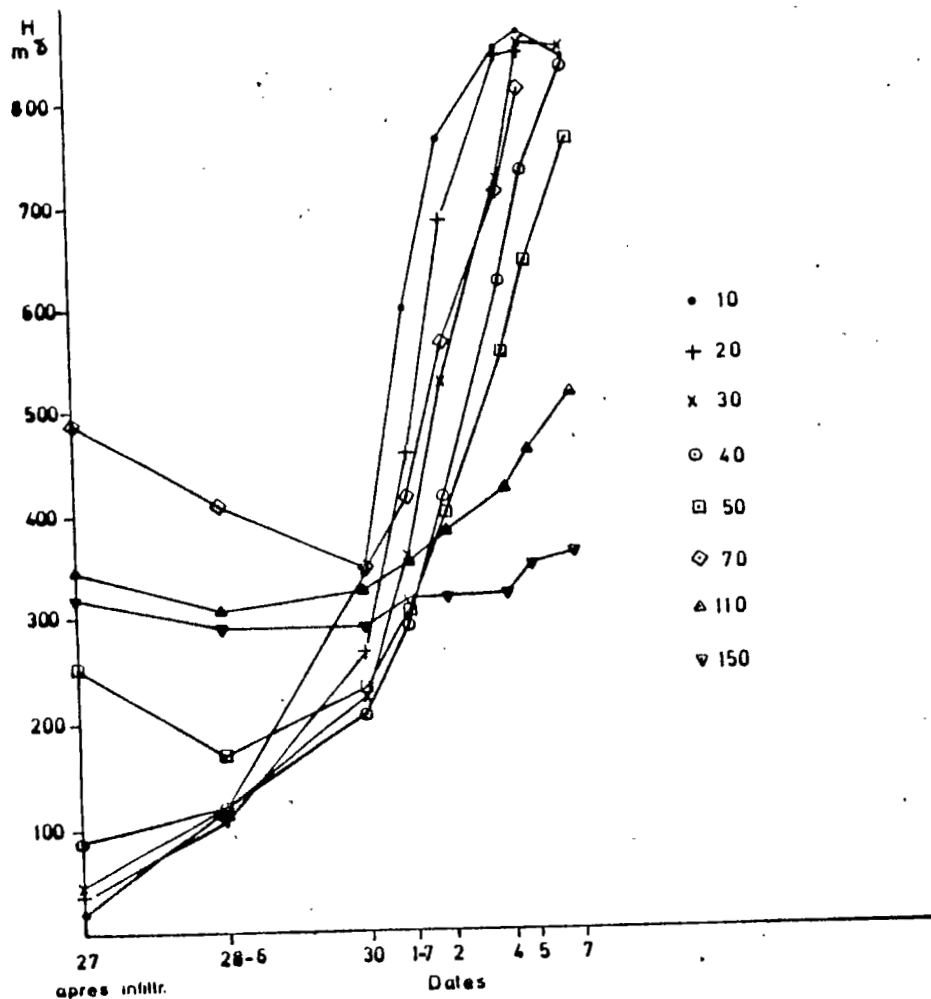


Fig.I-37.Evolution de la charge hydraulique entre deux irrigations



Le tableau I-22 présente les profils neutroniques des 6 dates retenues.
Tableau I-22 Profils neutroniques

Prof.	27/6	27/6	28/6	30/6	1/7	2/7	4/7	7/7
0-15	.116	.315	.260	.232	.158	.149	.162	.123
15-30	.135	.302	.254	.235	.164	.150	.170	.112
30-45	.204	.259	.253	.284	.219	.214	.239	.178
45-60	.232	.231	.275	.304	.240	.234	.265	.201
60-75	.226	.222	.257	.305	.253	.247	.277	.185
75-90	.234	.231	.248	.304	.252	.249	.283	.201
90-105	.252	.242	.246	.300	.249	.242	.285	.214
105-120	.246	.243	.245	.309	.248	.247	.290	.222
120-135	.251	.243	.250	.303	.245	.251	.291	.234
135-150	.243	.241	.259	.313	.255	.258	.301	.245

Ces essais ont été l'occasion, non seulement de corriger quelque peu les paramètres de $K(\theta)$, mais aussi de revoir les "crop-factors" choisis arbitrairement. Il est apparu qu'un CF de 1 était insuffisant en période de forte croissance pour assurer la consommation mesurée. On a finalement choisi 1.2 et pour $K(\theta)$ les paramètres A ont été très légèrement modifiés: $A(1)=1.36E8$, $A(2)=6.12E10$, $A(3)=4.78E11$. La figure I-38 présente les résultats obtenus (essai T). Ces résultats sont d'autant plus satisfaisants qu'ils portent sur des modifications relativement faibles des stocks hydriques. A la fin de la période, (jour n° 10), on constate un drainage de 4 cm, une consommation de 4.29 cm, avec un déficit hydrique de 2.39, causé sans doute par la limite du pF 4.2 qui avait été fixée à 16% suite aux essais de laboratoire. Il nous a semblé plus réaliste de la reculer à 12%.

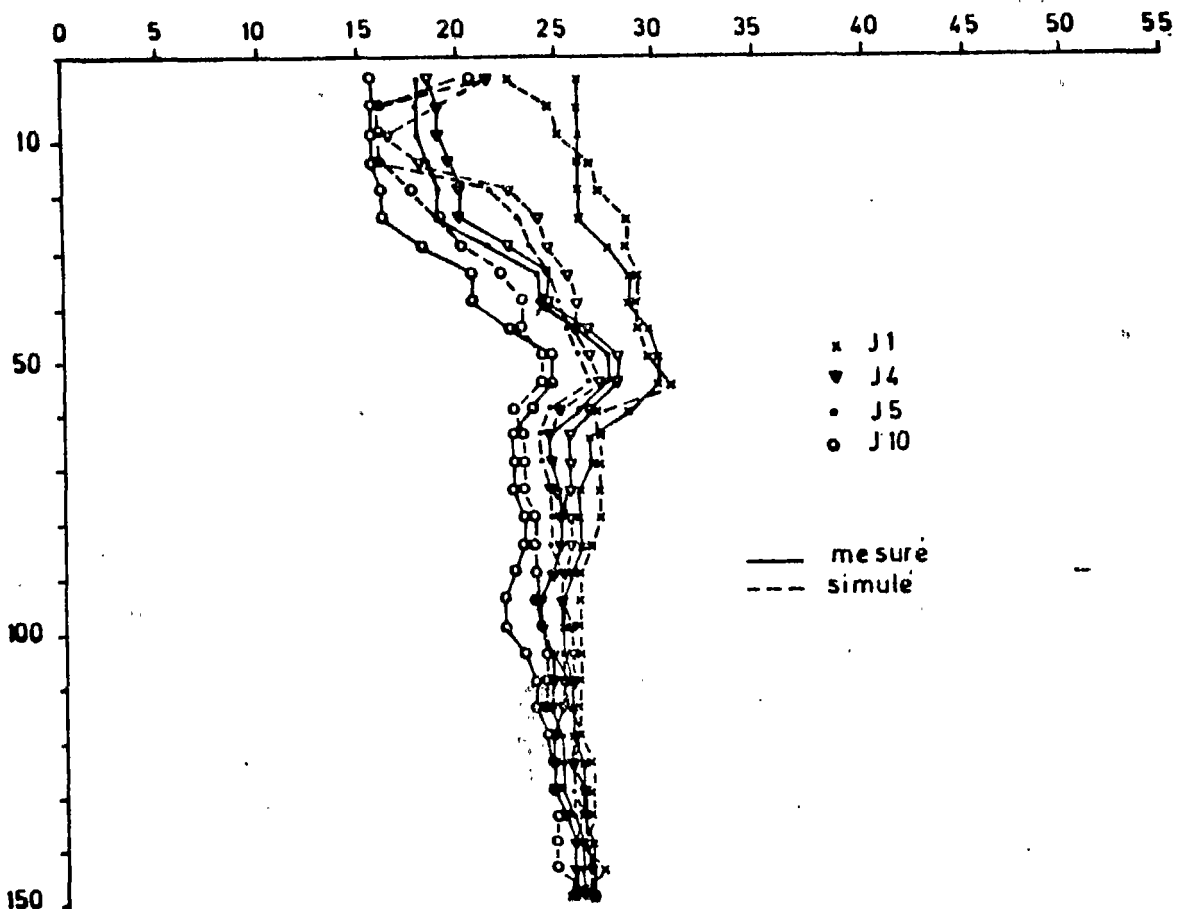


Fig. I-38. Simulation hydrique entre deux irrigations

III-4. Simulation de longue durée

Compte-tenu des résultats précédents, qui nous ont montré une simulation satisfaisante entre deux irrigations, nous avons pu passer à des simulations plus longues couvrant une partie de la saison agricole.

A l'aide des prélèvements de contrôle effectués les 22/5, 21/7 et 25/9, la simulation a d'abord été lancée par période de deux mois, puis sur les 126 jours de la période complète. Les apports d'eau, uniquement d'irrigation, ont été les suivants:

22/5	80.00 mm	19/7	77.50 mm
27/5	60.00	26/7	78.75
4/6	60.50	4/8	72.50
11/6	77.50	8/8	66.20
18/6	75.00	18/8	105.00
27/6	67.50	29/8	88.70
7/7	68.75	13/9	85.00
14/7	75.00	22/9	76.20

soit un total de 642.75 mm entre le 22/5 et le 21/7, et 542.35 entre le 21/7 et le 25/9 qui, compte tenu des premières irrigations et de celles de début Octobre donne un total de 1726 mm sur 7 mois et demi, pour une ETP moyenne de 705 mm. On voit tout de suite que le drainage a été très important. Le mode d'irrigation par submersion semble donc être particulièrement consommateur d'eau.

Par ailleurs un contrôle de la conductivité de l'eau d'irrigation a montré qu'elle était passée à 7 mmhos après quelques mois de pompage. C'est donc cette nouvelle valeur qui a été utilisée ensuite aux simulations de longue durée.

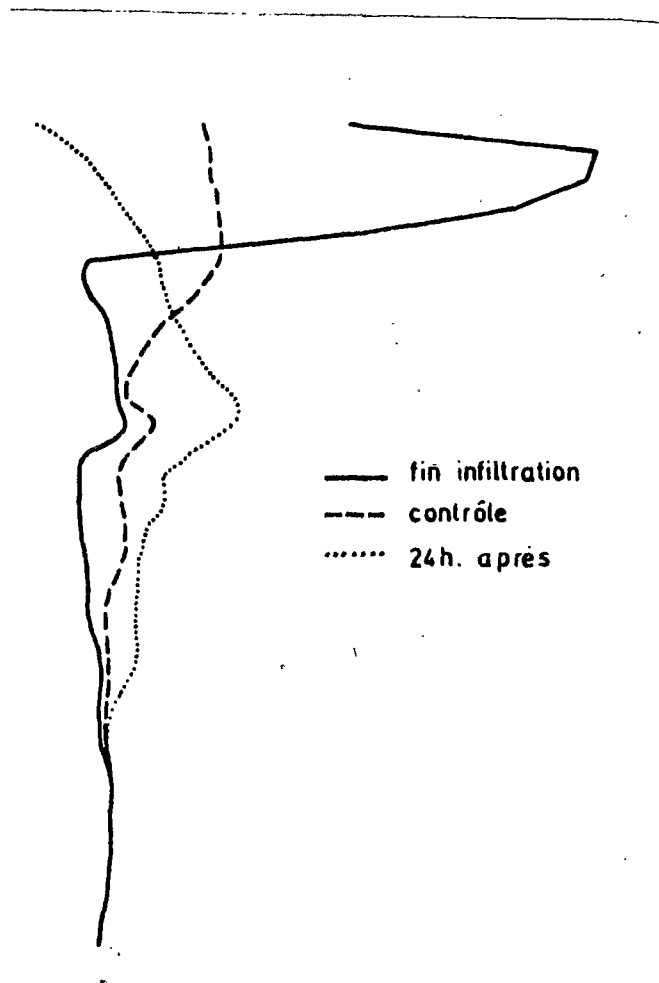
III-4.1. Simulation du 22/5 au 21/7/86

Un premier essai portant sur l'hydrodynamique à l'aide des coefficients précédents donne un résultat satisfaisant, mais on observe un léger défaut de drainage dans les premiers horizons et un léger excès dans le plus profond.

Une première correction en divisant A(1) et A(2) par 10 donne un drainage excessif, le profil simulé ayant perdu 2 cm de plus que le contrôle sur les 64 cm entrés par irrigation.

Un essai avec sortie journalière a été également réalisé pour contrôler l'impact des diverses irrigations pratiquées sur la parcelle. On peut voir sur la figure I-39 les résultats obtenus pour l'irrigation du 27/5. On a fait imprimer par le modèle le profil obtenu juste à la fin de l'irrigation, celui qui est simulé 24 heures après le début de l'irrigation et celui qui a été contrôlé à la sonde quelques heures après la fin de l'irrigation.

Fig. I-39. Comparaison des profils simulés en fin d'infiltration et 24 heures après début d'irrigation avec le profil mesuré quelques heures après la fin d'irrigation

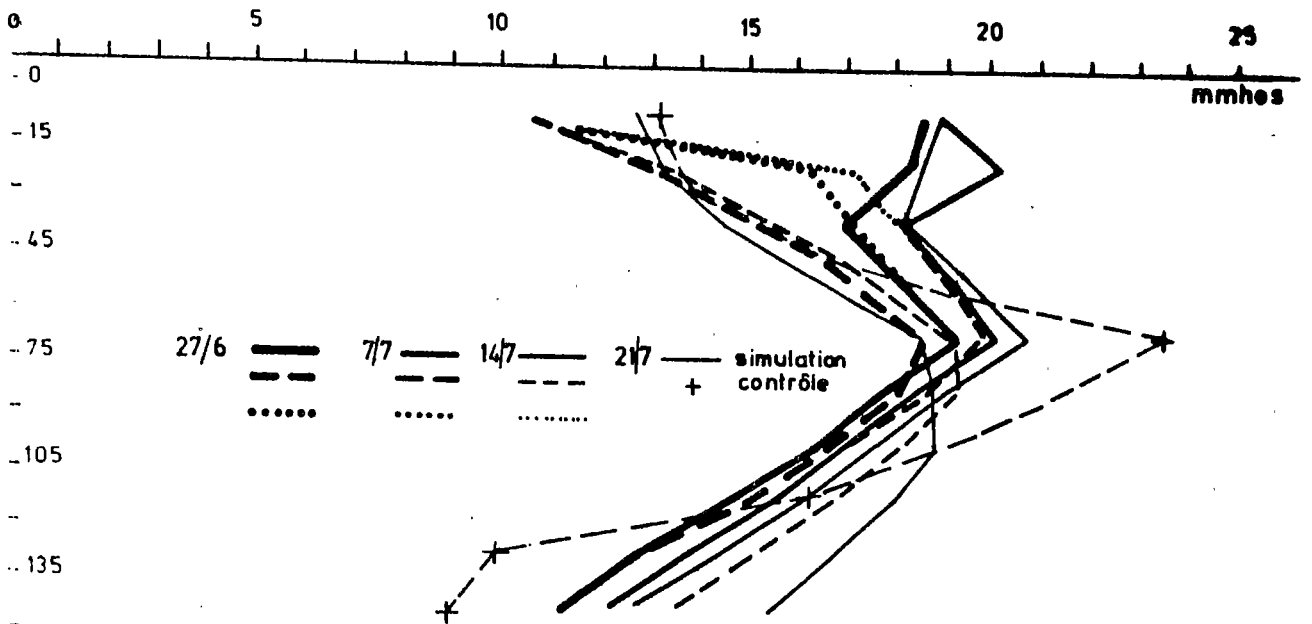
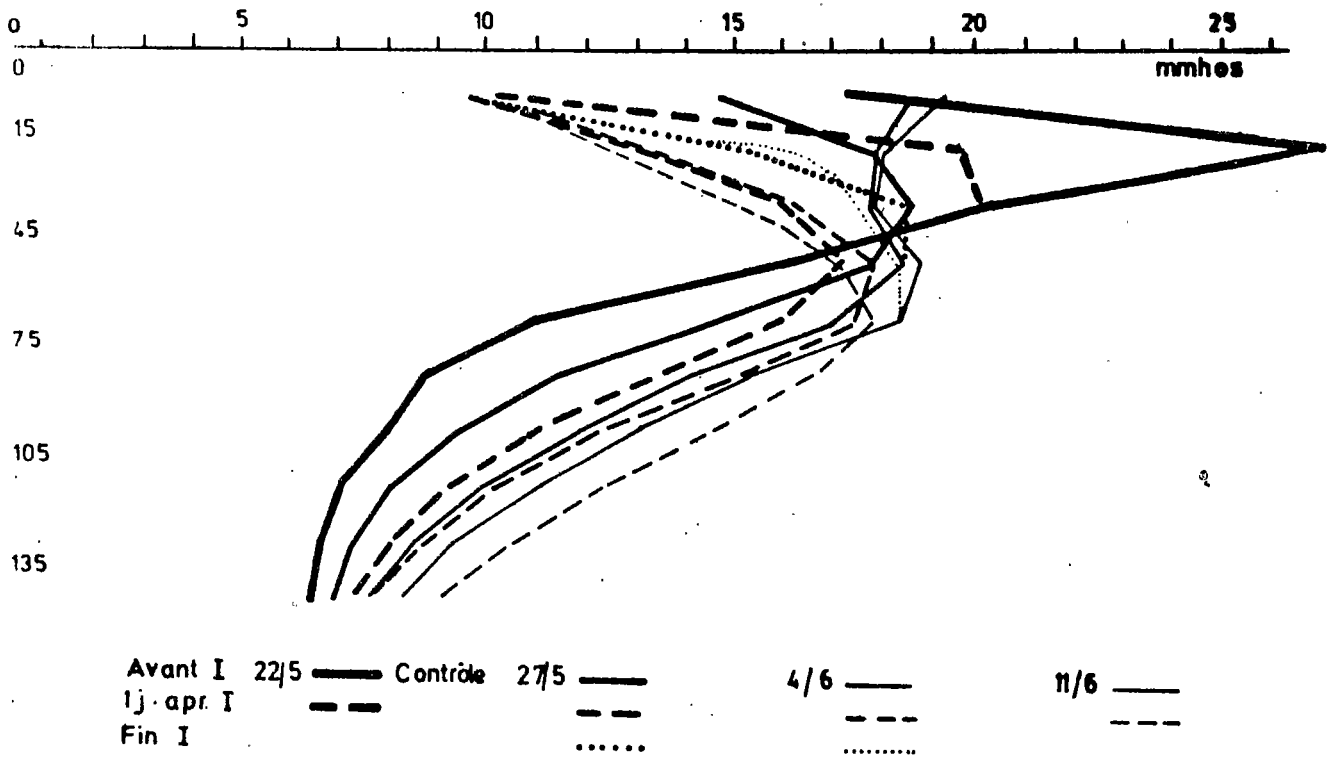


On remarque que la simulation en fin d'irrigation donne une répartition de l'apport uniquement dans les 25 cm supérieurs, avec des teneurs en eau en excès sur les θ_{max} connus. Par contre, 24 heures après le début de l'irrigation, le profil simulé indique un transfert de l'eau en profondeur, montrant une diminution dans les 35 cms supérieurs, une augmentation de 35 à 100; le profil mesuré sur le terrain se place entre les précédents.

On voit donc qu'il serait illusoire de tenter de retrouver par simulation les profils mesurés sur le terrain après une irrigation, étant donnée la vitesse des flux au voisinage de l'état saturé. Nous nous sommes donc limités à comparer les profils de contrôle aux simulations des mêmes dates, les événements hydrologiques étant tamponnés sur une longue durée.

A titre d'information on a reproduit sur la figure I-40 l'évolution des profils salins simulés lors de chaque irrigation sur la période du 22/5 au 21/7. Ils permettent de saisir l'approfondissement progressif du front de salinisation, tandis qu'on remarque une stabilisation du niveau de salure dans l'horizon supérieur.

Fig.I-40.Evolution des profils de conductivité(solution du sol)



III-4.2. Simulation de 4 mois

Les figures I-41.a,b ,présentent les très bons résultats obtenus pour des simulations de 60 et 126 jours lors des deux contrôles du 21/7 et du 25/9:

Contrôle du 21/7

Bien que le profil présente un léger déficit en eau au dessus de 60 cm de profondeur, le bilan boucle à 8.7 mm près, ce qui est remarquable après l'infiltration de 641 mm.

Le déficit hydrique a été ramené à 32 mm, soit environ 0.5 mm/j pour une ETP d'environ 6.75 mm/j. Le profil salin est correctement rendu jusqu'à 90 cm de profondeur, mais à partir de cette profondeur la simulation donne une surestimation de la conductivité de la solution du sol.

Contrôle du 25/9

Le profil hydrique simulé est excellent jusqu'à 55 cm et le bilan tout à fait acceptable:

+ 2.8 mm	dans l'horizon 1	soit	%
- 0.9 mm			2
- 3.6 mm			3

et -1.7 mm pour le profil complet.

Le profil de salure montre encore un décalage plus important de la simulation par rapport au contrôle, si l'on excepte la mesure de terrain à 45-60 qui semble excessive. Il s'avère justement que le sol a accumulé une certaine quantité de gypse qui devrait compenser une partie des différences constatées.

On notera par ailleurs que les analyses du calcaire total sont trop imprécises pour prendre en compte les précipitations de calcite qui ont du survenir dans la microporosité.

III-4.3. Remarques sur les profils de conductivité

III-4.3.1. Dates de contrôle

Les prélèvements de contrôle ont été faits sans se soucier de la période où ils se situaient, qu'ils soient plus ou moins près d'une date d'irrigation. Il en résulte que les irrigations relativement fortes pratiquées sur la parcelle peuvent avoir une influence non négligeable sur la tendance générale d'évolution du profil, surtout dans les horizons supérieurs. Les anomalies que l'on y observe viennent souvent du fait que les heures de mesure et de simulation ne sont pas toujours identiques, sans que l'on puisse remédier à cela sans compliquer le modèle d'une manière rédhibitoire. Il semble donc que l'on puisse se contenter, pour les besoins de la simulation prévisionnelle, d'une illustration des "tendances évolutives". L'analyse des simulations de ZELBA nous a bien montré une conformité avec les contrôles, se traduisant par une salinisation progressive du profil, de la surface vers la profondeur, avec établissement d'un "seuil" qui traduit un certain équilibre entre les apports de sels de l'eau d'irrigation et le drainage en profondeur.

SIMULATION DE 126 JOURS : DU 22 / 5 AU 25 / 9
(IMPRESSION CHAQUE JOUR DE CONTROLE)

PROFONDEUR DU PROFIL : 150 3 ZONES HYDRODYNAMIQUES

ZONE 1 : 0 - 25 TENEUR EN EAU MAXI .378
COEF. DE K(THETA) A= 2.7E+07 B= 15.82

ZONE 2 : 25 60 TENEUR EN EAU MAXI .379
COEF. DE K(THETA) A= 6.12E+09 B= 20.61

ZONE 3 : 60 150 TENEUR EN EAU MAXI .343
COEF. DE K(THETA) A= 2.39E+11 B= 20.61

***** PROFILS INITIAUX *****

PROFIL HYDRIQUE (+:simulé *:mesuré)

PROF	THET-C	THET-M	.0	.05	.10	.15	.20	.25	.30	.35	.40	.45	.50
0	.000	.129	I+										
5	.000	.130	I+										
10	.000	.130	I+										
15	.000	.147	I+54										
20	.000	.154	I+										
25	.000	.154	I+										
30	.000	.192	I+										
35	.000	.229	I+										
40	.000	.228	I+										
45	.000	.232	I+										
50	.000	.234	I+										
55	.000	.234	I+										
60	.000	.244	I+										
65	.000	.252	I+										
70	.000	.252	I+										
75	.000	.247	I+										
80	.000	.241	I+										
85	.000	.241	I+										
90	.000	.241	I+										
95	.000	.241	I+98										
100	.000	.241	I+-										
105	.000	.244	I+-										
110	.000	.250	I+-										
115	.000	.250	I+-										
120	.000	.247	I+-										
125	.000	.243	I+-										
130	.000	.243	I+-										
135	.000	.241	I+-										
140	.000	.239	I+										
145	.000	.239	I+										
150	.000	.239	I+										

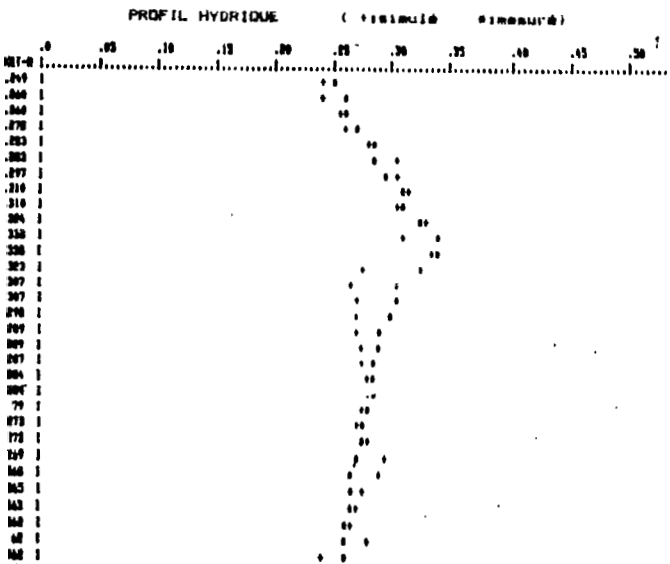
PROFIL DE CONDUCTIVITE (SOLUTION DU SOL) EN MMHOS (+:simulé *:mesuré)

PROF	CE-0	CE-N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
0			I																							
15	0.00	17.20	I																							
30	0.00	20.13	I																							
45	0.00	14.10	I																							
60	0.00	11.05	I																							
75	0.00	8.74	I																							
90	0.00	7.95	I																							
105	0.00	7.43	I																							
120	0.00	6.67	I																							
135	0.00	6.42	I																							
150			I																							

Fig.I-41.a.Simulation de 126 jours

FILE NUMERO 60 EAU A INFILTRER 0 CM

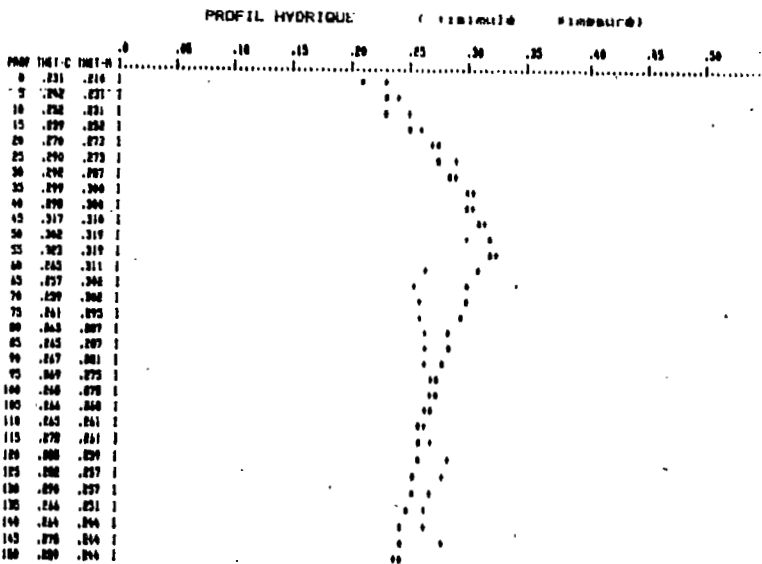
INULEE 1.00 JOUR NOMBRE D'ITERATIONS 62
 LTRÉE DEPUIS JOUR 1 64.12
 INCE DEPUIS JOUR 1 16.26
 NTEE DEPUIS JOUR 1 0.00
 NOMBRE DEPUIS JOUR 1 29.03
 HYDRIQUE CUMULE 3.20
 LINS/PERTES 8.84
 N DE STOCK DEPUIS JOUR 1 8.84



STOCKS INITIAUX	STOCKS DU JOUR	
	CALCULE	MESURE
3.61	6.54	6.70
7.76	10.97	11.10
21.97	24.66	25.24
33.34	42.12	43.04

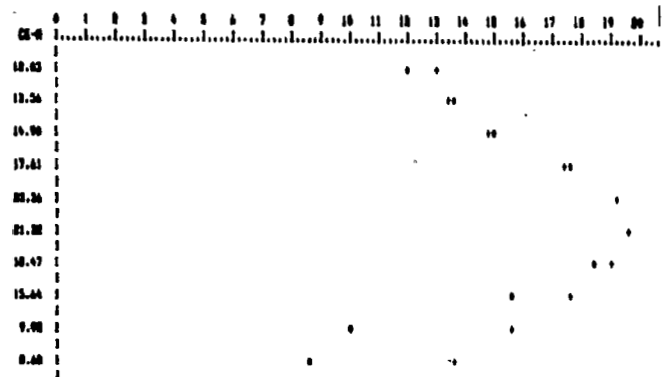
FILE NUMERO 126 EAU A INFILTRER 0 CM

DUREE SIMULEE 1.00 JOUR NOMBRE D'ITERATIONS 17
 EAU INFILTREE DEPUIS JOUR 1 121.36
 EAU DRAINEE DEPUIS JOUR 1 39.91
 EAU REMONTEE DEPUIS JOUR 1 0.00
 EAU CONSOMMEE DEPUIS JOUR 1 73.78
 DEFICIT HYDRIQUE CUMULE 4.46
 BILAN BAINS/PERTES 7.67
 VARIATION DE STOCK DEPUIS JOUR 1 7.67



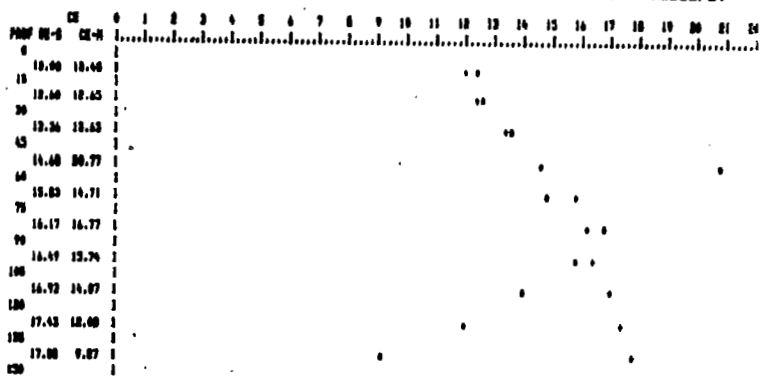
	STOCKS DU JOUR	
	CALCULE	MESURE
COUCHE 1	3.61	6.14
COUCHE 2	7.76	10.63
COUCHE 3	21.97	24.41
TOTAL	33.34	41.18

DE CONDUCTIVITE (SOLUTION DU SOL) EN MNMS (calculé et mesuré)



BILAN DES SELS
 = 8872.57% g/m² LESSIVE= 119%.933 g/m²

PROFIL DE CONDUCTIVITE (SOLUTION DU SOL) EN MNMS (calculé et mesuré)



BILAN DES SELS
 APPORTE= 5426.96% g/m² LESSIVE= 4068.442 g/m²

Fig.I-41.b.Résultats des simulations pour 60 jours et 126 jours

III-4.3.2. Conductivité de la solution du sol et de l'extrait saturé

On pourrait s'étonner de la valeur élevée qu'atteint la conductivité de la solution du sol, notamment quand le sol se trouve à un état relativement sec, par exemple à la fin d'un cycle d'irrigation. C'est qu'à ce moment, la teneur en eau étant faible, les sels s'y trouvent beaucoup plus concentrés.

On peut naturellement inverser le calcul précédent pour passer de la conductivité calculée pour la solution du sol à une conductivité d'extrait saturé correspondante, afin de comparer ces valeurs à ce que l'on a obtenu pour les prélèvements de contrôle. On trouvera plus loin les valeurs ainsi calculées pour les contrôles du 21/7 et du 25/9 (Tableau I-31).

III-4.4. Simulation de la période hivernale

Comme les 3 ou 4 années précédentes, la pluviométrie de l'hiver 1986-1987 a été encore nettement déficitaire, avec 118,7 mm du 11/10/86 au 11/4/87, contre 221,8 pour la "normale".

Le tableau I-23 présente les pluies recueillies sur la parcelle. Les irrigations ont donc dû être poursuivies jusqu'en novembre et en mars. Il en résulte que les apports d'eau salée ont été près de cinq fois plus élevés que les apports d'eau douce (53 cm contre 12!).

Tableau I-23 Pluviométrie de la période Octobre 86 / Avril 87 sur la parcelle de ZELBA

	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril
2			1.86				
4				0.23			
5			0.60				
6			0.42				
10			0.79			1.13	
11	0.25						0.70
13		0.20					
16				0.45			
17			0.05				
18		2.11					
22						0.29	
23	0.21						
24		2.07					
26					0.24		
28	0.27						

La simulation de la période d'hiver entre les contrôles du 25/09/86 et du 13/04/87 restitue un profil hydrique très proche de celui du 13/04 (Fig. I-42), avec une différence de stock de 0,16 cm seulement. Par contre le profil salin est moins bon. Cela semble dû à un choix de valeurs trop faibles pour le crop-factor d'hiver, fixé alors à 0,5.

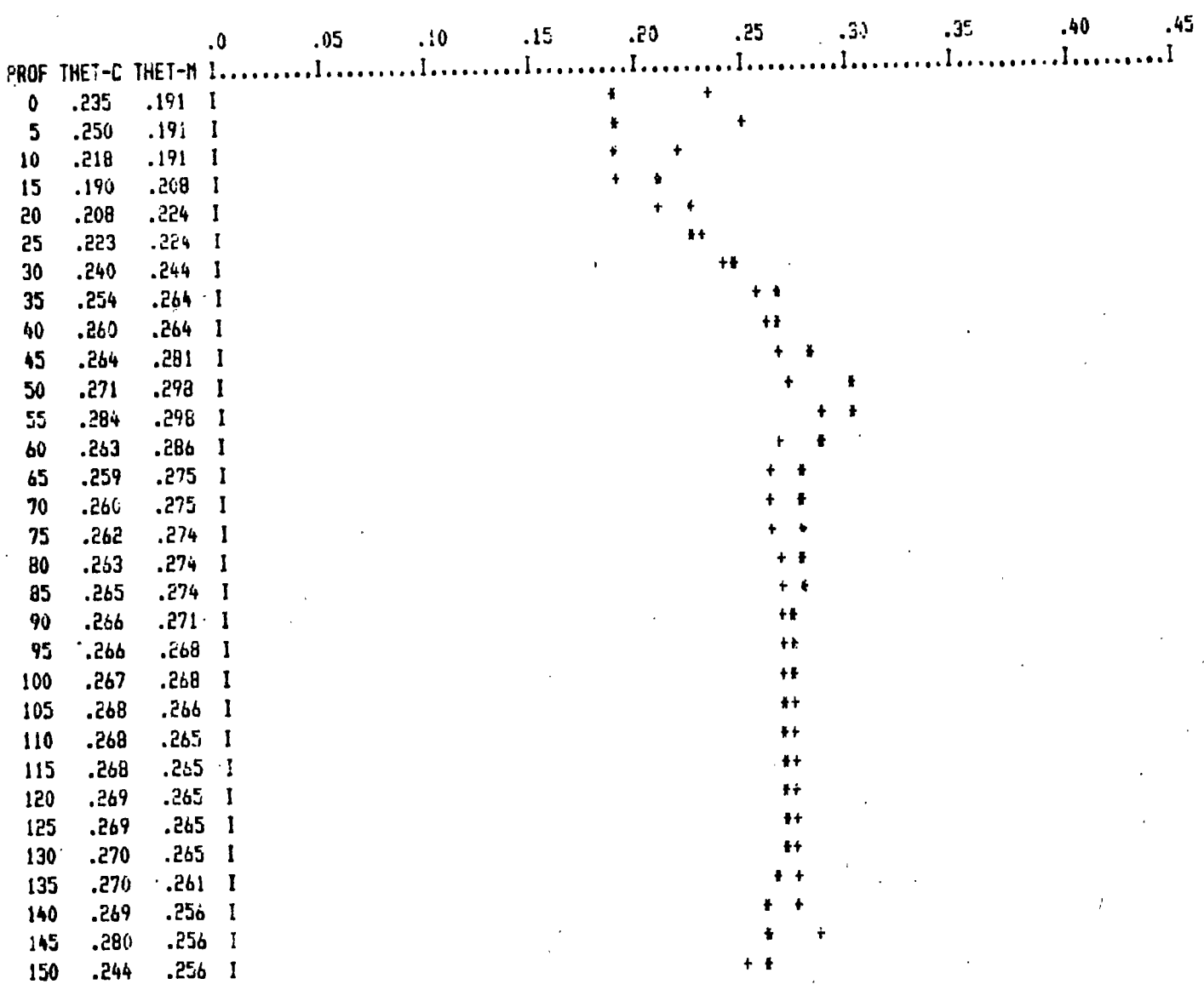
JOUR SIMULE NUMERO 200

DUREE SIMULEE 1.00 JOUR NOMBRE D'ITERATIONS 10

EAU INFILTREE DEPUIS JOUR 1 64.91
 EAU DRAINEE DEPUIS JOUR 1 40.34
 EAU REMONTEE DEPUIS JOUR 1 0.00
 EAU CONSONMEE DEPUIS JOUR 1 27.28
 DEFICIT HYDRIQUE CUMULE 3.98

 BILAN GAINS/FERTES -2.71
 VARIATION DE STOCK DEPUIS JOUR 1 -2.72

PROFIL HYDRIQUE (+:simulé *:mesuré)



	STOCKS INITIAUX		STOCKS DU JOUR	
			CALCULE	MESURE
COUCHE 1	6.19		5.48	5.1
COUCHE 2	10.63		9.03	9.51
COUCHE 3	24.41		23.96	24.06
TOTAL	41.24		38.52	38.66

Fig.I-42.Simulation de 200 jours(du 22/5/86 au 13/4/87)

En le portant à 0,8, chiffre qui semble mieux convenir pour la luzerne, le profil hydrique est peu modifié, car il se passe une compensation entre le drainage et la consommation, ce qui a pour effet, par la diminution du drainage, de diminuer le lessivage des sels en profondeur, et par l'augmentation de la consommation, d'augmenter la salure dans le profil racinaire, permettant d'obtenir une meilleure restitution du profil salin.

III-5. Simulation complète avec le modèle SIMUL

III-5.1. Elaboration des données physico-chimiques

Pour SIMUL, qui doit calculer les concentrations des différents ions équilibrées par les phénomènes de précipitation/dissolution et d'échange avec le complexe, nous devons connaître, d'une part leurs molalités dans le profil initial de la simulation, d'autre part la pression partielle de CO₂ en équilibre avec le pH du sol.

On utilise pour cela deux petits programmes de calcul (TRADAT et ACTIVE), qui transforment les données de l'analyse du bilan ionique et des concentrations en gypse et en calcite. Les molalités ainsi calculées pour le contrôle du 22/5 choisi comme profil initial sont portées dans le tableau I-24.

Tableau I-24 Ventilation composition chimique-bases échangeables et calcite

Niveau cm	ACTIVE						TRADAT			
	molalités dans solu. du sol						Ca	Mg	Na	Calcite
	Ca E-1	Mg E-2	Na	HCO ₃ E-1	Cl E-1	SO ₄ E-1	me/100 g			moles/l
0-15	.131	.696	.144	.186	.096	.308	4.8	.3	1.3	.0982
15-30	.301	.984	.208	.205	.196	.453	4.6	.2	0.5	.0895
30-45	.295	.755	.143	.125	.165	.256	6.1	.2	0.2	.1578
45-60	.283	.920	.095	.115	.129	.197	5.9	.2	0.8	.4343
60-75	.190	.686	.050	.100	.075	.128	4.6	.2	0.6	.4556
75-90	.161	.630	.035	.070	.054	.106	5.4	.2	0.5	.5572
90-105	.139	.552	.030	.069	.051	.091	5.4	.2	0.5	.6161
105-120	.125	.502	.027	.066	.045	.073	5.2	.2	0.6	.6194
120-135	.108	.421	.031	.070	.044	.068	1.9	.1	0.2	.5972
135-150	.103	.388	.029	.067	.041	.069	5.2	.2	0.4	.5492

III-5.2. Simulation de la période du 22/5 au 25/9/86

III-5.2.1. Contrôle des simulations hydriques du calage avec PICPUS

Une première simulation, selon la procédure normale de SIMUL, avec sorties bimensuelles des données calculées, a permis de contrôler l'identité de fonctionnement des modèles PICPUS et

SIMUL. De très légères différences ont été constatées, probablement dues au fait que SIMUL calcule avec un nombre de décimales plus élevé, qui ne modifiaient cependant pas les bilans.

III-5.2.2. Contrôle de la simulation saline

Le modèle SIMUL, comme on l'a vu, ne fonde pas ses calculs sur la conductivité électrique comme PICPUS. Cependant, comme il intègre le calcul de la force ionique de la solution du sol, pour chaque segment de 15 cm, il a été possible de calculer une valeur approchée de la conductivité en utilisant la formule de JURINAK et al (1973), dont la validité a été testée sur les prélèvements du 22/5 (Tableau I-25, Fig.I-43, Fig.I-44).

Nous avons ainsi pu porter sur les profils de conductivité simulés et mesurés aux dates du 21/7 et du 25/9, celui que fournit la force ionique (Fig.I-45).

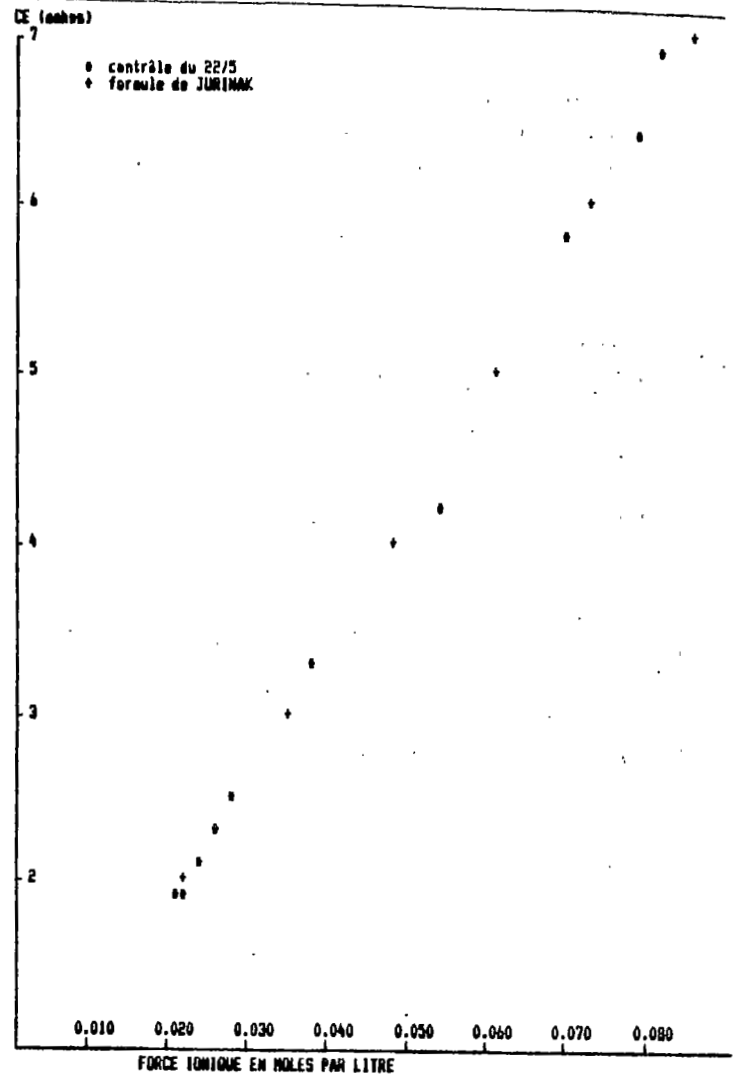
On remarque que le profil "ionique" du 21/7, très voisin des autres vers la surface, s'en écarte un peu dans la partie moyenne et se place entre eux en profondeur. Par contre, le 25/9, le profil "ionique" est plus proche du profil contrôlé que le profil simulé par PICPUS.

Tableau I-25 Comparaison des valeurs de CEes dans les contrôles et leurs simulations

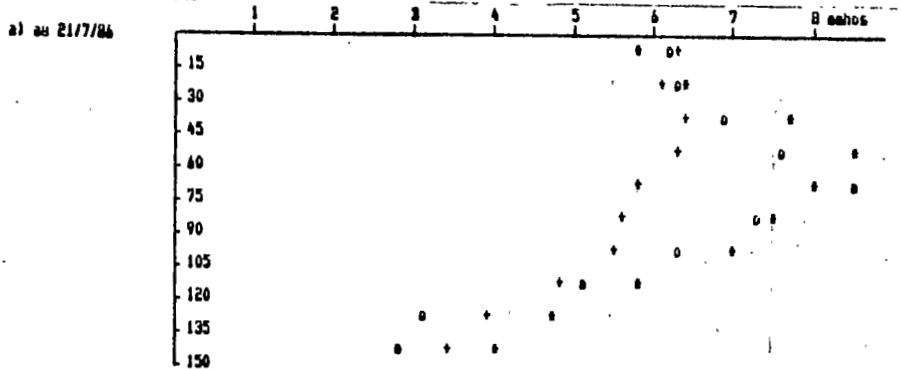
Profondeur	21/7			25/9		
	Mes.	Picpus	Simul	Mes.	Picpus	Simul
0- 15	6,2	5,8	6,3	5,7	4,5	5,0
15- 30	6,3	6,4	6,1	5,4	5,6	5,8
30- 45	6,9	7,7	6,4	5,7	7,2	6,6
45- 60	7,6	8,5	6,3	8,1	7,1	5,8
60- 75	8,5	8,0	5,8	5,5	6,8	5,3
75- 90	7,3	7,5	5,6	5,7	6,1	4,6
90-105	6,3	7,0	5,5	5,2	6,0	4,5
105-120	5,1	5,8	4,8	4,7	6,3	4,5
120-135	3,1	4,7	3,9	3,9	6,3	4,6
135-150	2,8	4,0	3,4	2,8	6,0	4,4

Or, l'analyse des prélèvements de contrôle nous a montré des accumulations de gypse non négligeables sur une grande partie du profil (Fig. I-46). On notera cependant que cette accumulation semble se produire plutôt dans la partie moyenne du profil, de 15 à 45 cm, qu'en profondeur, comme on aurait pu s'y attendre d'après le décalage constaté entre profils simulés par PICPUS et profils contrôlés.

Fig.I-43. Corrélation force ionique-conductivité (contrôle du 22/5)



a) au 21/7/86



b) au 25/9/86

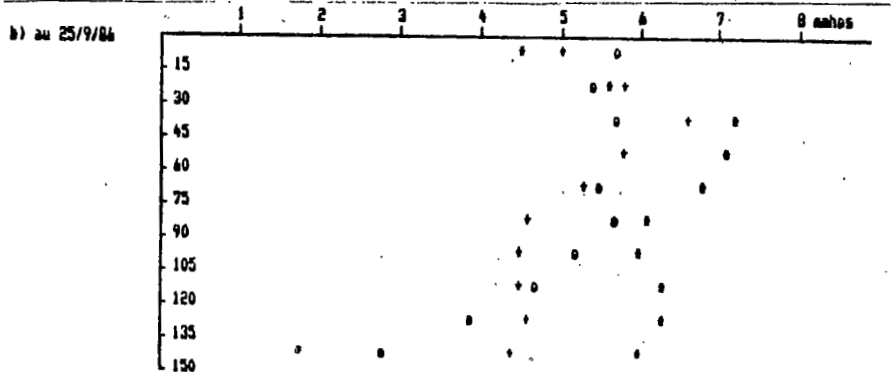


Fig.I-44. Conductivités des extraits saturés mesurées (o) , simulées PICPUS(*) et SIMUL (+)

Fig.I-45.Comparaison des simulations avec PICPUS et SIMUL

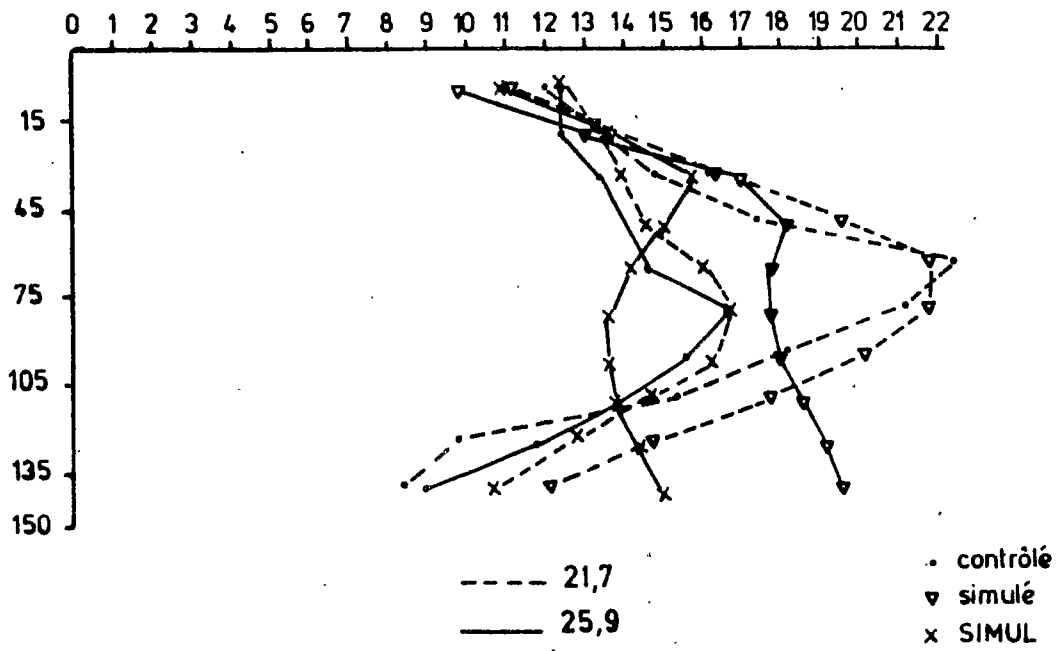
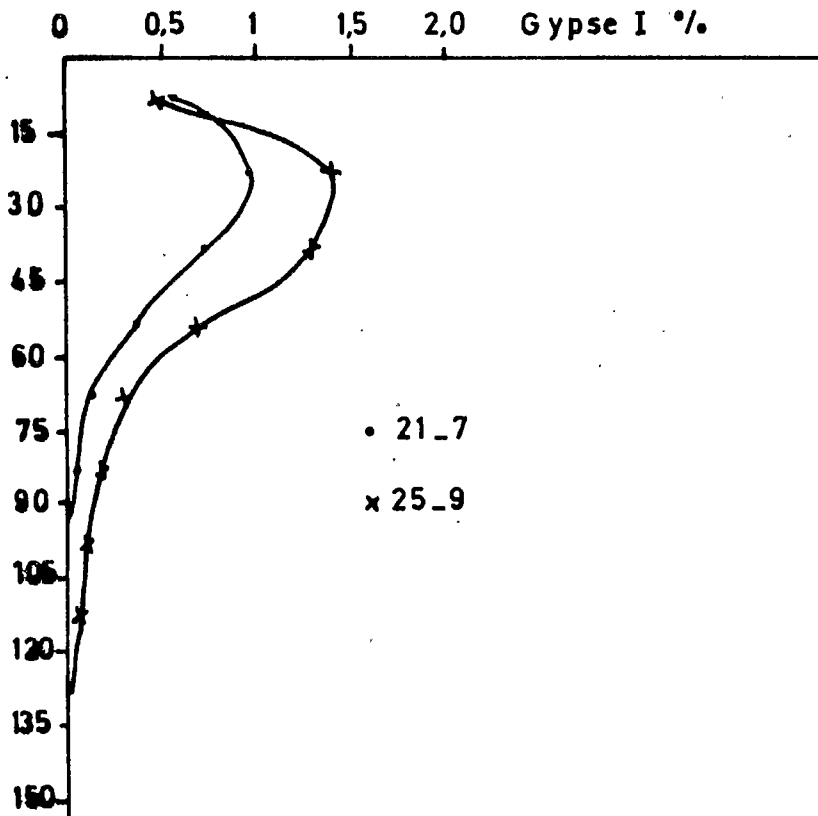


Fig.I-46.Accumulation de gypse



III-5.2.3. Evolution des molalités

Le tableau I-26 donne les concentrations simulées et contrôlées (transformées par TRADAT), pour les principaux ions.

Tableau I-26 Concentrations dans la solution du sol (meq/l)
(Simulation(S) et contrôle(C) sur 4 mois).

a) du 22/5 au 21/7/86

Profondeur	Na		Ca		Mg		SO4		Cl	
	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C
0- 15	74	63	6	3.8	5.1	1.3	13.1	11	63	29
15- 30	92	62	6.5	5	4.5	1.8	13.4	12.5	82	25
30- 45	104	60	8.5	6	3.5	1.7	12	14	101	34
45- 60	108	68	11.3	8.1	2.3	3.4	9.4	10.5	124	59
60- 75	104	71	15	16.2	1.9	4	7.4	8	141	105
75- 90	89	49	18.9	13	1.6	4	6.2	5.5	146	90
90-105	71	39	20.9	12	1.4	4	5.5	3.7	137	76
105-120	57	28	20.4	8	1.3	3.5	5.5	3.2	120	52
120-135	45	16	17.7	5.5	1.2	1	5.4	1.9	100	28
135-150	38	15	14.7	4.3	0.9	1	5	2	80	22

b) du 22/5 au 25/9/86

Profondeur	Na		Ca		Mg		SO4		Cl	
	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C
0- 15	67	82	6.3	9	5.7	3.6	14.1	18	58	57
15- 30	93	59	6.1	7	6.6	2.6	16.2	10.5	78	55
30- 45	117	79	6.7	6.5	6.2	1.8	16.1	12.5	104	64
45- 60	119	70	7.6	8.5	4.5	2.4	14	12	110	71
60- 75	113	59	8.5	13	3.1	3.2	12.2	8.5	110	71
75- 90	104	52	9.9	17.5	2	4	10.1	11.5	110	77
90-105	94	39	12	17	1.4	4	8.4	9	113	74
105-120	84	29	14.4	14.5	1.1	3.7	7	3.5	118	95
120-135	78	28	16.8	12.5	1.2	3.9	6.3	3	123	79
135-150	69		19		1.2		5.6		127	

Si un certain nombre de couples sont assez proches, on observe cependant une assez grande disparité dans ces résultats, notamment pour certains ions.

Cette anomalie montre une tendance systématique car on a obtenu une assez bonne corrélation, par exemple pour les valeurs de Na et Cl, qui sont les plus dispersées:

$$\text{LN}(\text{valeur contrôlée}) = 1.4575 \text{ LN}(\text{valeur simulée}) - 2.7462 \quad (r=0.82)$$

C'est pour les ions bivalents que l'accord entre contrôle et simulation est le meilleur (Fig. I-47). Les valeurs pour SO_4 sont très proches, ce qui prouve que le contrôle de sa molalité par la précipitation de gypse est bien rendue.

Pour Ca l'accord est bon jusqu'à 75 cm, plus lâche au-dessous. Pour Mg on observe une légère inversion de tendance, mais les valeurs sont voisines.

Par contre, pour Na et Cl, si la forme générale des profils est identique, montrant un pic de Na vers 75-90 et un pic de Cl vers 45-60, on note un fort décalage en excès de la simulation. Il faut remarquer au passage que le bilan ionique est fait sur un mélange de 4 prélèvements faits "en croix" sur le terrain à environ un mètre du tube de sonde. Nous ne sommes donc pas à l'abri d'hétérogénéités probables du sol.

Il semble donc que le fait que les profils de concentration obtenus aient la même allure à moins d'un ordre de grandeur près suffise à montrer que le fonctionnement simulé ne s'écarte pas trop de la réalité.

Néanmoins, on peut être conduit à se demander si l'expression de la salure uniquement sous la forme de conductivité de la solution du sol n'est pas une manière plus sûre pour suivre le comportement salin du sol entre les contrôles, à condition bien sûr de corriger éventuellement les profils simulés par PICPUS des quantités de gypse précipitées.

Par ailleurs, il est encore possible de tenter d'obtenir une meilleure reproductibilité des profils de Na, par exemple, en modifiant les valeurs des coefficients de sélectivité des échanges Ca/Na et Mg/Na, dont les valeurs présentes sont des standards tirés de la littérature.

Nous inspirons des résultats rapportés par différents auteurs sur des sols aussi variés que ceux du Delta du Nil (SHETA et al 1981), ou du nord-est Brésilien (RIEU, comm. orale), nous n'avons pas obtenu de très grosse amélioration des résultats antérieurs. On observe toujours simultanément, pour ce qui concerne par exemple le sodium, que le sodium soluble est surestimé par le modèle, tandis que le sodium échangeable est, lui, sous-estimé, et ce dans des proportions équivalentes.

On trouvera dans le tableau I-27 les chiffres obtenus par ces différentes simulations pour ce dernier. Cela entraîne forcément une sous-estimation du rapport Na/T qui traduit l'alcalinisation. Néanmoins, faute de disposer de coefficients de sélectivité propres au sol de Zelba, on doit noter que l'augmentation significative de la teneur en sodium du complexe, entre le profil initial du 22/5 et celui du 25/9, est bien rendue.

Fig.I-47. Concentration dans la solution du sol (Simulé-S, Contrôlé-C)

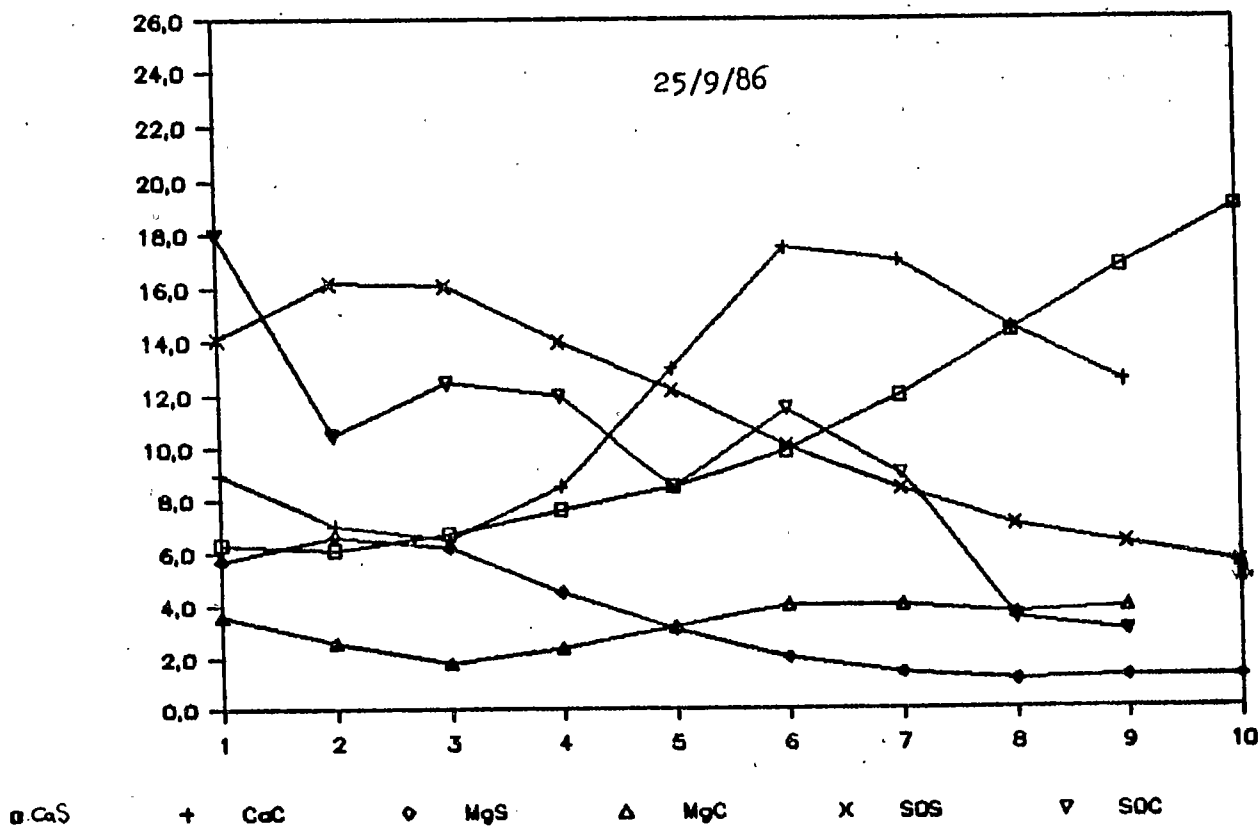
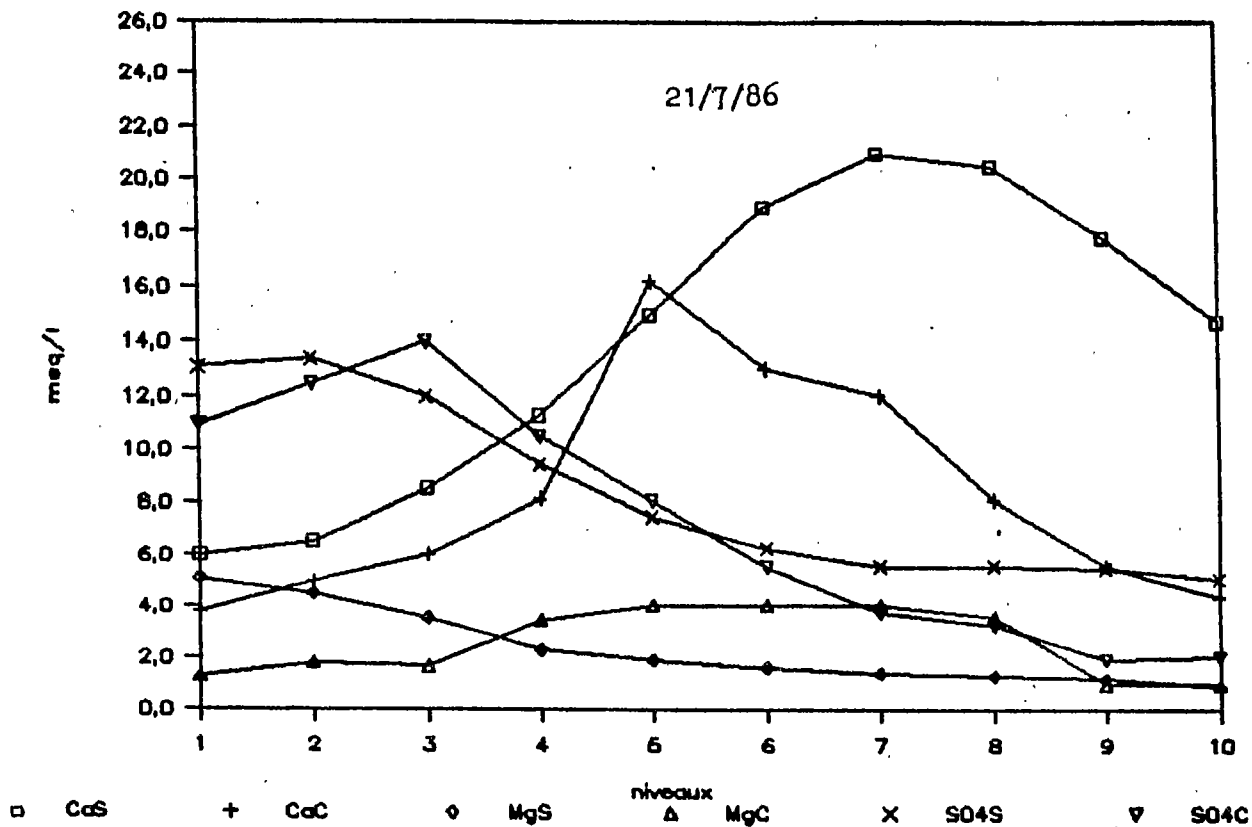


Tableau I-27 Contrôle et simulations du sodium échangeable
(meq/100g)

Profondeur	22/5	25/9			
	Mesuré	Simulé 1	Simulé 2	Simulé 3	Mesuré
0- 15	1,3	1,4	1,5	1,4	3
15- 30	0,5	1,5	1,6	1,5	4,6
30- 45	0,2	2,4	2,8	2,2	4,9
45- 60	0,8	2,5	2,4	2,4	3,8
60- 75	0,6	1,8	1,6	1,9	3,1
75- 90	0,5	1,8	1,5	1,7	---
90-105	0,5	1,5	1,3	1,7	3,8
105-120	0,6	1,25	1,0	1,4	1,7
120-135	0,2	0,4	0,3	0,5	1,6
135-150	0,4	0,9	0,7	1,0	0,2

Simulé 1 : coefficients standards $K_c = 5 + 4 E_{ca}$

Simulé 2 : coefficients du Nil $K_c = 4,96 + 2,19 E_{ca}$

Simulé 3 : coefficients du Brésil $K_c = 12,83$

K_c est la constante d'équilibre de la réaction d'échange Na-Ca entre le sol et la solution qui l'imprègne.

E_{ca} est la fraction équivalente des cations Na^+

III-6. Prévision à moyen terme de l'évolution saline

III-6.1. Influence de la pluviométrie "normale" sur le lessivage des sels

Les pluies d'hiver de la normale pluviométrique ont été arbitrairement réparties par décades du 1/10 au 30/4 (Tableau I-28).

Tableau I-28 Pluies décadaires normales

Mois	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Fev.	Mars	Avr.
Date							
1	15	14	10,5	7,5	9	10	7,4
11	15	14	10,5	7,5	9	10	7,4
21	15,2	14,6	10,7	7,6	9,1	10,3	7,5

Les résultats de la simulation prévisionnelle permettent de signaler plusieurs faits probables:

- le drainage obtenu est faible (44,4 mm seulement),

- le lessivage correspondant est surtout marqué par un léger transfert en profondeur des pics de salure,
 - le déficit hydrique de la luzerne est énorme (350 mm), ce qui prouve la nécessité de poursuivre les irrigations en partie durant la période hivernale, même lorsque l'année n'est pas déficitaire.

Pour voir les choses avec un peu plus de détails, nous avons testé l'impact d'une pluie de 30 mm qui suivrait les profils de contrôle relevés en septembre 1986, en février et avril 1987. Réalisées sans évaporation, ces simulations montrent que le lessivage obtenu est fonction, d'une part de l'état hydrique, d'autre part de l'état de salure du sol. Ainsi alors que cette pluie permet le lessivage de 38 g/m² de sels en septembre, il se trouve réduit à seulement 4,6 et 9,2 pour les autres contrôles. La figure I-48 montre l'effet obtenu à partir du contrôle du 25/9/86, avec une zone "lessivée" de 0 à 45 cm, et une accumulation progressive en profondeur.

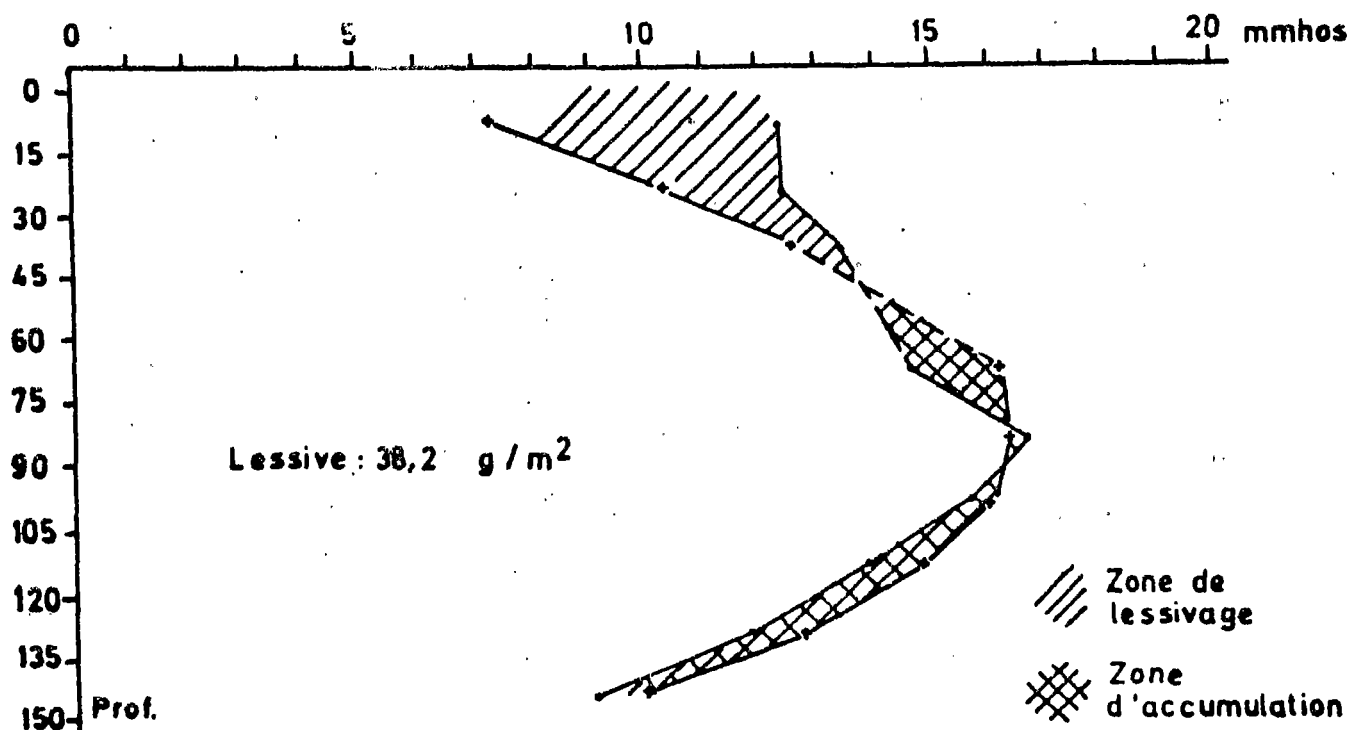


Fig.I-48.Effet d'une pluie de 30 mm (Profil de contrôle du 25/9)

Par ailleurs, on pourrait penser qu'un apport d'eau égal au stock présent dans le sol le 25/9 lessiverait tous les sels. Or, le calcul montre qu'un apport de 412 mm n'exporterait que 525 g/m², du même ordre de grandeur que l'apport des pluies "normales" (environ 300 g/m² pour 222 mm). Ceci montre une nouvelle fois que les irrigations d'hiver sont indispensables.

III-6.2. Etude de quelques corrections possibles

Effet d'une irrigation d'hiver supplémentaire, par rapport aux apports effectués en 1986-87

Nous avons simulé un apport supplémentaire de 6 cm d'eau d'irrigation immédiatement après le profil de contrôle du 5/02/87, en poursuivant la simulation pendant 10 jours, et en calculant à chaque fois le drainage cumulé et le lessivage cumulé.

Ce dernier est calculé en grammes par m², comme l'apport lui-même, par le produit, pour chaque itération, de la conductivité du segment de sol le plus profond (135-150 cm), par le drainage calculé pour la même itération (Tableau I-29).

Tableau I-29 Correspondance drainage/lessivage sur une irrigation d'hiver supplémentaire

Numéro du jour	Apport (g/m ²)	Drainage (cm)	Lessivage (g/m ²)
1	261.1	0.01	2.3
2		0.03	4.7
3		0.42	66.8
4		0.57	91.35
5		0.74	117.5
6		1.06	168.5
7		1.29	204.3
..	
10		1.84	291.0

Pour un "apport" de sels de 261 g/m², on obtient au bout de 10 jours un lessivage de 291 g/m², la relation drainage/lessivage étant linéaire (Fig. I-49). Sur le profil salin, on observe un dessalement important dans le domaine racinaire, notamment entre 0 et 45 cm, ainsi qu'une régularisation du profil (Fig. I-50).

Il faut remarquer que cette simulation a été réalisée sans consommation racinaire, et pourtant l'effet de lessivage est relativement réduit. On peut en conclure que de telles irrigations complémentaires sont peu utiles, dans l'état de salure actuel de la parcelle, puisque nous avons remarqué que la salinisation progressive ne dépasse pas un certain seuil dans les horizons supérieurs, tout en se propageant en profondeur (Tableau I-30, I-31).

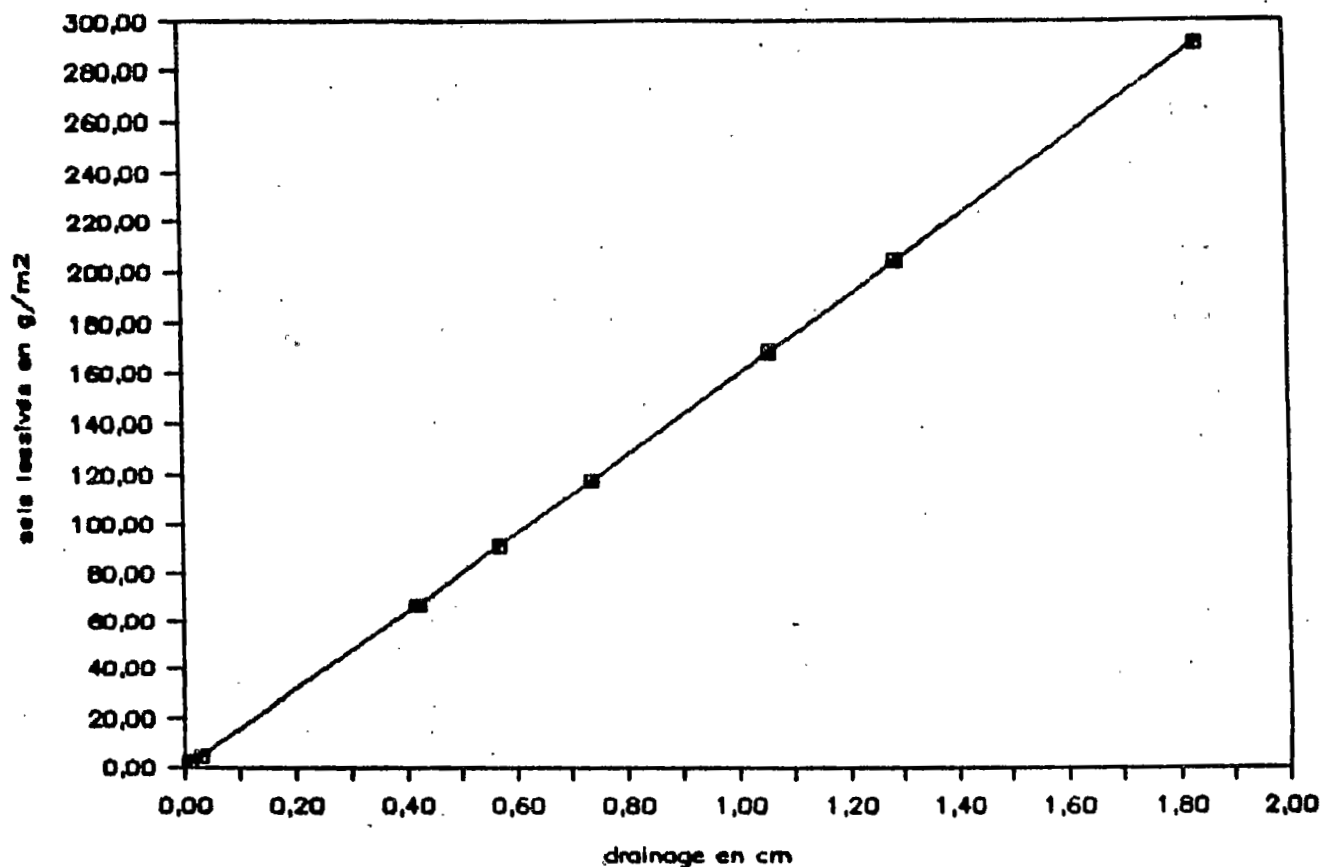


Fig.I-49. Correspondance D - L (D : drainage , L : lessivage)

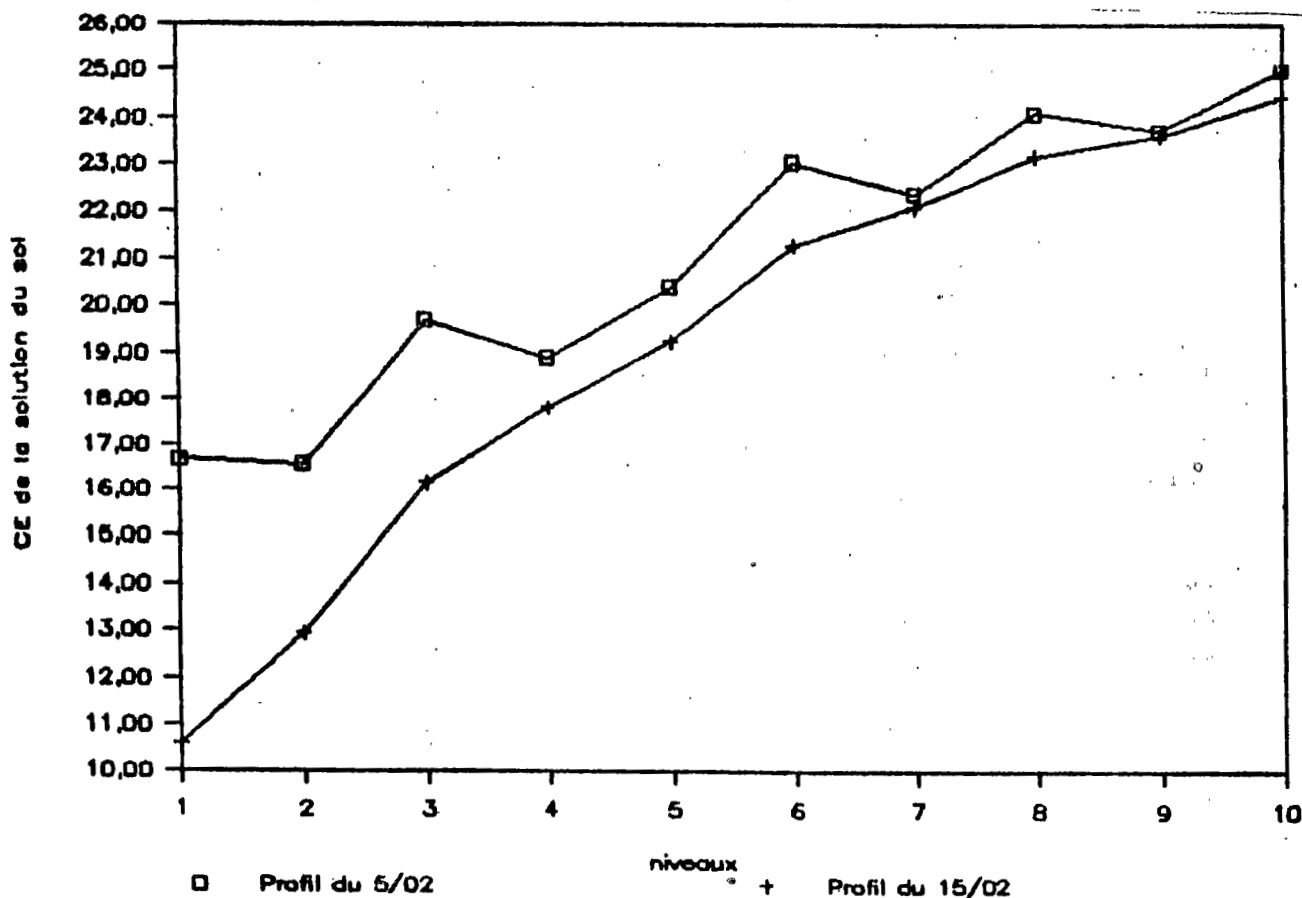


Fig.I-50. Effet du lessivage (Profils salins en mmhos)

Tableau I-30 Effet du lessivage sur le profil salin

Profondeur (cm)	Profil du 5/02 (contrôlé)	Profil du 15/02 (simulé)
0-15	16.69	10.61
15-30	16.58	12.94
30-45	19.71	16.17
45-60	18.91	17.82
60-75	20.42	19.26
75-90	23.08	21.30
90-105	22.41	22.12
105-120	24.14	23.24
120-135	23.77	23.66
135-150	25.04	24.49

Tableau I-31 Evolution des profils salins de contrôle

Profondeur	22/5/86	21/7/86	25/9/86	5/2/87	13/4/87
0- 15	5,8	6,2	5,7	4,3	6,0
15- 30	6,9	6,3	5,4	5,2	4,9
30- 45	6,4	6,9	5,7	7,0	5,0
45- 60	4,2	7,6	8,1	6,6	5,3
60- 75	3,3	8,5	5,5	6,6	5,3
75- 90	2,5	7,3	5,7	7,4	5,3
90-105	2,3	6,3	5,2	6,7	5,9
105-120	2,1	5,1	4,7	7,1	5,5
120-135	1,9	3,1	3,9	5,9	5,5
135-150	1,9	2,8	2,8	7,2	5,4

IV- RECHERCHE DE TECHNIQUES D'EXTRAPOLATION A L'ENSEMBLE DU PERIMETRE

IV-1. Introduction

Si la simulation de l'évolution de la salure dans la station expérimentale est assez satisfaisante, on doit remarquer qu'il ne s'agit là que d'une simulation ponctuelle, dont les résultats ne peuvent guère être étendus à plus d'une dizaine de mètres des points de mesure.

Pour étendre la simulation, et donc surtout la prévision, à l'ensemble du périmètre, ce qui est un des objectifs essentiels de notre démarche, on dispose de l'alternative suivante:

- ou bien répéter systématiquement une telle expérimentation sur l'ensemble du périmètre, selon un maillage à définir, pour en tirer des paramètres moyens de prévision,
- ou bien faire appel à une étude de la répartition des propriétés hydrodynamiques, par le biais de la géostatistique, pour tenter de faire apparaître des "lois" de répartition.

Il est évident que la première solution n'est pratiquement pas réalisable, en raison du temps qui serait nécessaire, du coût rapidement prohibitif et de la gêne qu'une telle procédure pourrait occasionner aux agriculteurs.

La seconde, qui fait l'objet actuellement d'intenses recherches tant fondamentales qu'appliquées, nous a semblé plus aisée, sans pourtant méconnaître ses limitations.

Elle peut permettre en effet, non seulement d'étendre spatialement les résultats obtenus sur un ou plusieurs points d'essai, donc à l'aval de la simulation proprement dite, mais aussi en amont, d'aider au choix des points de simulation ponctuelle.

Il n'a malheureusement pas été possible, dans le cadre de ce travail, d'exploiter complètement ces nouvelles techniques; nous avons seulement tenté d'en approcher une application pratique au problème de la dynamique de l'eau dans le sol, et par là à celle des sels.

IV-2. Etude géostatistique de quelques paramètres de l'hydrodynamique et de la salure

Comme la simulation par modèle mathématique repose sur des données ponctuelles, il était normal de rechercher les moyens d'étendre ces résultats dans l'espace. Pour cela, il est obligatoire de recourir à des notions de variabilité spatiale. Ces notions ont acquis ces dernières années une grande importance. Non seulement l'analyse géostatistique est utilisée pour la recherche

recherche de techniques d'extrapolation de résultats tel est notre cas, mais aussi elle est d'une grande utilité pour la prise de décision quant au choix préalable de l'emplacement d'une parcelle expérimentale ou même d'un périmètre.

Dans notre étude, la théorie des variables aléatoires régionalisées (MATHERON, 1965 ; DELHOMME, 1978 ; VAUCLIN, 1982 ; GASCUEL, 1984 et BOIVIN, 1987), a été employée pour l'étude de la structure spatiale du niveau d'accumulation du calcaire et de la perméabilité.

Une variable régionalisée est une variable caractérisant un phénomène se déplaçant dans un espace X et Y manifestant une certaine structure (BOIVIN).

IV-2.1. Structure de la variable

La recherche de la structure d'un phénomène aléatoire régionalisé, c'est-à-dire voir la corrélation des données dans l'espace se ramène à l'étude de la covariance entre les points de mesures. Cette étude se porte sur le corrélogramme, graphe de la fonction d'auto-corrélation, ou le demi-variogramme, appelé communément variogramme, graphe de la fonction $\gamma(h)$.

σ^2

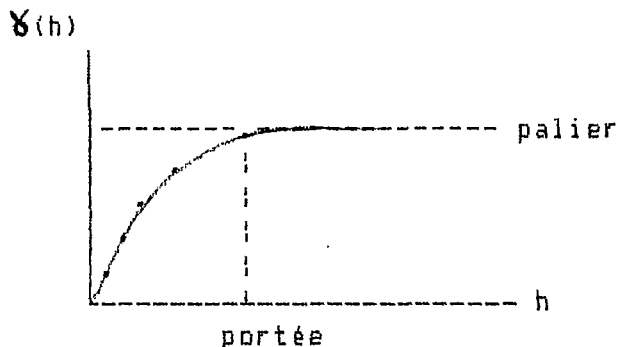


Fig. I-51 Représentation graphique du variogramme dans le cas où la fonction aléatoire est stationnaire.

On estimera le variogramme pour des valeurs de h : si on possède N données, on constituera $(N-1)(N-2)/2$ couples de points différents que l'on regroupera par classe de distances en veillant à obtenir suffisamment de couples par classes (au moins une cinquantaine) et à définir suffisamment de classes pour avoir une bonne estimation de la covariance.

Dans le cas où la fonction aléatoire est stationnaire, on obtient des graphes (Fig. I-51) où h est la portée, distance à partir de laquelle les points sont indépendants. Dans la pratique, ces graphes montrent comment se détériore l'information recueillie en un point lorsqu'on s'en éloigne et jusqu'à quelle distance cette information a une influence.

Le tracé du variogramme représente une description de la structure spatiale de la variable étudiée.

Associé à des techniques non biaisées d'interpolation linéaire (Krigage), il permet d'estimer des valeurs en des points non observés, avec une variance minimale (BURGESS et WEBSTER, 1980; in VAUCLIN, 1982).

IV-2.2. Logiciels utilisés

Dans une première phase, nous avons utilisé le programme GAMMA permettant l'analyse des données et le calcul du variogramme. Ce travail a été effectué dans l'Université de KIEL (RFA). Le programme lui-même a été réalisé par J.P. CHILES, P. DELFINER et J.P. DELHOMME à l'ENSMP à FONTAINEBLEAU.

Dans une deuxième phase, nous avons utilisé le programme GEOSOL, élaboré par P. Boivin. Ce travail a été entièrement réalisé avec notre ordinateur à Tunis.

Le programme GEOSOL permet en plus de l'analyse des données et le calcul du variogramme, le krigeage c'est-à-dire une représentation cartographique de la variable analysée.

Bien qu'on ait utilisé préalablement GAMMA pour l'analyse structurale des données, qu'on a délaissé vu qu'on ne possède pas le programme BLUEPACK qui lui est associé pour faire le krigeage, on a conservé les informations ainsi acquises pour les comparer à celles obtenues par GEOSOL. On se réfère dans l'analyse des variogrammes aux résultats de l'un et de l'autre.

GEOSOL a été conçu par BOIVIN, chercheur du Centre ORSTOM de Dakar pour effectuer des traitements géostatistiques courants sur des données pédologiques.

Le programme écrit en GWBASIC, est entièrement conversationnel. Il comporte les modules permettant d'effectuer:

- la saisie des données et leur restitution.
- le calcul des variogrammes moyens ou orientés.
- la modélisation du variogramme au moyen de sept modèles différents.
- le krigeage ponctuel ou par maille.
- le tracé des cartes krigées, sur table traçante, sur écran ou sur imprimante matricielle.

IV-2.3. Procédure d'analyse des données

On distingue deux étapes dans l'analyse de la variabilité spatiale d'une propriété: d'une part, la recherche de paramètres caractérisant la variabilité spatiale (coefficient de variation, structure, ...) et d'autre part la cartographie par krigeage.

Schématiquement, on procède ainsi:

-analyse structurale des données:

* détermination de la moyenne, de l'écart-type, du coefficient de variation (C.V), de l'histogramme de fréquence et de fréquence cumulée; suppression éventuelle de points.

* détermination du variogramme moyen, modélisation du variogramme; ajustement d'un modèle au variogramme. Les valeurs ont été regroupées par pas de distance égale à 50 m. Un minimum de couples par pas de distance est nécessaire à la validation du variogramme. Ce nombre est de 50 couples (in GASCUEL).

-krigeage:

* réalisation du krigage ponctuel.

* traçage de cartes krigées avec tramage ou avec des courbes d'isovaleurs.

IV-2.3.1. Données pédologiques - Périmètre de ZELBA

A. Caractérisation

Nous avons observé dans les sols de ce périmètre quatre horizons caractéristiques:

- un horizon de surface de couleur beige ,et de texture sablo-limoneuse.
- un horizon plus jaunâtre, de texture argilo-sableuse.
- un horizon de texture argilo-limoneuse, avec apparition d'amas calcaires.
- un horizon de couleur beige-jaunâtre, une fréquence d'amas calcaires de l'ordre de 10 % .

Toutefois ,d'une parcelle à une autre ,la profondeur de ces horizons diffère .

Nous avons donc retenu cette caractéristique qui permet de distinguer les sols de ce périmètre, et qui peut traduire un comportement hydrodynamique différent suivant que ce niveau riche en amas calcaire est plus ou moins profond.

B. Analyse géostatistique appliquée aux données de la profondeur du niveau d'accumulation calcaire

a) Présentation des données

Ce niveau a été déterminé soit par des observations faites sur des profils, soit à partir de coups de tarières:

- 18 profils, dont 4 situés légèrement en dehors des limites du périmètre .
- 12 trous de tarières .

Chaque point d'observation a été caractérisé par trois variables: X , Y et Z avec X et Y les coordonnées du point ,et Z, la profondeur à partir de laquelle apparaissent les amas calcaires (Fig.I-52, Tableau I-32).

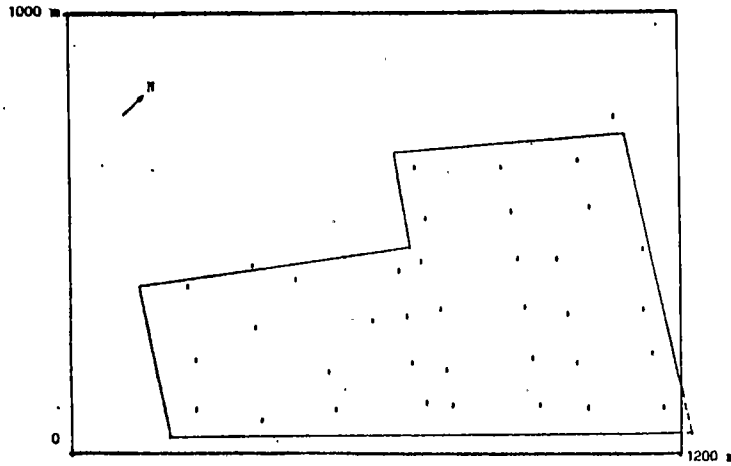


Fig.I-52.Plan d'échantillonnage-Paramètre calcaire

Tableau I- 32 Valeurs des mesures de la profondeur des accumulations calcaires

X m	Y m	Z cm	X m	Y m	Z cm	X m	Y m	Z cm
1160	456	65	724	862	55	1046	570	75
788	196	130	748	280	110	1074	364	60
790	600	75	1074	912	50	856	390	70
570	388	120	1216	788	70	594	396	95
280	660	85	436	776	80	320	484	50
1404	742	85	918	944	60	436	622	40
1384	266	110	444	470	120	596	548	115
744	128	70	958	464	80	702	624	105
192	500	60	954	806	55	894	586	75
832	708	45	1132	680	60	1186	596	75

Le coefficient de variation (C.V) est le rapport de l'écart-type sur la moyenne (Tableau I-33) .Il est de 30.9 %, correspondant à une variabilité moyenne,toutefois la bibliographie mentionne (in GASCUEL) que pour un caractère statique similaire,la variabilité serait faible(moins de 10 %).Cela est dû sûrement au nombre faible d'échantillons;il faudrait pour un C.V compris entre 10 et 50 % avoir 100 points de mesure .

Tableau I-33 Valeurs des paramètres statistiques pour la profondeur des accumulations calcaires.

nombre de données	30
valeur minimale en cm	40
valeur maximale en cm	130
moyenne en cm	78.17
écart-type	24.24
coeff.de variation en %	30.9

Les figures I-53 a et I-53 b représentent les histogrammes de la fréquence et de la fréquence cumulée de la population distinguée, on peut faire les remarques suivantes: les valeurs observées sont relativement groupées, 53.3 % de la population ont des profondeurs comprises entre 50 et 80 cm, la distribution des données apparaît une distribution normale.

Profondeur d'amas calcaire.

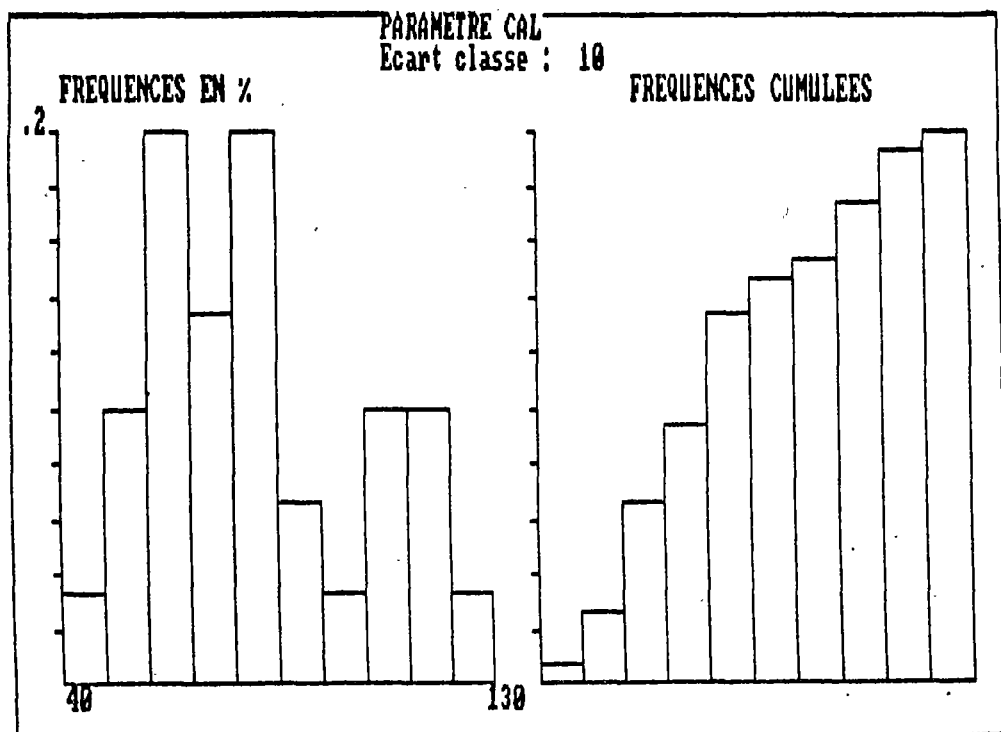


Fig. I-53. a. Fréquence des mesures (%) Fig. I-53. b. Fréquences cumulées

b) Structure des données

La variable apparaît structurée (Fig. I-54 a). Un palier à 587.47 correspond à une portée de 300 m (le palier est à 553.8 pour une portée de 296 m avec GAMMA). La profondeur des accumulations calcaires est donc structurée, il y'a une corrélation entre les points de mesure. Nous avons ajusté au variogramme obtenu par GAMMA un modèle linéaire : $\gamma(h) = 1.46 * h + 347.32$

Il faut noter toutefois, le nombre faible de couples de points pour les nombres de pas supérieurs à 7. Le modèle peut avoir une portée acceptable jusqu'à 696 m. Un nombre plus élevé de données aurait permis un meilleur ajustement du modèle et une portée plus fiable. Par ailleurs, nous déduisons que:

- * la profondeur des accumulations calcaires est structurée.
- * la qualité de l'information recueillie en un point se détériore lorsqu'on s'en éloigne d'une distance de 300 m.
- * cette information a une influence jusqu'à 700 m.

Les variogrammes directionnels (X, Y, X+Y et X-Y) ne permettent pas d'observer une dérive suivant l'un de ces axes. Avec GEOSOL, nous avons ajusté au variogramme moyen un modèle sphérique+linéaire (Fig. I-54 b):

$$\gamma(h) = -0.46 * h + 876.51 * (1.5 * h / 300 - 0.5 * (h / 300)^3)$$

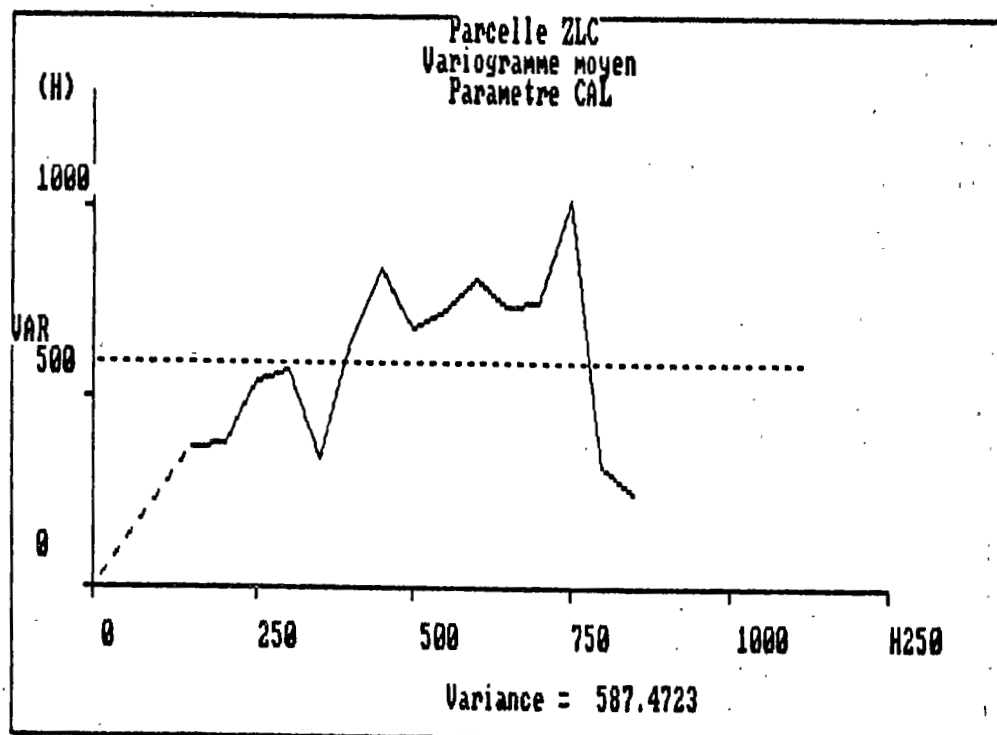


Fig.I-54.a.Paramètre calcaire-Variogramme moyen

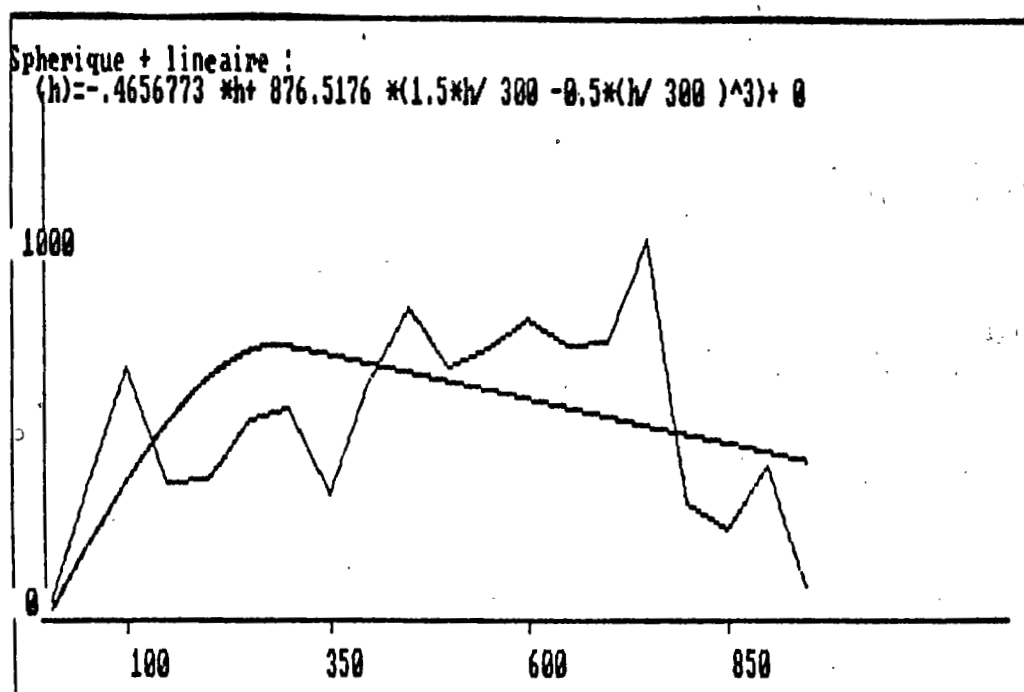


Fig.I-54.b.Paramètre calcaire-Modélisation du variogramme

c) Krigeage

Le krigeage utilisé est le krigeage ponctuel. Le variogramme modélisé est utilisé pour cela. La distance de validation du variogramme et le nombre de voisin pris en compte sont fixés par l'opérateur. Cette opération réalisée, nous sommes passé au traçage des cartes krigées. Elles sont imprimées par une copie d'écran. Deux types de cartes sont reproduites dans ce travail : l'une avec des trames, l'autre avec des courbes d'isovaleurs. A signaler que cette dernière est plus réduite. En se basant sur ces cartes (Fig. I-55 et Fig. I-56), nous pouvons répartir les sols de ce périmètre en trois grands groupes :

- * sol peu profond : la profondeur des accumulations est inférieure à 60 cm, ces sols sont faiblement représentés (deux noyaux).
- * sol moyennement profond : la profondeur des accumulations est située entre 60 et 100 cm .
- * sol profond : le niveau des accumulations est supérieur à 1 m.

Ces deux derniers groupes sont les plus fréquents dans le périmètre. Cette représentation cartographique fait donc apparaître trois grandes zones assez homogènes qui seront prises en compte lors de la généralisation des résultats de la simulation et qui limiteront le nombre de points à simuler à trois, choisis en fonction de cette analyse de la variabilité spatiale du niveau des accumulations calcaires.

IV-2.3.2. Données de perméabilité

A. Méthode

Pour pouvoir étendre au domaine spatial les résultats de la simulation, nous avons pensé utiliser, à côté des données pédologiques, des mesures de perméabilité par la méthode PORCHET, dont on sait qu'elle est rapide, facile d'emploi et peu consommatrice d'eau.

B. Analyse géostatistique appliquée aux données de perméabilité

a) Présentation des données

Les mesures PORCHET ont été réalisées sur l'ensemble du périmètre. Il s'agit de 37 points (Tableau I-34), répartis d'une façon lâche, tantôt resserrés (Fig. I-57). On se trouve dans le cas très usuel où l'échantillonnage n'est ni aléatoire, ni régulier.

Fig. I-57 .Plan d'échantillonnage-Paramètre perméabilité PORCHET

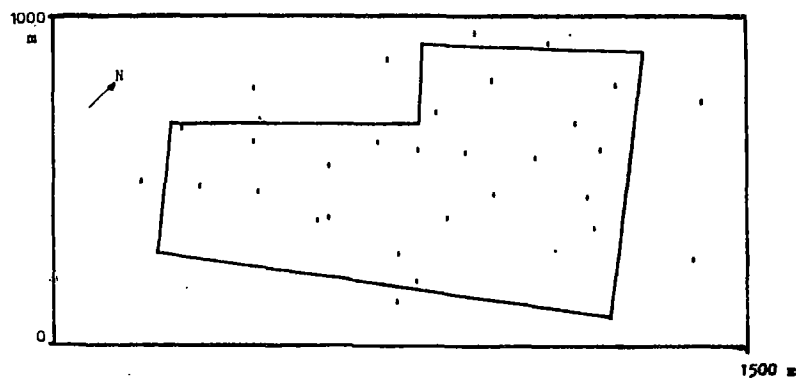


Fig.I-55.Carte krigée-Paramètre calcaire

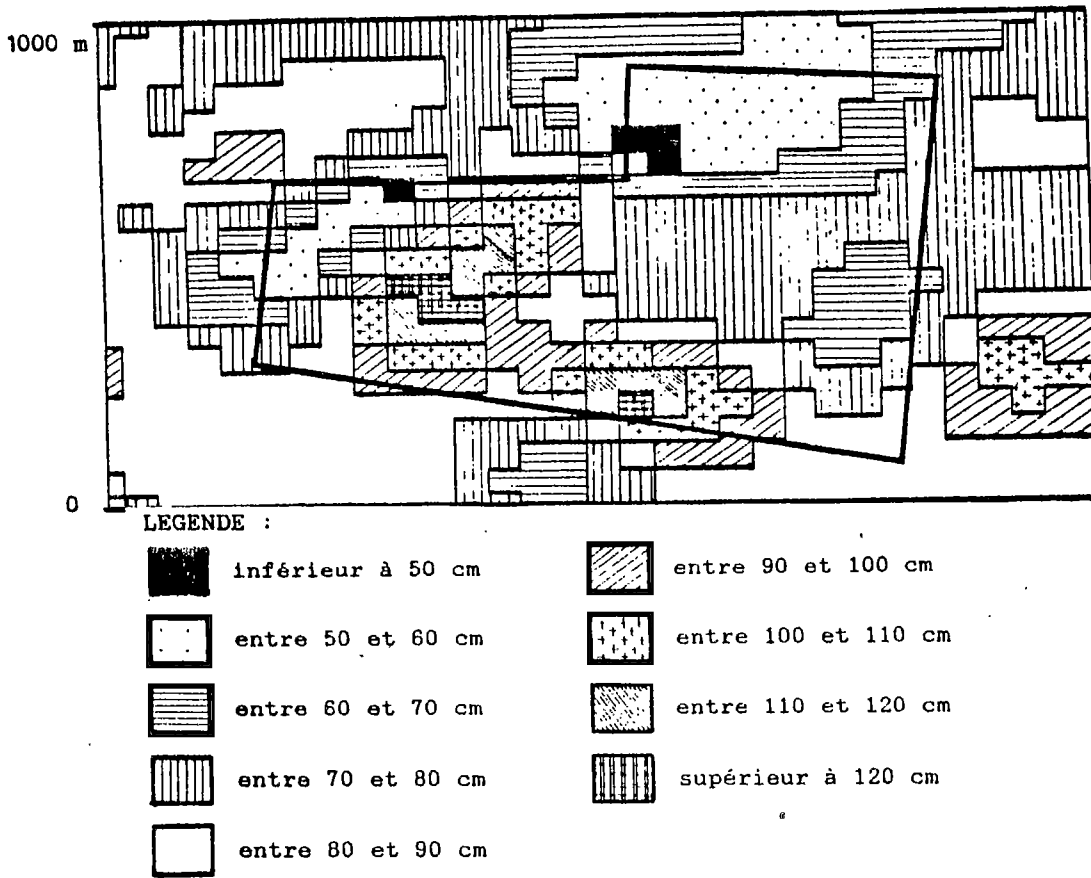


Fig.I-56.Paramètre calcaire-Courbes d'isovaleurs(en cm)

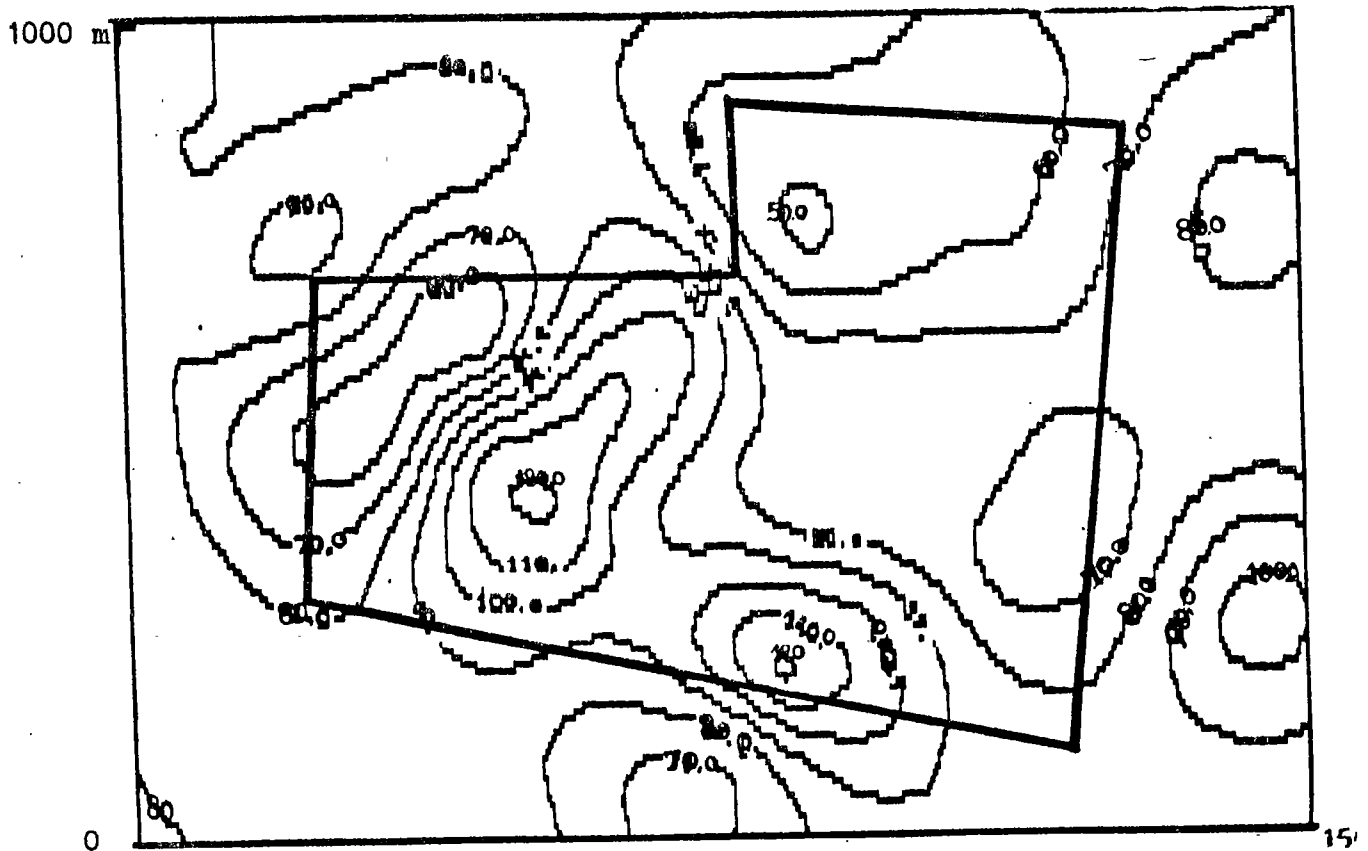


Tableau I-34 Coordonnées des mesures de perméabilité.

Coordonnées		Mesures de perméabilité PORCHET	
X(m)	Y(m)	20 cm(E-3 cm/s)	60 cm(E-4 cm/s)
1002	790	4.086	1.860
1074	912	3.770	1.050
680	770	0.154	1.540
852	772	5.540	1.970
1024	662	3.382	1.540
700	632	0.495	1.060
870	652	0.727	7.270
1128	552	9.195	0.810
960	526	5.850	2.230
690	516	0.186	1.860
882	526	2.990	1.080
1128	386	5.303	2.990
982	374	3.080	0.460
730	386	0.197	1.970
896	390	1.240	12.400
1146	266	0.285	2.850
998	242	2.010	0.630
742	224	0.146	1.460
912	254	5.950	0.730
1168	122	0.657	1.030
1020	120	3.390	4.350
752	126	0.901	0.680
926	128	2.190	1.600
646	494	10.350	1.810
440	466	3.520	1.220
662	368	0.759	7.590
592	354	5.990	2.400
672	240	3.426	0.550
504	214	8.800	5.630
700	130	0.090	0.900
516	114	8.190	1.170
354	506	0.633	6.330
360	334	6.800	5.960
372	84	0.206	2.060
226	450	0.645	6.450
242	244	3.398	4.170
242	116	0.147	1.470

Grâce à un programme sur microordinateur SHARP, J.VIEILLEFON (1985), en s'appuyant sur les travaux de COLOMBANI et al(1972), procède à un traitement automatique des mesures de perméabilité des sols par la méthode PORCHET d'infiltration horizontale à partir d'un trou plein d'eau, et obtient des perméabilités correspondantes aux différentes couches et qui sont significativement différentes. Par ailleurs, l'analyse ne peut porter que sur une seule variable Z. De ce fait, on a adapté les résultats de sorte qu'on peut procéder à l'analyse de toutes les perméabilités à une profondeur 20 cm, puis à une profondeur 60 cm.

Tableau I-35 Valeur des paramètres statistiques de la perméabilité PORCHET des niveaux 20 cm (P.20) et 60 cm (P.60).

données/profondeur	P.20	P.60	
nombre de données	37	37	36
valeur minimale en cm /s	0.900E-4	4.6E-5	4.6E-5
valeur maximale en cm /s	0.104E-1	12.4E-4	7.59E-4
moyenne en cm /s	0.310E-2	2.73E-4	2.46E-4
écart-type	0.291E-2	2.57E-4	2.03E-4
coeff.de variation en %	93.6	94.1	82.9

Le C.V est de l'ordre de 94 % ,ce qui correspond à une forte variabilité (Tableau I-35) .Par ailleurs ,d'après les synthèses bibliographiques,dans le cas des variables du transfert de l'eau dits "dynamiques",le C.V est généralement supérieur à 50%.

Les figures I-58 a et I-58 b représentant les histogrammes des deux populations distinguées,permet de faire les remarques suivantes :

- la perméabilité des sols est plus grandes à 20 cm qu'à 60 cm :

* pour 20 cm,les valeurs de perméabilités sont comprises entre 0.9E-4 et 1.04E-2 cm/s.

* à 60 cm, elles sont localisées entre 0.46E-4 et 0.124E-2 cm/s .

- à 20 cm,les valeurs observées sont relativement groupées: 48.6% entre 0.7E-3 et 1E-3 cm/s.

- à 60 cm,75.7 % des données sont situées entre 0.04E-3 et 0.3E-3 cm/s,dont 43.3 % entre 0.1 et 0.2 E-3 cm/s seulement.Seule la valeur 0.124E-2 s'éloigne des autres ,on testera donc son influence sur le variogramme.

b) Structure des données de perméabilité

-Perméabilité à 20 cm - P.20 :

Le variogramme (Fig I-59) apparaît très "chahuté".Le palier ,variance de la population est de 8.46 E-6.La perméabilité n'apparaît pas structurée,il n'y a pas de corrélation entre les mesures.Cela est dû entre autre au nombre faible d'échantillons collectés.Il faut plus de 100 mesures pour caractériser les propriétés hydriques de variabilité forte.Il n'y a pas de portée évidente.Le seul modèle que l'on puisse ajuster est un modèle aléatoire pur.Toutefois,il est nécessaire de passer à la modélisation du variogramme pour pouvoir faire le krigeage .Nous avons pris une portée égale à 250 m,et ajusté au variogramme moyen un modèle sphérique + linéaire (Fig. I-60):

$$\gamma(h) = -4.632E-9*h + 1.109E-5*(1.5*h/250 - 0.5*(h/250)^3)$$

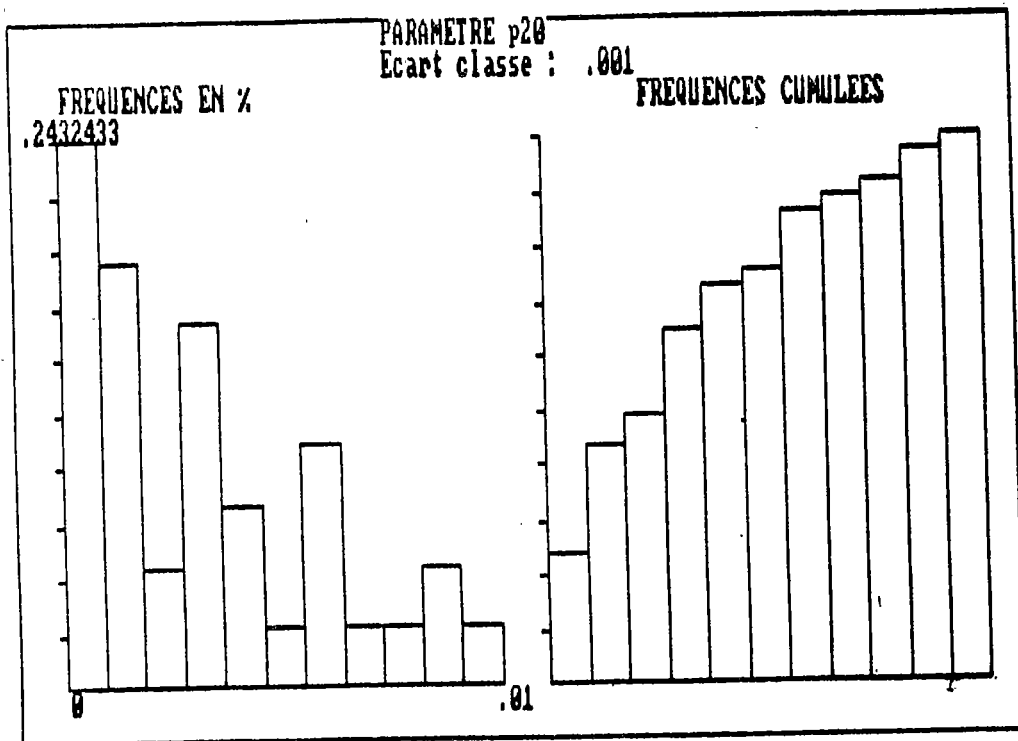


Fig.I-58.a.Perméabilité à 20 cm
Fréquences et fréquences cumulées

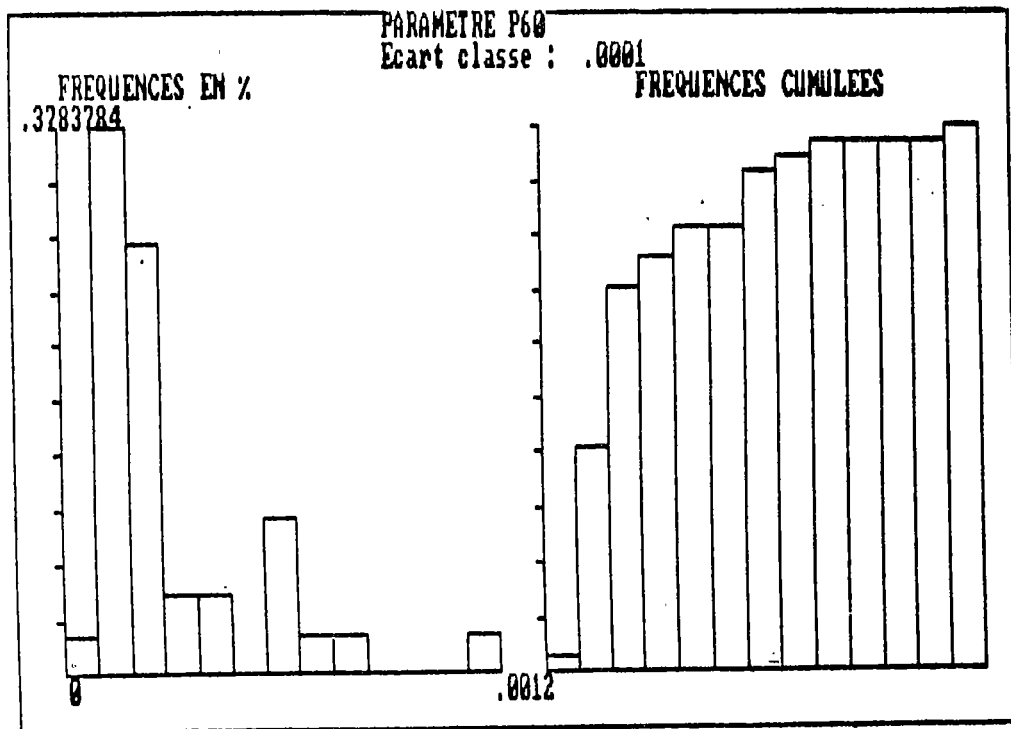


Fig.I-58.b.Perméabilité à 60 cm
Fréquences et fréquences cumulées

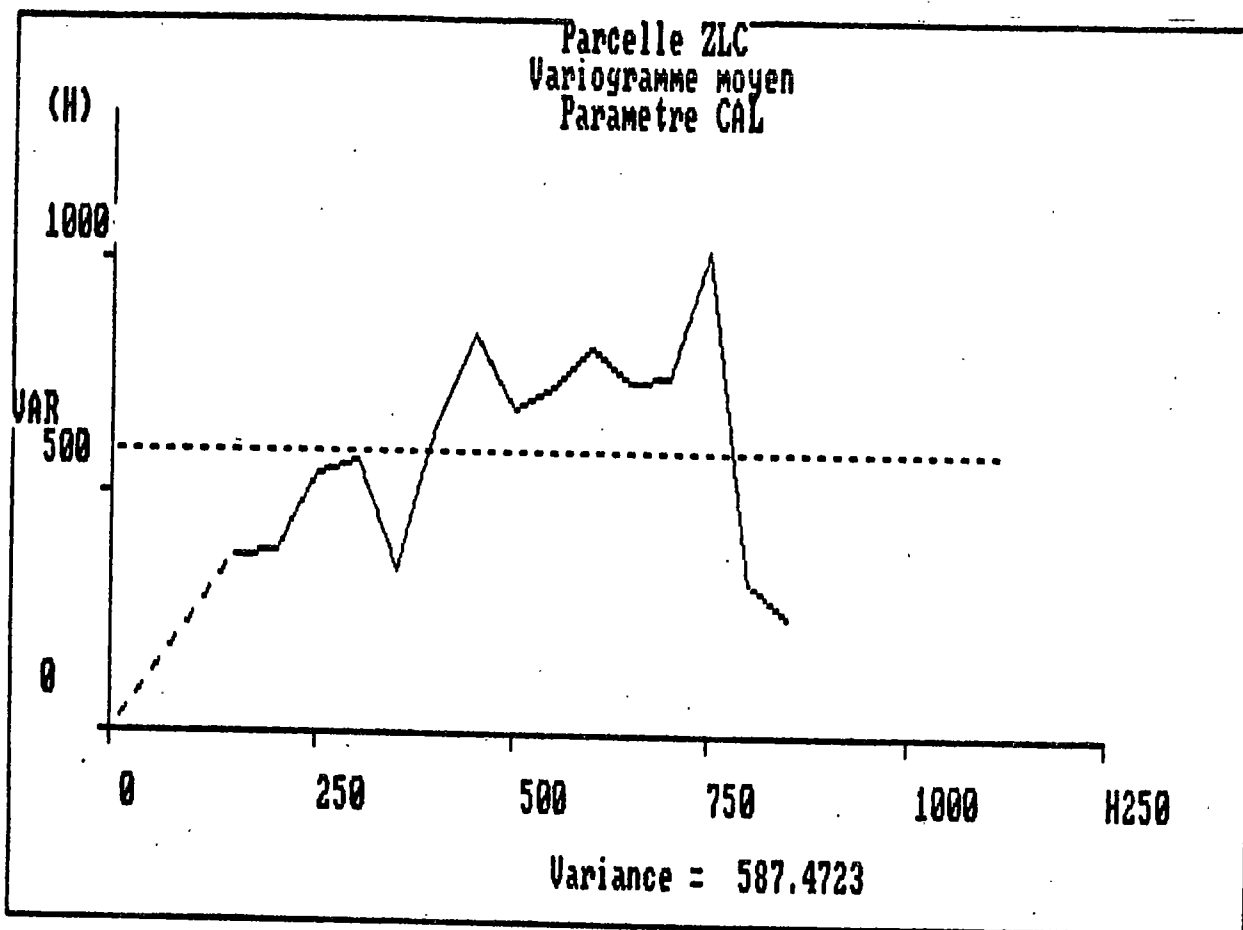


Fig.I-59. Perméabilité à 20 cm - Variogramme moyen

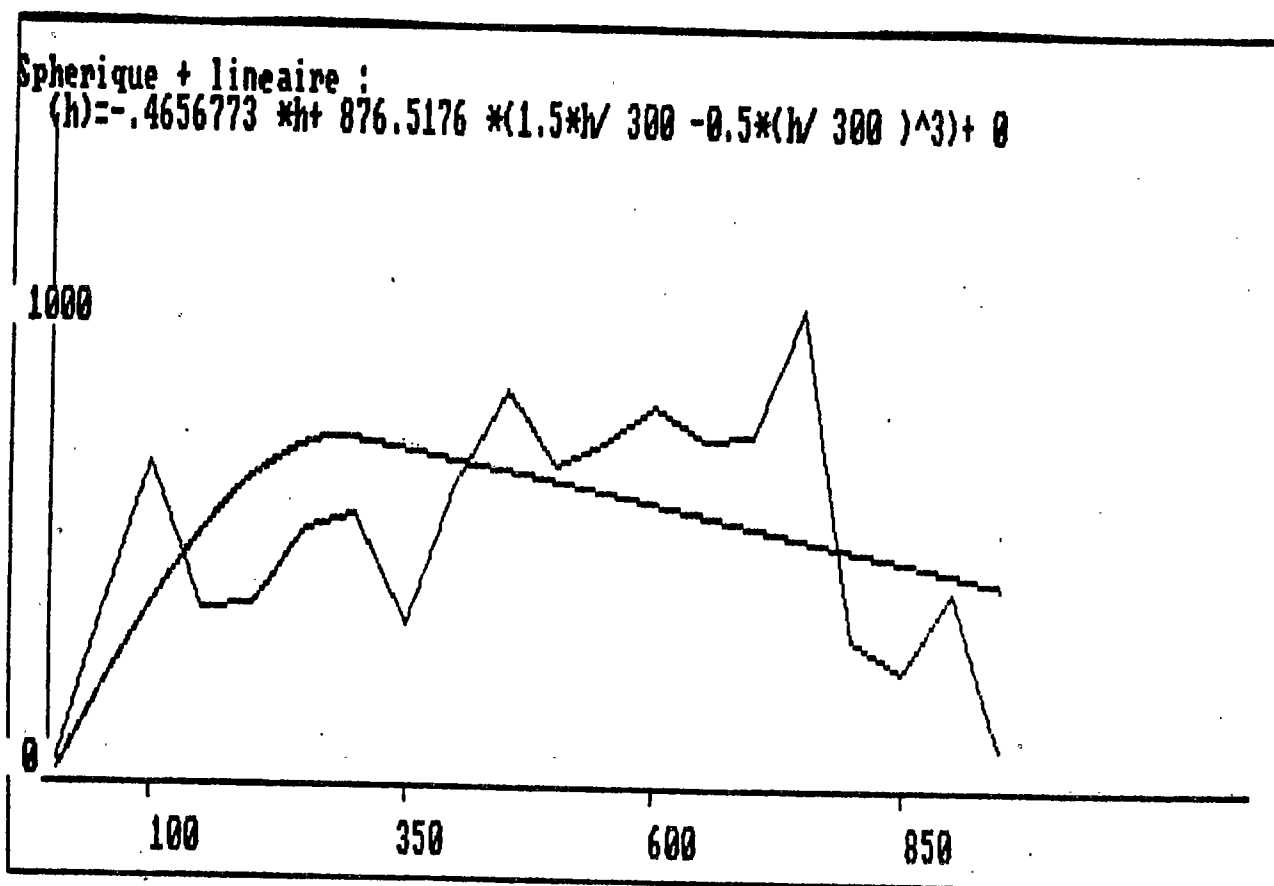


Fig.I-60. Perméabilité à 20 cm - Modélisation du variogramme moyen

-Perméabilité à 60 cm - P.60 :

Là aussi, le variogramme apparaît "chahuté" (Fig. I-61). Par ailleurs, l'élimination d'une seule mesure qui s'écarte des autres, ($1.24E-3$), (voir histogramme), a entraîné une amélioration nette de l'allure du variogramme (Fig I-62). Ce dernier possède alors une portée de 150 m (130 m avec GAMMA) pour une variance égale à $4.14E-8$. La perméabilité apparaît alors structurée, assez stationnaire sur l'ensemble du périmètre, même avec ce nombre limité de mesures. D'ailleurs, le C.V est nettement amélioré par l'élimination d'une seule mesure: 82.9% seulement au lieu de 94.1%. Nous avons ajusté à ce variogramme un modèle sphérique (Fig. I-63): $\gamma(h) = 4.145E-8 * (1.5 * h / 150) - 0.5 * (h / 150)^3$

Nous déduisons donc que :

* la perméabilité du sol par la méthode PORCHET n'est pas structurée à 20 cm .

* elle est structurée à 60 cm , la portée de la mesure faite en un point s'étend à 150 m .

c) Krigeage

-Perméabilité à 20 cm : Les niveaux choisis sont: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 7 et $9E-3$ cm/s. La carte krigée présente un brassage des courbes de perméabilités différentes (Fig. I-64 et Fig. I-65). Les sols les plus perméables se situent au centre du périmètre, là où les accumulations calcaires apparaissent plus en profondeur. Parallèlement, les sols de perméabilité faible se localisent dans les zones où ces accumulations sont plus proches de la surface du sol.

-Perméabilité à 60 cm : Les niveaux choisis sont : 1.6, 2, 2.4, 2.8, 3.2, 3.6, 4 et $4.4 E-4$ cm/s. Ainsi les valeurs de perméabilité observées sont assez rapprochées les unes aux autres. La majorité des sols se trouvent dans la gamme 2 à $3.6 E-4$ cm/s (Fig. I-66 et Fig. I-67). Les sols les moins perméables se situent au Nord-Est et ceux les plus perméables au Sud-Ouest. La délimitation des zones est bien nette. Il ne semble pas y avoir de relation entre la perméabilité des sols et le niveau d'apparition des amas calcaire.

En superposant les cartes krigées de la perméabilité à 20 et 60 cm (Fig. I-68), nous pouvons déduire grosso-modo que la perméabilité du sol est :

- relativement forte en surface et en profondeur dans le centre du périmètre.
- forte en surface et faible en profondeur dans le Nord .
- faible en surface et en profondeur dans le Sud .

Fig.I-61. Perméabilité à 60 cm - Variogramme moyen

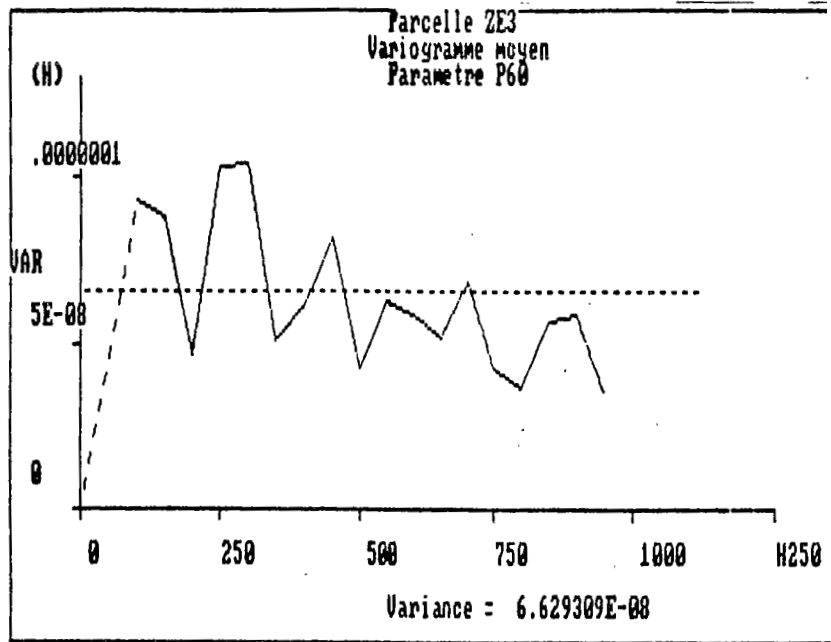


Fig.I-62. Perméabilité à 60 cm - Variogramme moyen après suppression d'un seul point

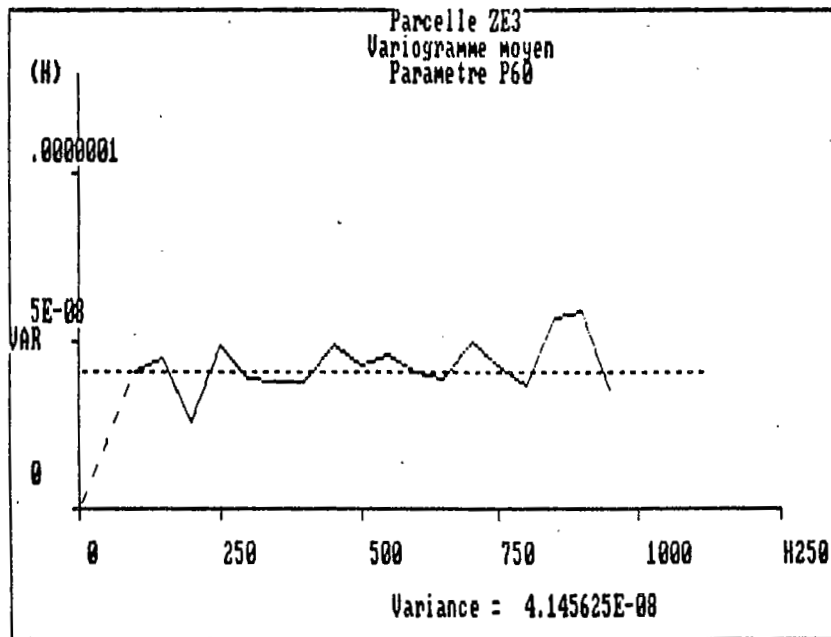
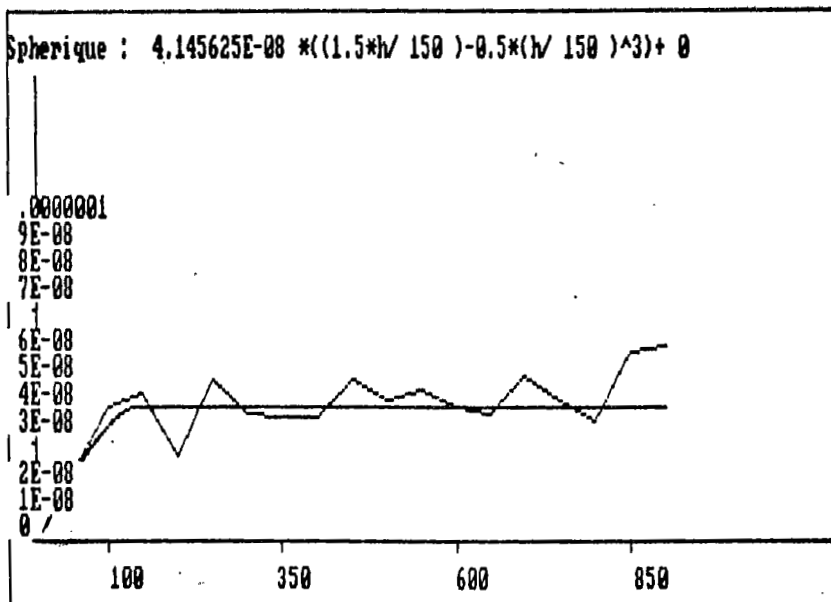
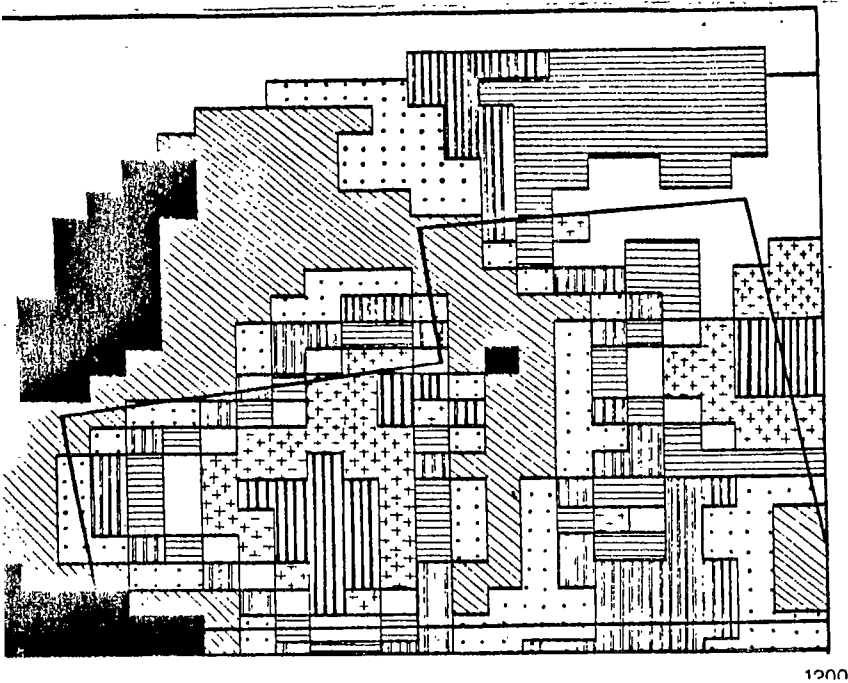









Fig.I-63. Perméabilité à 60 cm - Modélisation du variogramme moyen





LEGENDE :

- | | | | |
|---|-------------------------|---|------------------------|
|  | inférieur à $1E-3$ cm/s |  | entre 4 et $5E-3$ cm/s |
|  | entre 1 et $2E-3$ cm/s |  | entre 5 et $7E-3$ cm/s |
|  | entre 2 et $3E-3$ cm/s |  | entre 7 et $9E-3$ cm/s |
|  | entre 3 et $4E-3$ cm/s | | |

1200

Fig. I-64. Carte krigée-Perméabilité à 20 cm

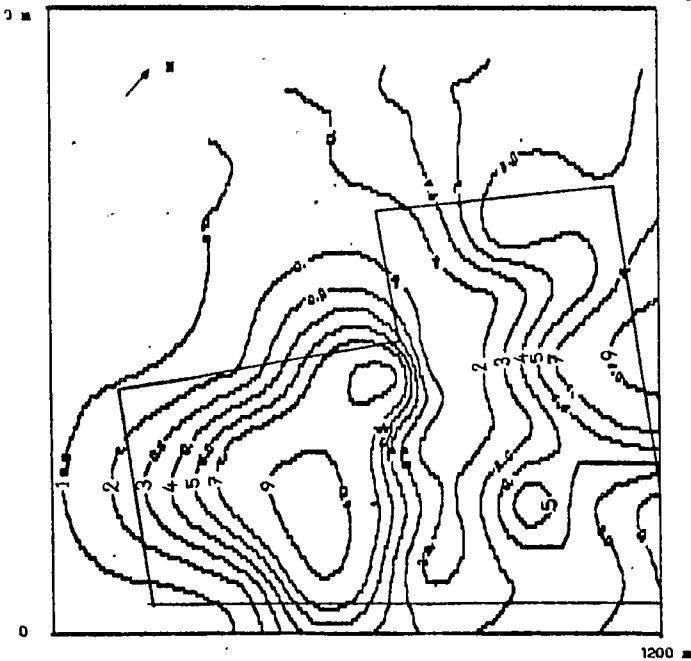
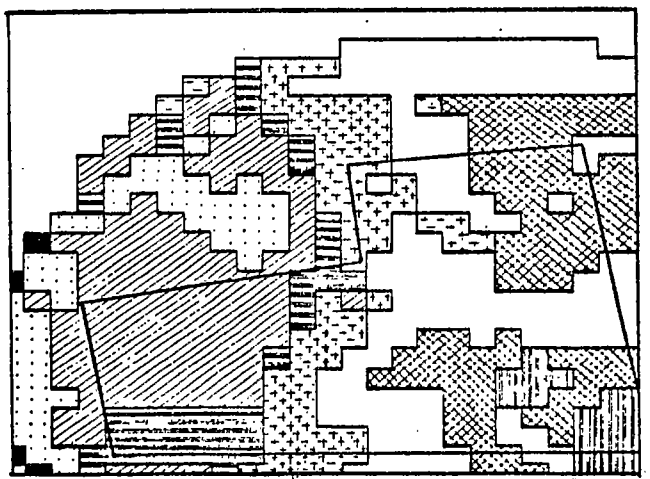









Fig. I-65. Perméabilité à 20 cm -
Courbes d'isovaleurs ($\times E-3$ cm/s)

1000 m



LEGENDE :

- | | | | |
|---|----------------------------|---|----------------------------|
|  | inférieur à $1.6E-4$ cm/s |  | entre 2.8 et $3.2E-4$ cm/s |
|  | entre 1.8 et $2E-4$ cm/s |  | entre 3.2 et $3.6E-4$ cm/s |
|  | entre 2 et $2.4E-4$ cm/s |  | entre 3.6 et $4E-4$ cm/s |
|  | entre 2.4 et $2.8E-4$ cm/s | | |

1200

Fig. I-66. Carte krigée
Perméabilité à 60 cm

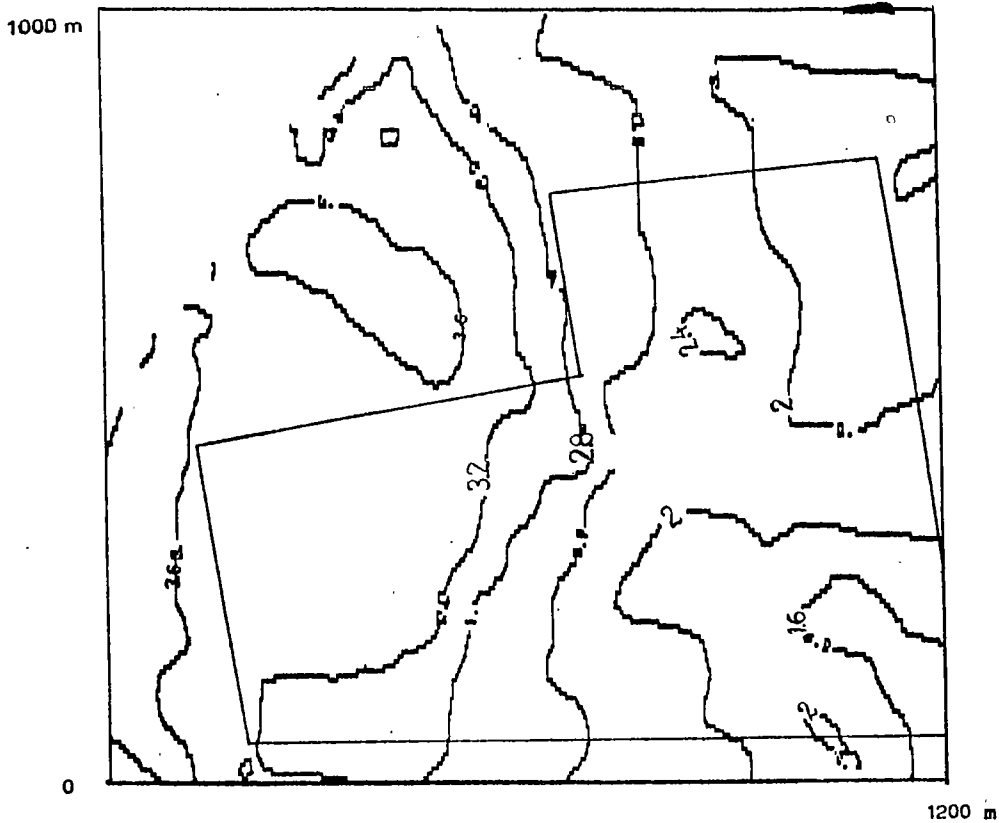


Fig.I-67. Perméabilité à 60 cm - Courbes d'isovaleurs ($\times 10^{-4}$ cm/s)

--- courbes d'isovaleurs à 20 cm .
 +++ courbes d'isovaleurs à 60 cm .

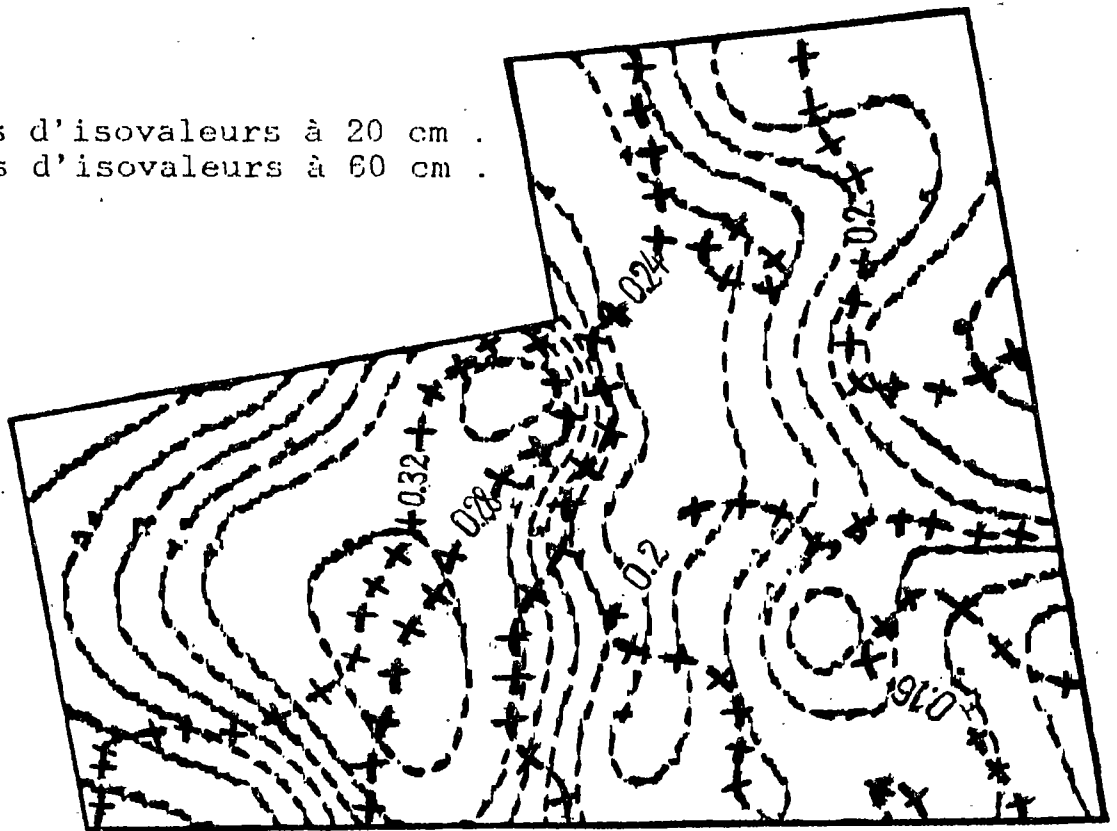


Fig.I-68. Superposition de cartes de perméabilité à 20 et 60 cm

IV-3. Essai de simulation spatiale

Le titre est un peu ambitieux, car nous nous sommes limités, à l'aide de trois expériences simplifiées complémentaires à la vérification des tendances de variation des paramètres hydro-dynamiques.

IV-3.1. Essais de simulation ponctuelle sur quelques contrôles

Trois parcelles du périmètre, cultivées en coton pendant l'été 1987, ont été sélectionnées pour supporter une expérimentation simple:

- détermination de profils moyens d'humidité et de salure précédant une irrigation normale,
- détermination identique de profils après irrigation et avant l'irrigation suivante, avec contrôle simple des apports.

Ces essais ont concerné les parcelles n° 3, 8 et 18 (Fig. I-69), sur lesquelles les apports ont été respectivement de 3.7, 3.45 et 3.3 cm d'eau d'irrigation. On notera que ces apports sont inférieurs de moitié au moins à ce qui a été réalisé sur la luzerne de la station principale. Les irrigations ont d'ailleurs toujours été plus faibles sur les parcelles paysannes du périmètre. On verra que cela a entraîné une moindre salinisation en profondeur.

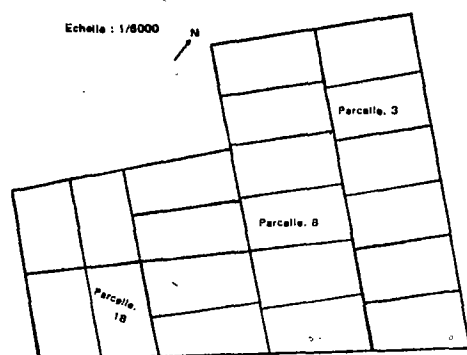
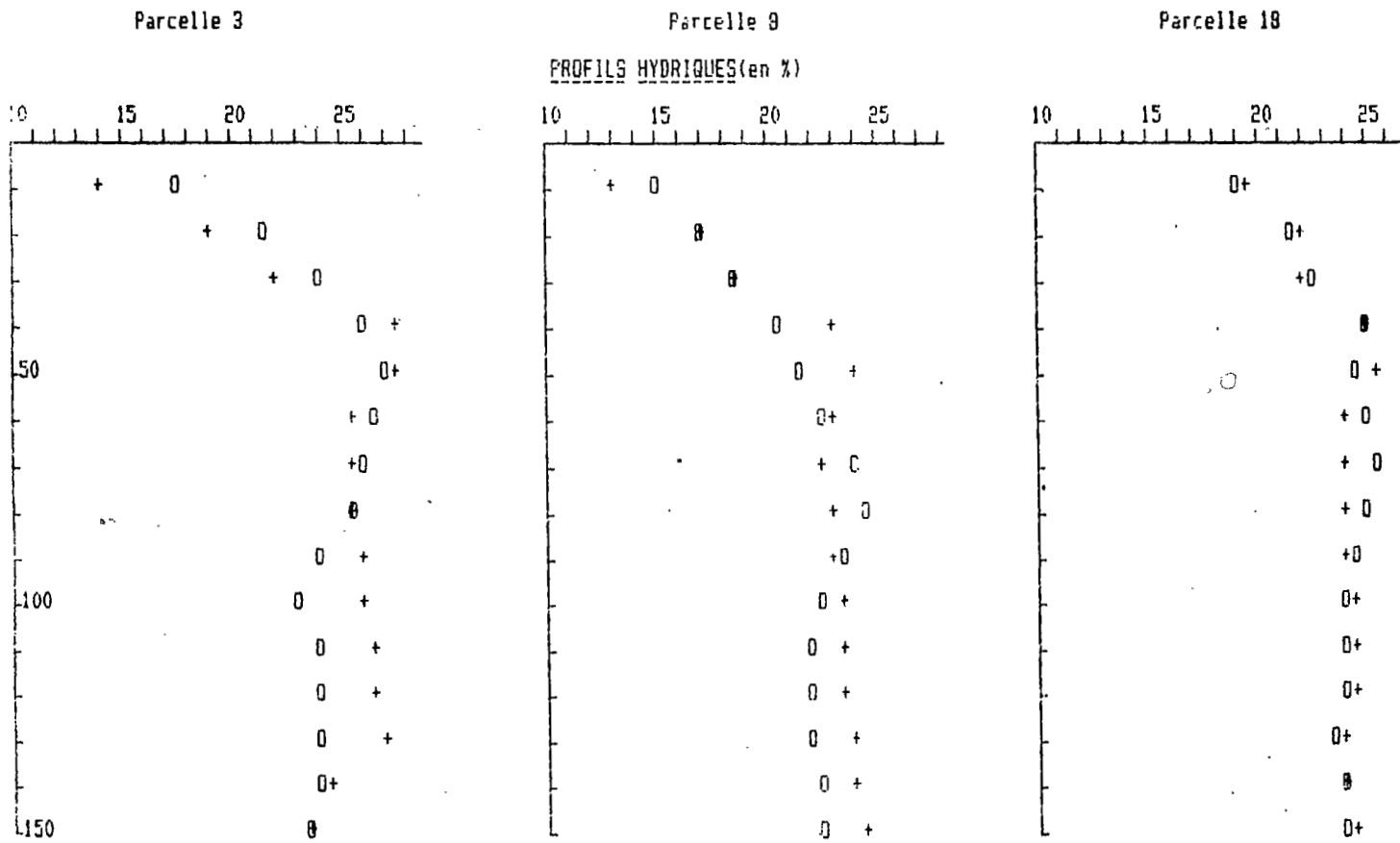


Fig. I-69. Localisation des parcelles utilisées dans la simulation spatiale

Les résultats obtenus, pour des simulations respectives de 11, 12 et 7 jours, sont illustrés par la figure I-70 qui montre, pour les 3 parcelles, une restitution correcte des profils tant salins qu'hydriques. Ceci a été très rapidement obtenu par de simples modifications des paramètres hydrodynamiques A de la relation $K(\theta)$ obtenus sur la station principale. On trouvera ci-dessous (Tableau I-36) les modifications opérées.

Tableau I-36 Paramètres hydrodynamiques modifiés

Parcelle	P3	P8	P18
A(1)	*20/26	id	id
A(2)	id	*30	*20
A(3)	*2	*22,5	*20



PROFILS DE CONDUCTIVITE (mmhos dans solution du sol)

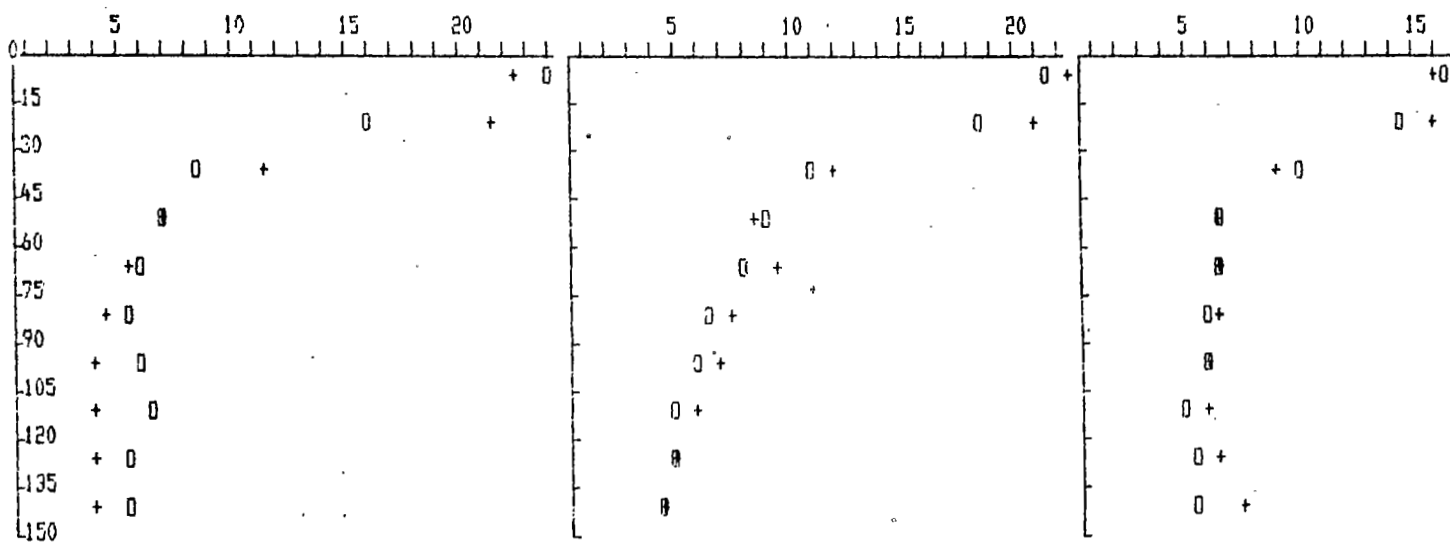


Fig. I-70. Résultats des simulations complémentaires(+:simulé;0:contrôlé)

Il n'a pas été nécessaire de modifier les limites de profondeur des horizons. On remarquera cependant que pour la parcelle 18 par exemple, la prise en compte de coefficients très voisins dans les horizons 2 et 3 implique une suppression de la limite à 60 cm, qui, dans la station principale, représentait la limite supérieure de l'horizon à accumulation calcaire, qui est notablement plus profond dans la parcelle 18.

Sur le plan de la salure, si les segments de sol compris entre 0 et 30 cm montrent une conductivité comparable à ce qui est observable sur la station principale, on remarque que les segments plus profonds sont nettement moins salés, avec des profils qui rappellent ceux de la station principale en début de culture.

IV-3.2. Utilisation des paramètres géostatistiques pour l'extrapolation de la simulation de la parcelle principale

En appliquant la théorie des variables aléatoires régionalisées aux mesures de la profondeur du niveau d'accumulation calcaire et de la perméabilité PORCHET, nous avons retenu grossièrement trois unités:

- au Nord du périmètre, sol moyennement profond et perméabilité moyenne.
- au Centre, sol profond et perméabilité assez forte.
- au Sud, sol peu profond et perméabilité faible.

Ces différences pourraient induire un comportement hydrodynamique différent dans chaque unité distinguée.

La simulation effectuée pour la station principale serait étendue à l'ensemble des sols situés au Nord du périmètre. L'extrapolation aux restes des sols est possible avec un léger ajustement des paramètres hydrodynamiques et des limites des horizons.

Dans notre cas, l'étude géostatistique et la simulation spatiale étant réalisées simultanément, il ne nous était pas possible d'orienter le choix des parcelles en fonction de la variabilité spatiale des caractères étudiés. Certes, ce choix a été guidé par les observations pédologiques préalablement faites. Ainsi, nous n'avons pas réellement utilisé les paramètres géostatistiques pour l'extrapolation spatiale de la simulation. Cela ne diminue en rien cette procédure, car il nous a conduit à comparer les deux approches.

IV-3.3. Comparaison des deux approches

Tout d'abord, l'étude de la variabilité spatiale de paramètres pédo-hydrodynamiques a fait apparaître trois grandes unités. Or, les sites de contrôle situés dans les parcelles : 3, 8 et 18 peuvent être considérés représentatifs de ces trois unités, car ces parcelles reflètent les sols rencontrés sur le périmètre. Par ailleurs, les essais de simulation ponctuelle sur ces sites de contrôle, ont été réalisés rapidement par de simples modifications des paramètres hydrodynamiques A de la relation $K(\theta)$ obtenus sur la station principale, la restitution des profils hydriques et salins a été correcte.

De ce fait, il en résulte, pour cet essai et aux incertitudes près, que la simulation ponctuelle de la station d'essai est extrapolable sur tout le périmètre.

CONCLUSION

C'est pour répondre à un besoin de suivi, de contrôle et de prévision de la salure des sols irrigués, et dans l'objectif de la recherche d'une méthodologie appropriée, capable de prédire le sens de l'évolution de ces sols, que nous avons réalisé cette étude.

Les travaux entrepris sur des périmètres irrigués situés dans des régions bioclimatiquement différentes de Tunisie permettent de tirer un certain nombre d'enseignements quant à l'utilisation et la pratique de la simulation de l'évolution de la salure des sols. Il s'avère ainsi, que le bon choix du site d'essai est un facteur important pour la réussite d'une simulation représentative des sols. D'autre part, la conduite des essais nécessite des observations continues et précises pour caler et valider le modèle, avant de l'exécuter pour simuler une année agricole. Un meilleur ajustage des paramètres hydrodynamiques est réalisable. Pour ce faire, des prélèvements périodiques permettent de rectifier avantagement ces paramètres. Ceci est d'autant plus nécessaire, que le sol initialement soumis à un régime hydrique aride, se trouve après l'amorçage des irrigations, dans une phase transitoire de déséquilibre et de réorganisation de son espace poral.

Par ailleurs, comme la simulation n'est que ponctuelle, nous avons employé des méthodes géostatistiques par l'étude de la variabilité spatiale de certaines caractéristiques pédologiques et hydrodynamiques du périmètre concerné. Une telle approche permet une certaine "simulation spatiale", réalisable avec seulement une légère modification des paramètres hydrodynamiques déterminés pour le site principal. Ainsi, une extrapolation des résultats de la simulation initialement effectuée pour la station principale est envisageable.

En ce qui concerne le périmètre de Zelba, le calage a été réalisé sans problèmes majeurs. La reproduction des profils hydriques a été parfaite. Certaines défaillances du modèle persistent encore, empêchant ainsi une bonne reproductibilité du profil salin. En somme, aussi bien les résultats des simulations, que les observations faites à Zelba, montrent clairement une augmentation nette de la salure du sol. Quelques corrections, soit par des irrigations complémentaires, soit par la prolongation de ces irrigations en hiver, ont été théoriquement envisagées et simulées. Il semble que des irrigations périodiques en hiver sont plus efficaces, et de ce fait sont à recommander chez les irrigants.

Quant aux travaux similaires entrepris en parallèle à Souk Sebt, ils ne sont pas encore achevés. Nous n'avons pu que caractériser le site et suivre les irrigations et la culture de la luzerne, mais la simulation reste à réaliser. Même les observations concernant l'évolution de la salure et de l'alcalinité des sols de ce périmètre sont si ponctuelles qu'il serait téméraire et imprudent de les généraliser pour des sols aussi hétérogènes de ce périmètre.

Enfin, nous pensons que la répétition de telles études permettra d'acquiescer un "catalogue" des comportements prévisibles de sols irrigués, et une méthode de suivi applicable très généralement.

INTRODUCTION

La Tunisie vient de s'offrir un plan de traitement des eaux usées des grandes agglomérations, et elle a commencé à réaliser des stations d'épuration de ces eaux. Ainsi d'importants volumes d'eau traitée sont disponibles. Il est normal que dans un pays qui manque d'eau, on s'oriente vers l'utilisation de ces eaux en agriculture. Mais il se trouve que la qualité de ces dernières est généralement médiocre et leur emploi en irrigation comporte des risques divers.

Dans cette 2ème partie du projet, l'équipe des chercheurs a entrepris une série d'expérimentations pour tenter de répondre aux questions suivantes:

1/ L'eau usée traitée biologiquement, peut-elle être utilisée pour dessaler, cultiver et récupérer un sol salé, auparavant inculte?

2/ Quelle est la productivité de l'eau usée utilisée dans l'irrigation d'une culture de cotonnier sur 3 types de sols dans des cases lysimétriques, en comparaison avec une eau de meilleure qualité?

3/ Quels sont les risques encourus par l'utilisation de l'eau usée traitée en irrigation (risques d'accumulation d'azote minéral, de pollution du sol par les microorganismes pathogènes, et risque de colmatage du sol et d'instauration d'anaérobiose).

Pour élaborer des réponses à ces questions, l'équipe des chercheurs a adopté une démarche pragmatique qui consiste à recourir, à différentes échelles d'expérimentation: le laboratoire, les cases lysimétriques et le terrain.

Au démarrage de l'action, des essais préliminaires au laboratoire et sur le terrain nous ont permis de faire tourner l'équipe en attendant la mise en place des équipements dans les cases lysimétriques et sur le terrain.

Ensuite, dans deux régions différentes (Kairouan et Tunis) deux expérimentations ayant des objectifs différents ont été conduites parallèlement: l'une près de Kairouan, sur un sol salé en place, avait pour but d'étudier l'effet de l'eau usée sur le sol salé et sur la culture du cotonnier. L'autre à Tunis, dans 3 types de sols en cases lysimétriques, s'était proposée de suivre l'évolution des 3 sols et du cotonnier.

Dans ce qui suit nous présenterons ces expérimentations dans l'ordre suivant:

DEUXIEME PARTIE

UTILISATION DE L'EAU USEE POUR LA
RECUPERATION DES SOLS SALES

Recherches et expérimentations préliminaires au champ:

- Etude d'un modèle de dessalage naturel d'un sol de lunette argileuse par les eaux pluviales dans la région de Tunis.
- Etude préliminaire au champ de l'effet d'une pré-irrigation à l'eau usée d'un sol salé sur sa salinité

Expérimentation préliminaire de laboratoire:

- Essai de percolation sur le sol remanié de Kairouan à l'aide de l'eau usée enrichie en chlorure de calcium.
- Etude de l'effet de l'eau usée sur l'activité biologique du sol.

Etude au champ de l'effet de l'eau usée sur une culture de cotonnier sur sol salé, en comparaison avec une eau non usée de salinité comparable.

Expérimentation sur le dessalage du sol de Kairouan reconstitué en case lysimétrique.

Expérimentation sur l'utilisation de l'eau usée traitée en irrigation de trois types de sols en case lysimétrique.

I- RECHERCHES PRELIMINAIRES DE TERRAIN

I-1. Etude d'un modèle de dessalage naturel d'un sol de "lunette" argileuse par les eaux pluviales dans la région de Tunis

1-1. Introduction

Les matériaux des lunettes (ou bourrelets marginaux éoliens), originellement salés et sodiques, subissent depuis leur dépôt une évolution aussi bien chimique que physique, que plusieurs auteurs dont HILLS (1940), BOULAIN (1954), JAUZEIN (1967), PERTHUISOT & JAUZEIN (1975), COQUE (1979), BELKHODJA (1970), ont étudié dans différentes régions du monde. Cependant la plupart de ces auteurs n'ont pas prêté attention à l'évolution de l'organisation du matériau originel déposé sous forme de pseudosable.

Or cette organisation conditionne l'espace poral-structural qui commande la dynamique de l'eau et des solutions dans la masse du sol. Autrement dit, l'évolution chimique et physico-chimique (dessalinisation - désodisation) dans les conditions naturelles ou artificielles (bonification des terres salées) en dépend étroitement.

Dans cette étude, nous considérons les sols des lunettes comme un modèle d'étude de l'évolution naturelle des sols salsodiques et particulièrement de la réorganisation de leur matériau originel. Les résultats présentés ici portent surtout sur les aspects micromorphologiques de cette évolution.

1.2-Matériels et Méthodes

Les sols objet de cette étude sont ceux d'une relique de bourrelet éolien (Koudiat Mabtouha) faisant partie d'un système de lunettes bordant le sud-est de Garrat el Mabtouha située à 30 km au nord de Tunis. La pluviosité annuelle est de 450 mm et l'ETP de 1450 mm. Actuellement le sol est exploité en cultures assolées où le blé atteint des rendements de 30 quintaux à l'hectare.

Dans cette région, neuf profils creusés le long d'un transect de 1200 m de longueur, et répartis sur deux collines séparées d'une Sebkha ont été examinés. Par suite de la faible différenciation des horizons, les échantillons ont été prélevés arbitrairement tous les 20 cm jusqu'à 1 m de profondeur, et tous les 50 cm au-delà de ce niveau. Des lames minces en ont été taillées. Pour la description micromorphologique, la terminologie proposée par BULLOCK et al., (1985) a été utilisée.

1.3-Résultats

Caractères généraux des profils

Le sol étudié est classé selon la classification française comme sol peu évolué d'apport éolien à caractères salins. Il est de texture argilo-limoneuse en surface et argileuse en profondeur (Fig.II-1.A). Cette différence granulométrique semble résulter d'un appauvrissement des horizons superficiels en éléments fins. Le taux d'argile se stabilise au delà de 1 m de profondeur à des valeurs supérieures à 50 %. La fraction argileuse est constituée d'un mélange de plusieurs minéraux interstratifiés irréguliers (smectite - illite, smectite - vermiculite), d'illite, de chlorite et de kaolinite. La densité apparente de motte est plus élevée au sommet des profils où elle atteint la valeur de 2, que dans le matériau originel où elle n'est que de 1,75. Quant à la stabilité structurale estimée selon la méthode de HENIN, elle s'est avérée très faible à toutes les profondeurs, mais variant de $I_s = 2$ dans les horizons superficiels à $I_s = 30$ à 70 cm de profondeur. Cette grande variation est en liaison avec le taux de sodium échangeable qui augmente avec la profondeur. La capacité d'échange de cations atteint 25 meq/100 g de sol et la conductivité électrique, faible en surface (<1 mmho/cm) augmente lentement avec la profondeur. Le faciès géochimique des solutions du sol est carbonaté calcique et magnésien en surface, il devient chloruré sulfaté sodique en profondeur. Quant au complexe absorbant, il est saturé: en surface par 50 à 77 % de Ca^{++} , 6 à 15% de Na^+ , le Mg^{++} pour le reste; en profondeur par 37 % de Ca^{++} , 40 % de Na^+ et le reste par Mg^{++} . Ceci fait que le pourcentage de sodium échangeable passe de 6 en surface à 40 % dans le matériau originel. Latéralement, la dessalinisation est plus poussée et plus profonde lorsqu'on passe du sommet de la colline au bas de son piémont.

Le matériau originel très salé et très sodique a donc subi avec des intensités différentes deux processus d'évolution: (i) une dessalinisation par l'élimination quasi totale des chlorures et à un degré moindre des sulfates, (ii) une désodisation qui s'est traduite par un déplacement du sodium échangeable par le calcium, devenu dominant sur le complexe, après l'appauvrissement de la solution du sol en sodium. Mais cette désodisation du complexe a affecté une tranche de sol moins épaisse que celle touchée par la dessalinisation.

Organisation des sols de la lunette

*Organisation verticale macroscopique (Fig.II-1.B)

Quatre types de structures ont été observés dans les profils: l'horizon de surface présente une structure polyédrique moyenne subanguleuse, juxtaposée par endroit seulement à une structure grumeleuse: les horizons profonds présentent une structure prismatique grossière, tandis que le matériau originel de pseudosable, observable seulement dans certains profils

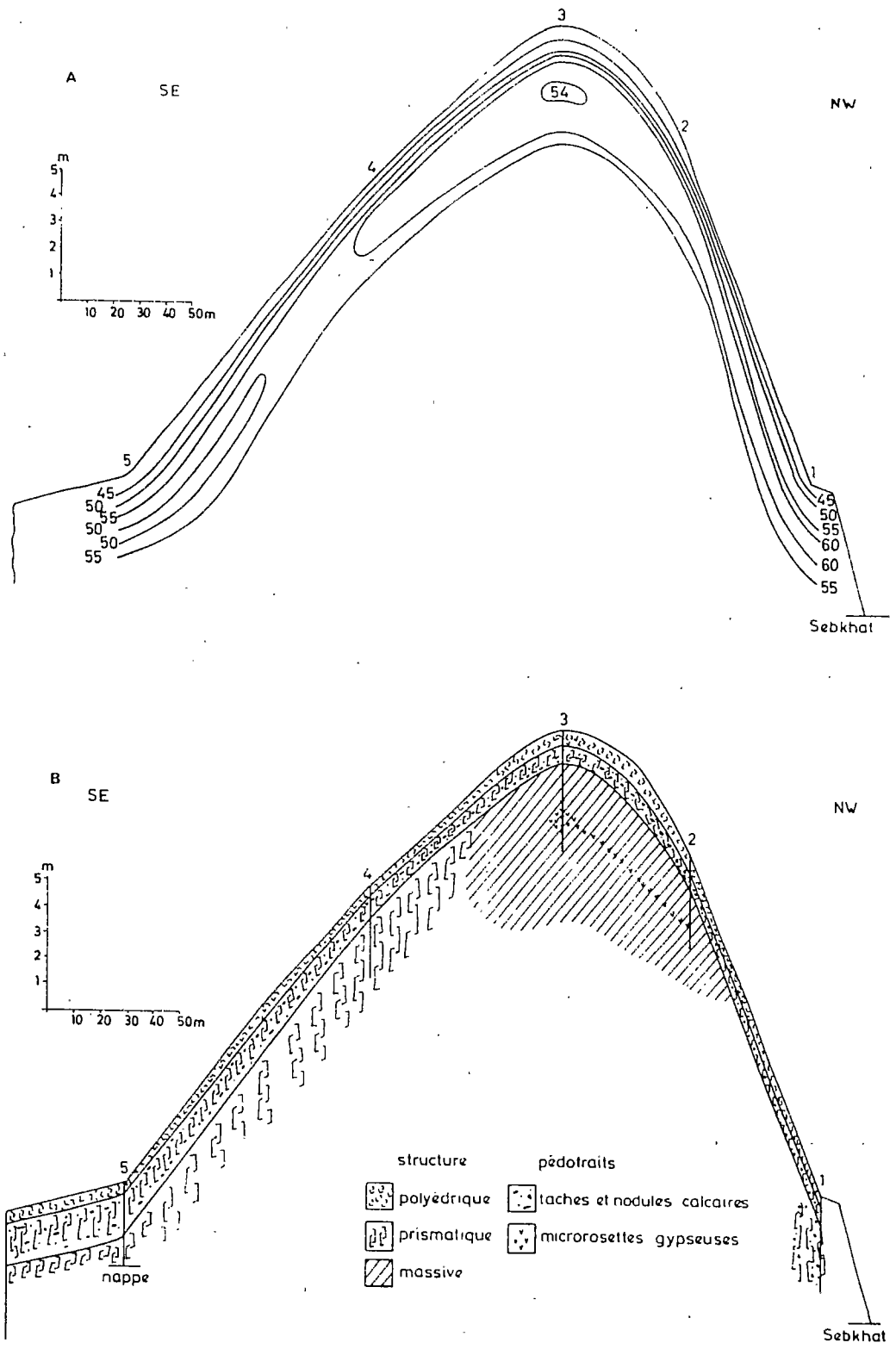


Fig.II-1. Coupe à travers la lunette A: courbes de la teneur en argile en % - B: distribution des macrostructures et pédotraits

(sommet de la colline) se présente à l'état massif. Les pédotraits rencontrés dans les différents sites sont : (i) des accumulations de calcaire sous forme de taches et nodules friables de taille centimétrique, assez fréquents dans les horizons moyens prismatiques, et absents dans le pseudosable massif, (ii) des accumulations gypseuses, sous forme de microrosettes très localisées dans le matériau de pseudosable à 2,8 m de profondeur au profil 3.

Remarquons alors que le front inférieur des accumulations calcaires s'enfonce progressivement lorsqu'on passe du profil 3 situé au sommet de la formation aux profils 4 et 5 situés à son piémont. Ce front reste cependant partout moins profond que celui du gypse.

*Organisation microscopique

L'organisation microscopique sera caractérisée ici par trois paramètres: la microstructure, la masse basale et les pédotraits microscopiques.

*La microstructure

A chaque type de macrostructure correspond un microarrangement, à la structure polyédrique correspond une microstructure cavitaire avec des fissures et des chenaux (0-20 cm) (Fig.II-2.1) ; à la structure prismatique correspond une microstructure essentiellement en chenaux avec quelques fissures et cavités (80-100 cm) (Fig.II-2.2); à la structure massive du pseudosable correspond une organisation élémentaire constituée d'agrégats subarrondis, avec des vides d'entassement et des cavités, donnant lieu à une microstructure grenue (Fig.II-2.3 et II-2.4).

*La masse basale

A toutes les profondeurs, les grains grossiers sont constitués de quartz, de calcite et de débris de coquille. La micromasse est constituée partout d'argile brune imprégnée par une calcite microcristalline. L'assemblage de biréfringence est cristallomorphe. La distribution relative g/f est porphyrique simple en surface et porphyrique à double espacement, voire ouverte en profondeur, (iii) les pédotraits suivants ont été observés:

Des microzones décarbonatées sont observables dans l'ensemble du profil, excepté dans le pseudosable. Ces zones sont souvent associées à un lit discontinu de grains subarrondis de calcite de néoformation, accolé généralement à la paroi supérieure des fissures (Fig.II- 2-5,-6,-7 et -8). De taille variable, ces zones peuvent atteindre 2 mm de longueur. Elles ont un assemblage de biréfringence en mosaïque et strié. Elles résulteraient d'une redistribution localisée de la calcite.

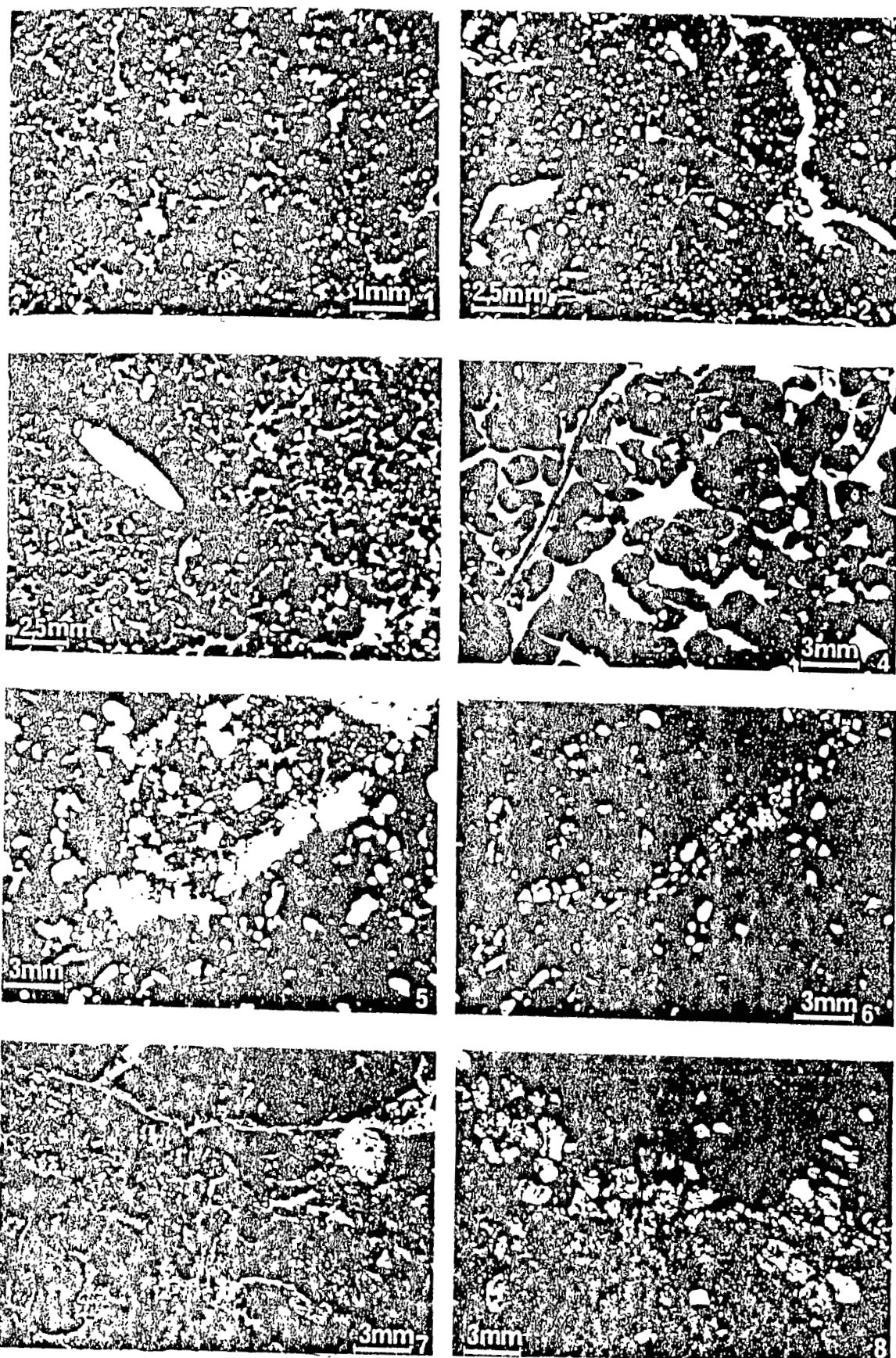


Fig. II-2. Organisations microscopiques

- 1: microstructure poreuse de l'horizon de surface. L.N.
- 2: microstructure plus compacte des horizons moyens. L.N.
- 3: microstructure grenue des pseudosables éoliens au fond du profil, partiellement perturbée par l'activité biologique. L.N.
- 4: détail des pseudosables : notez le fait que la composition des grains n'est pas uniforme et la position du fragment de coquillage.
- 5 et 6 : zone de décalcitisation (gris clair) avec accumulation de calcite de néoformation au contact avec la masse basale. L.N. et L.P.
- 7 et 8 : zone de décalcitisation (en haut) et grains de calcite de néoformation. L.N. et L.P.

Des nodules constitués de calcite microcristalline de couleur brun foncée sont présents dans tous les horizons, sauf dans le niveau à structure massive à microstructure grenue.

Des accumulations de gypse ont été observées uniquement à la base du profil 3 (sommet de la colline) dans le matériau de pseudosable à partir de 2,8 m de profondeur: il s'agit d'amas de lentilles de gypse se localisant dans les vides inter-agrégats.

1.4-Discussion

A la base des profils situés au sommet de la colline le pseudosable a conservé en profondeur plus ou moins ses caractères originels d'organisation et même de composition. En lames minces on voit clairement que la composition des microagregats n'est pas uniforme, ce qui s'explique par le fait qu'il s'agit de grains de pseudosable d'origine diverse, apportés par le vent. La position des fragments de coquillage entre les agrégats suggère aussi une mise en place éolienne (Fig.II-2.4).

Le passage de ce matériau aux horizons sus-jacents se réalise par une perte progressive de la microstructure granulaire et une homogénéisation du matériau.

Tout en subissant une dessalinisation et une désodisation du complexe absorbant le pseudosable voit sa porosité se réorganiser. Cela est dénoté par : (i) la microstructure, originellement grenue passe à un type de chenaux dans les horizons de surface (ii) la distribution relative g/f porphyrique ouverte ou à double espacement dans les horizons profonds devenant porphyrique simple vers le sommet du profil (iii) la densité apparente augmentant vers le sommet du profil.

Cependant, si ces traits d'évolution sont communs à tous les profils de la séquence, leur intensité varie selon la position topographique de chacun d'eux. Ainsi les profils situés au piémonts sont plus dessalés et plus désodisés que ceux du sommet, et le pseudosable n'apparaît que dans ces derniers. Nous attribuons ces différences à deux causes essentielles liées toutes deux à la dynamique de l'eau pluviale: le rajeunissement de sommet par l'érosion et l'étalement des dépôts au bas du piémont, l'effet de l'eau de drainage naturel latéral, nul au sommet et relativement intense au bas de la colline.

I-2. Etude préliminaire au champ de l'effet d'une pré-irrigation à l'eau usée d'un sol salé

Le site de cet essai se localise dans la région de Kairouan qui se situe à 160 km au sud de Tunis, sous une pluviométrie annuelle de 300 mm. Ce choix est dicté par la réunion de plusieurs conditions de faisabilité de la recherche proposée:

-Disponibilité d'une eau usée traitée émanant d'une

ville non industrialisée (eau purement domestique).

- Existence aux environs immédiats de la station d'épuration de sols halomorphes.
- Prédisposition des autorités et des services agricoles locaux à nous aider dans la conduite des expérimentations prévues.
- Prédisposition d'un paysan à nous louer une petite parcelle de terrain à proximité d'un puits débitant une eau d'origine profonde de salinité comparable à celle de l'eau usée traitée.

2.1-Matériels et Méthodes

Sur 4 parcelles de 4 x 4 m, nous avons réalisé une pré-irrigation en employant de fortes doses d'eau: 150 (A) - 300 (B) et 450 mm (C). Une parcelle identique non irriguée a été considérée comme témoin (D).

Sur ces parcelles, l'évolution de l'humidité et de la conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée ont été suivies par des mesures avant la mise en eau et 3, 7 et 14 jours après. Les mesures ont été répétées 2 fois pour chaque parcelle.

Le sol:

Il s'agit d'un sol peu évolué d'apport affecté par une salinité et une sodicité assez importante à profil descendant.

Description du profil :

- 0 - 20 cm : Horizon de texture sablo-limoneuse (apport récent de la crue de 1969) calcaire - passage brutal à l'horizon suivant.
- 20 - 60 cm : Texture limono-argileuse structure massive à l'état humide. Calcaire - présence de quelques pseudomycéliums gypso-salins.
- 60 - à plus: Texture argileuse avec pseudomycéliums calcaires et gypso-salin bien développés. Structure massive-compacte.

Compte tenu de son origine alluvionnaire, ce sol présente d'assez importantes variations latérales et verticales de plusieurs de ses caractéristiques, dont notamment la conductivité électrique qui a subi des fluctuations depuis que les paysans ont commencé cette année à utiliser l'eau usée en irrigation.

Tableau II-1 : Composition granulométrique et densité du sol de Kairouan.

Horizon	% A	% L	% L.G.	S.F.	S.G.	D.A
0-20 cm	10	1	8	81	-	1,37
20-40	20	9	11	60	-	1,43
40-60	46	27	20	7	-	1,46
60-80	53	37	6	3	1	1,48
80-100	55	36	4	4	1	1,46

Tableau II- 2 : Conductivité électrique du sol dans les 4 parcelles A-B-C-D.en 1984 juste avant la pré-irrigation.

Parcelle Prof. cm	A	B	C	D
0	6,5	3,4	3,8	3,7
15	3,9	3,6	4,8	5,1
30	5,2	4,5	7,8	8,4
50	11,2	10,8	13	13,7
80	11	16,5	21	20,9

L'eau usée traitée d'irrigation:

Il s'agit d'une eau de couleur jaunâtre, d'une teneur en matière en suspension de l'ordre de 18 mg/l et en carbone organique soluble de l'ordre de 0,8 g/l.

Tableau II- 3 : Composition chimique de l'eau usée traitée sortant de la station d'épuration(meq/l).

	Na+	Ca++	Mg++	K+	Cl-	SO4--	HCO3	CE	PH	SAR	Cl
							/				/
							CO3				SO4
1984	20,0	6,2	3,08	1,9	12,0	10,3	9,0	2,9	7,9	9,2	1,2
1986	13,9	9,6	5,20	2,0	14,0	13,9	3,0	2,9	8,6	5,1	1,0

Aux deux dates, cette eau est d'un faciès chloruré sodique, de conductivité constante mais de S.A.R. variable. Il s'agit d'une eau douteuse, surtout pour les sols à texture fine.

2.2-Résultats :

Cet essai préliminaire qui devait nous permettre de détecter l'intensité du processus de dessalage du sol sous

l'effet de fortes doses d'irrigation ne nous a pas donné des résultats satisfaisants.

Les profils hydriques des trois parcelles irriguées ont montré que l'eau ne pénètre pas beaucoup dans le sol au-dessous des 40 premiers centimètres, malgré la forte dose d'eau appliquée dans le cas de la parcelle C.

Certes, la grande dispersion des résultats n'aide pas à interpréter aisément les résultats obtenus. Mais on peut affirmer que les différences observées entre les différents traitements ne sont pas très importantes et la plus forte dose n'a pas contribué à provoquer un dessalage prononcé du profil, (Tableau II-4). Cela est certainement dû à la discontinuité texturale qui sépare l'horizon sableux de surface et les alluvions argileuses plus anciennes. Au niveau de cette discontinuité, il s'est instauré un écoulement hypodermique latéral selon la pente du terrain qui est de l'ordre de 1 %. Mais cette constatation est importante, car elle révèle déjà un problème qui mérite d'être pris en considération lors de la conception du nouveau périmètre irrigué.

Tableau II-4 : Evolution de la C.Ee après la pré-irrigation

Trait.	C.Ee	1/10	4/10	8/10	14/10
A	5	6,5	3,0	6,2	3,0
	15	3,9	14,0	7,3	4,9
	30	5,2	10,1	9,9	7,3
	50	11,2	15,1	15,9	13,1
	80	11,0	25,0	24,7	20,9
B	5	3,4	-	6,7	2,9
	15	3,6	3,3	7,0	3,0
	30	4,5	9,3	11,4	9,0
	50	10,8	13,7	13,7	11,6
	80	16,5	23,3	22,1	25,0
C	5	3,8	-	2,2	2,4
	15	4,8	5,8	-	3,6
	30	7,8	12,2	15,7	11,7
	50	13,0	19,8	13,1	18,3
	80	21,0	25,0	22,7	23,8
D	5	3,7	-	3,5	5,6
	15	5,1	14,5	21,5	13,8
	30	8,4	21,5	14,5	16,0
	50	13,7	20,9	20,5	19,2
	80	20,9	31,4	24,4	27,3

2.3-Conclusion:

Une dose d'irrigation supérieure à 150 mm appliquée à ce sol ne semble pas provoquer un dessalage plus prononcé. La discontinuité texturale qui se situe vers 20 cm de profondeur

est à l'origine d'une très faible infiltration verticale de l'eau d'irrigation. Certaines techniques de travail du sol permettraient d'améliorer cette infiltration verticale.

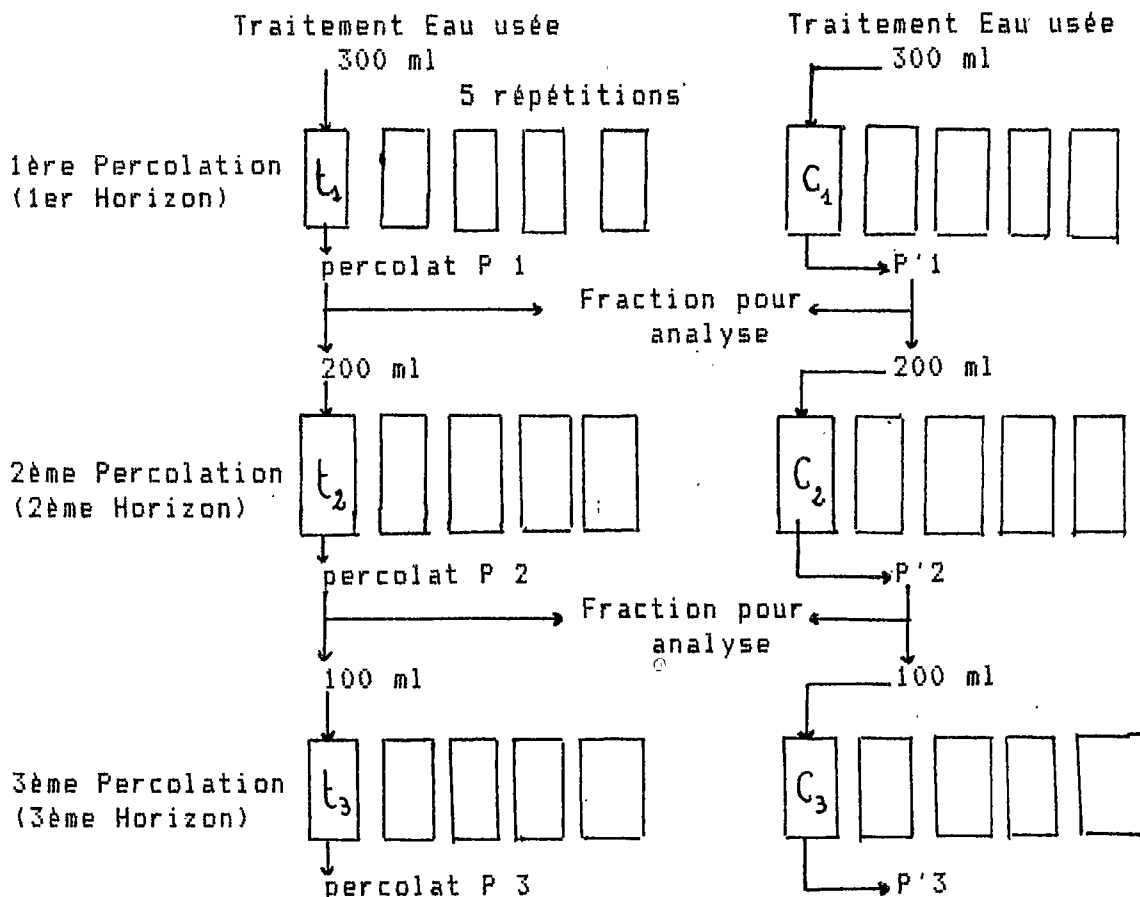
II- EXPERIMENTATION PRELIMINAIRE DE LABORATOIRE

II.1. Essai de percolation sur une colonne de terre remaniée de Kairouan avec l'eau usée en présence d'un amendement calcique

1.1- Matériels et Méthodes

Il s'agit d'une manipulation réalisée dans des tubes de percolation employés généralement pour déterminer le coefficient K de DARCY dans le test de stabilité structurale de HENIN (1969). Les échantillons de terre tamisée à 2 mm sont de 50 g et la dose d'eau appliquée sur chacun d'eux est de 300 ml (soit environ une tranche d'eau de 400 mm). Les tubes ont été remplis conformément à la méthode de HENIN dans l'eau usée.

Un lot de tubes a été percolé avec de l'eau usée traitée de Kairouan et un autre lot a subi le même traitement après avoir reçu à sa surface 0,5 g de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (soit l'équivalent de 30 t/ha). Le protocole expérimentale peut être schématisé comme suit :



Dans ce dispositif expérimental il y a une simulation de dessalage de 3 couches superposées de sol (ayant exactement la même composition au départ) par les solutions de drainage, et plusieurs mesures ont été effectuées :

-La conductivité hydraulique K de HENIN pour la première demi-heure puis toutes les heures jusqu'à la 7^{ème} heure.

-La conductivité électrique des solutions de:

-La première demi-heure puis de toutes les heures isolément.

-Toutes les heures mélangées (percolat total)

-Analyses chimiques : Bilan ionique des percolats totaux.

Le sol : Dans cette expérimentation, la terre utilisée provient de l'horizon 40 à 60 cm du sol de Kairouan prélevé dans un site qui a donné les résultats du tableau II-5.

Tableau II-5 : Composition de l'extrait de saturation de la terre utilisée au laboratoire pour la percolation (meq/l).

Horizon	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃	CE	SAR	Cl
							CO ₃			SO ₄
40-60	149	15	20,8	0,4	140	41,2	4,0	18,7	35,2	3,4

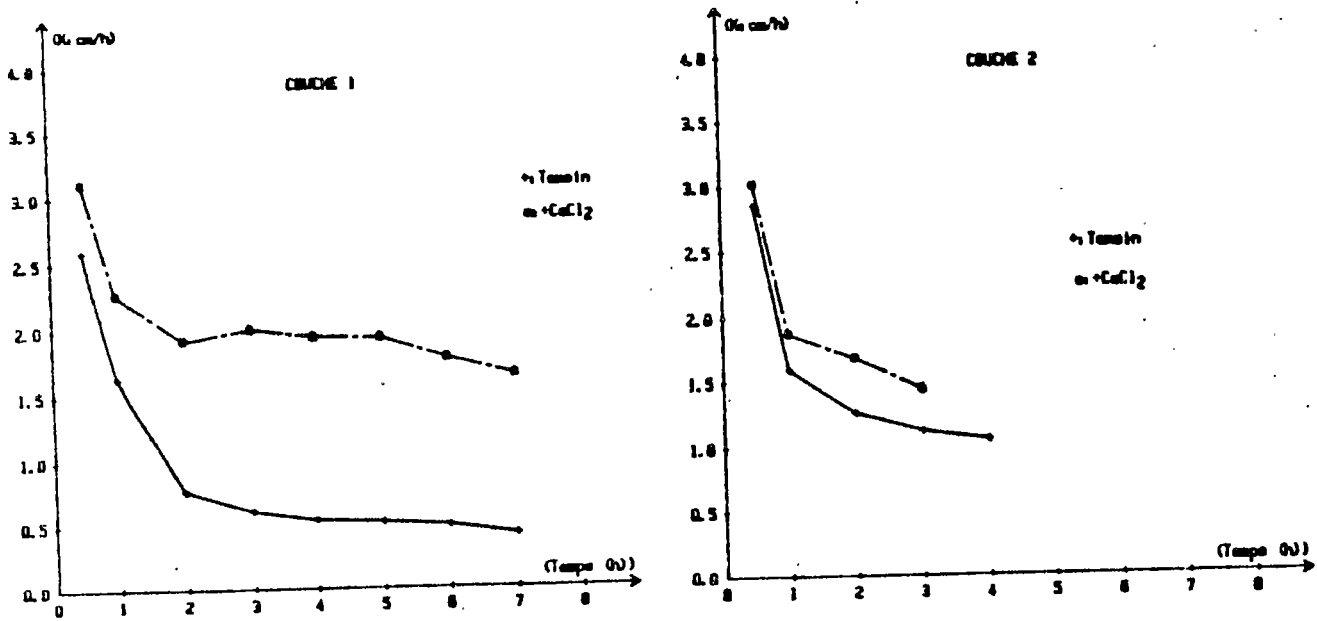
L'eau usée traitée de la percolation : elle a les mêmes caractéristiques que celle prélevée en 1984 (Tableau II-3).

1.2- Les résultats

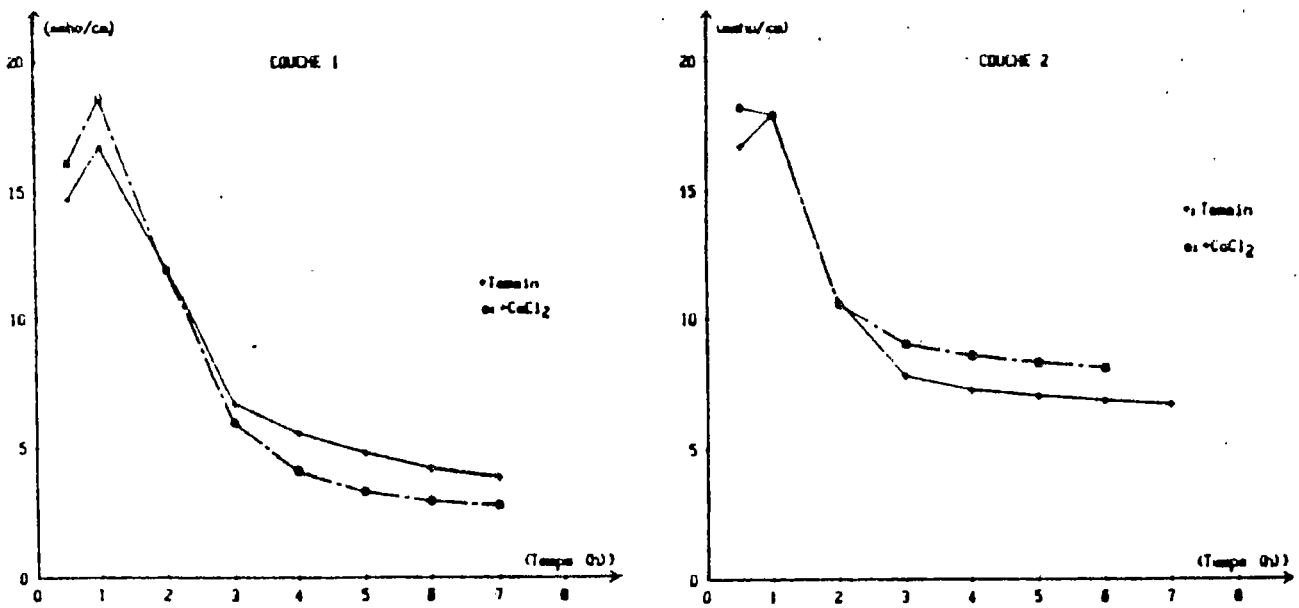
Conductivité hydraulique:

Couche 1 . 1ère percolation (Fig.II-3)

Au début de la percolation la conductivité hydraulique est assez élevée (3 cm/h) pour les 2 traitements (avec et sans CaCl₂); elle diminue ensuite pour se stabiliser vers la valeur 1,6 cm/h pour le traitement avec amendement calcique et vers la valeur de 0,4 cm/h pour les tubes non amendés. La différence des valeurs obtenues est significative dès le début de la percolation mais le devient encore davantage après 1 heure de percolation.



FigII.3 VARIATION DE K AVEC LE TEMPS
(K: Conductivité hydraulique)



FigII.4 VARIATION DE LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE DES PERCOLATS

Couche 2 : 2 ème percolation

Là aussi on a une diminution de K avec le temps, la différence de valeur entre les deux lots d'échantillons est moins marquée et ne devient significative qu'à partir de la 3 ème heure.

L'effet du CaCl₂ apparaît donc surtout au niveau de la première couche, ce qui semble normal puisqu'on ajoute CaCl₂ seulement à la surface du sol, son action sur l'augmentation de K est immédiate, certainement du fait de sa très grande solubilité, il engendre alors une solution de percolation particulièrement concentrée qui permet ainsi le maintien des argiles à l'état flocculé et une bonne percolation, les résultats sont d'ailleurs conformes à ceux de FRENKEL et al, (1978).

Conductivité électrique:

Couche 1 : Les sels très solubles sont éliminés en grande partie dans les percolats pendant les 3 premières heures avec un pic de CE jusqu'à 16 à 18 mmhos vers la 1ère heure. On a ensuite une chute importante puis une stabilisation entre 3 et 4 mmhos aussi bien pour les échantillons amendés que les échantillons témoins (Fig.II-4).

Couche 2 : Le dessalage est moins marqué; les valeurs des conductivités électriques se stabilisent entre 6,5 et 8,5 mmhos; comme pour le coefficient K, l'effet du CaCl₂ est moins marqué.

Tableau II-6 : Conductivité électrique globale des percolations totaux.

	Couche 1		Couche 2		Couche 3	
	Témoin	Traité	Témoin	Traité	Témoin	Traité
CE mmhos/cm	5,95	7,36	9,95	11,18	20,10	21,68

Les conductivités électriques des percolats des échantillons traités restent dans tous les cas légèrement supérieures à celles des percolats des types témoins. Cette différence est due en fait dès le départ à l'amendement calcique très soluble.

Tableau II-7 : Evolution de la conductivité hydraulique avec le temps K en cm/h.

Couche 1			Couche 2		
Temps	Témoin	+ CaCl ₂	Temps	Témoin	+ CaCl ₂
1/2	2,58	3,11	1/2	2,85	3,02
1	1,63	2,26	1	1,59	1,87
2	0,76	1,92	2	1,26	1,68
3	0,60	2,00	3	1,12	1,44
4	0,53	1,94	4	1,05	* -
5	0,51	1,93	5	* -	* -
6	0,48	1,77	6	* -	* -
7	0,41	1,64	7	* -	* -

Tableau II-8 : Evolution de la conductivité électrique avec le temps CE en mmhos/cm.

Couche 1			Couche 2		
Temps	Témoin	+ CaCl ₂	Temps	Témoin	+ CaCl ₂
Heure					
1/2	14,72	16,09	1/2	16,71	18,18
1	16,74	18,60	1	17,97	17,90
2	12,07	11,93	2	10,68	10,54
3	6,69	5,93	3	7,91	9,06
4	5,56	4,07	4	7,35	8,64
5	4,77	3,30	5	7,10	8,37
6	4,18	2,93	6	6,90	8,17
7	3,85	2,76	7	6,77	-

Bilan ionique des percolats (cf. Tableau II-9)

* La concentration (mesures de CE) des percolats de la 1ère à la 3ème couche se retrouve dans l'évolution des chlorures. On a donc bien eu dans les 2 cas élimination des sels les plus solubles à savoir les chlorures. La différence entre les chlorures des percolats "témoins" et "traités" de chaque couche restant la même, de l'ordre de 20 meq/l, correspond d'ailleurs à l'apport de chlorures par CaCl₂ (celui-ci correspondant à 22,7 meq/l).

* Notons également une évolution comparable du Na⁺ dans les percolats des deux traitements avec une différence de la concentration entre P1, P'1 d'un côté et P3, P'3 de l'autre. On a donc eu élimination du Na existant dans le sol et probablement une désodification partielle du complexe.

* L'évolution du Ca et du Mg selon les traitements n'est pas la même, surtout pour la première couche.

Dans le percolat P'1 des échantillons traités par CaCl₂ on ne retrouve pas tout le Ca apporté par le CaCl₂; par contre on trouve plus de Mg libéré par la première couche que pour les sols percolés uniquement à l'eau usée. De même pour les percolats des couches 2. Il semble donc qu'une partie du Ca apporté par le CaCl₂ soit retenu par le sol.

Tableau II-9 : Concentration des percolats en meq/l.

	E.U.	Témoïn			E.U + CaCl ₂	Avec CaCl ₂		
		C1 P1	C2 P2	C3 P3		C1 P1'	C1 P2'	C3 P3'
Na ⁺	20,00	60,20	104,50	211,50	20,00	60,80	115,00	219,00
K ⁺	1,90	0,34	0,33	0,40	1,90	0,46	0,34	0,41
Ca ⁺⁺	6,20	5,63	9,06	16,68	28,9	15,87	12,23	19,62
Mg ⁺⁺	3,08	2,13	7,25	22,07	3,08	8,94	12,02	23,54
Cl ⁻	12,00	40,00	81,20	162,40	34,7	63,60	100,40	183,60
SO ₄ ⁼	10,27	19,78	32,22	82,01	10,27	15,68	32,75	73,45
HCO ₃ ⁻								
+ CO ₃	8,00	8,52	7,72	6,42	9,00	6,80	6,44	5,52
SAR	9,42	22,26	36,59	48,05	5,00	17,28	33,03	47,14
C.E.								
mmho /cm	2,9	5,95	9,95	20,10	5,3	7,36	11,18	21,68

C = Couche

C.E = Moyenne de la solution de percolation estimée à partir de résidu sec.

E.U = Eau usée

Analyse des extraits de pâte saturée après la percolation:

D'après les profils ioniques et les valeurs de la C.E. de chaque couche on remarque dans les deux cas qu'on a eu une dessalinisation et une désodification appréciable surtout pour les 2 premières couches (figure II-5, Tableau II-10).

Tableau II-10 : Concentration des solutions des pâtes après percolation en meq/l.

	S	E.U.	Témoïn			E.U.+ CaCl ₂	Avec CaCl ₂		
			T1	T2	T3		C1	C2	C3
Na+	149,0	20,00	12,00	34,00	81,00	20,00	15,00	34,00	78,50
K+	0,42	1,20	0,64	0,31	0,43	1,20	0,76	-	-
Ca++	15,00	6,20	7,14	5,71	13,33	28,20	8,57	7,62	10,58
Mg++	20,75	3,03	0,67	3,27	0,89	3,08	2,83	8,79	6,61
Cl-	140,0	12,00	9,00	30,00	50,00	34,70	10,00	32,00	58,00
SO ₄ =	41,17	10,27	5,45	7,29	40,85	10,27	12,57	16,41	36,69
HCO ₃									
+	4,00	9,00	6,00	3,00	4,80	9,00	4,60	2,00	1,00
CO ₃									
SAR	35,24	9,24	6,3	16,05	30,38	5,00	6,28	11,87	28,78
C.E.									
mmho/cm	18,65	2,9	2,05	4,00	9,10	5,3*	2,85	5,5	9,5

-S : sol témoin.

-T1,T2,T3 : extraits des couches 1,2 et 3 témoins.

-C1,C2,C3 : extraits des couches 1,2 et 3 avec CaCl₂.

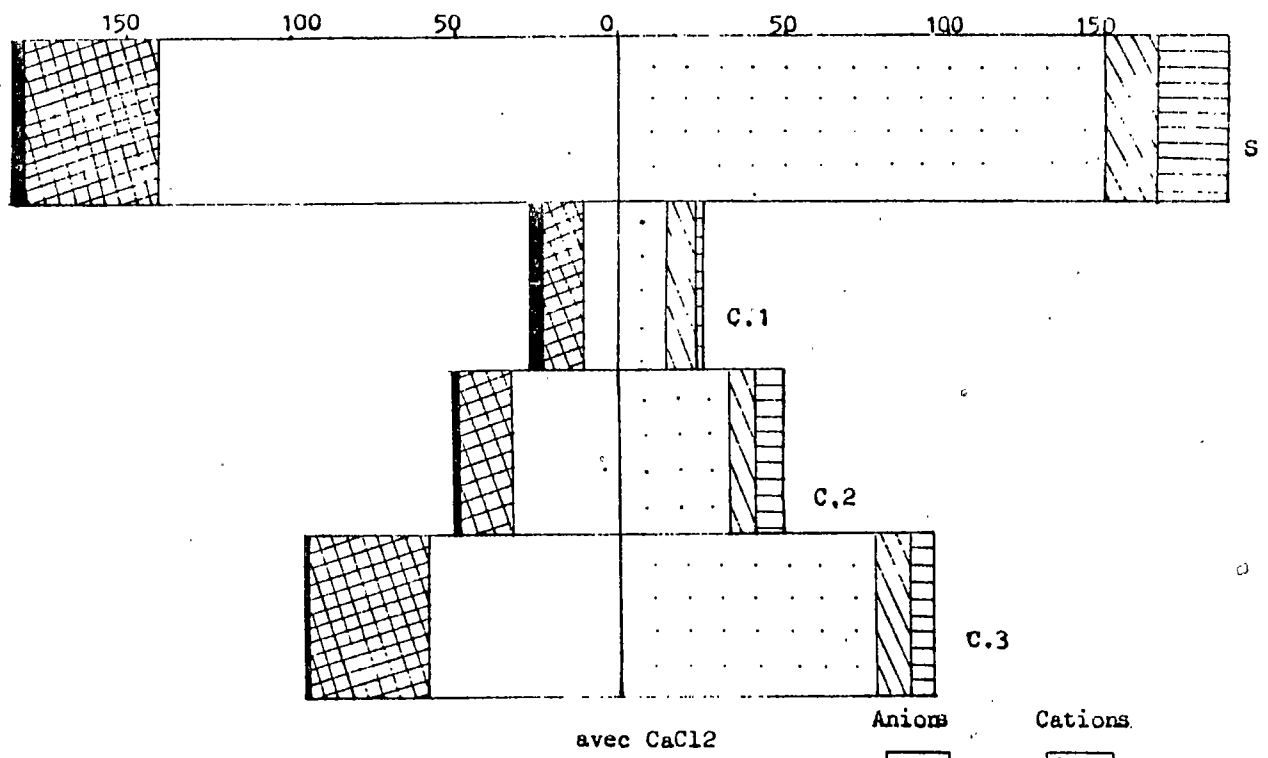
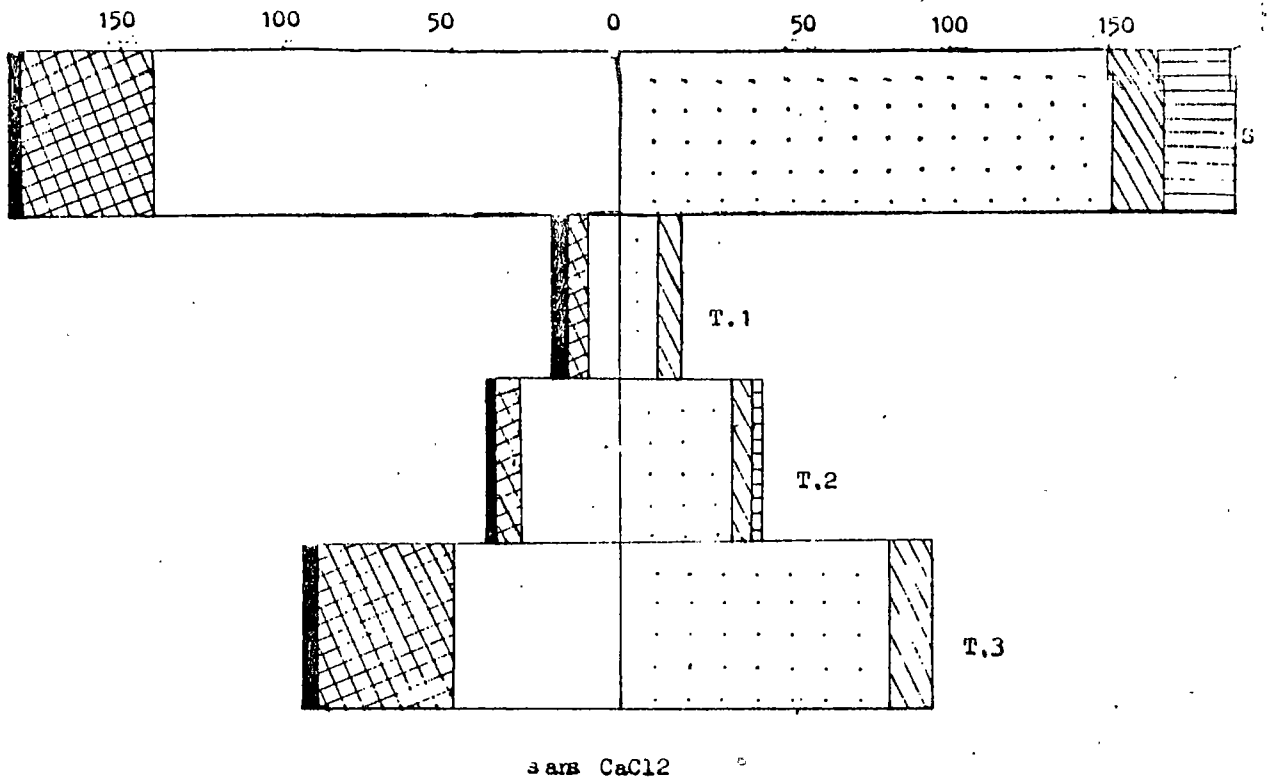
-E.U : eau usée.

L'évolution de la concentration du Na est sensiblement la même pour les échantillons témoins et traités ..

L'allure des courbes pour le Ca aussi, mais la quantité de Ca retenu par le sol est à chaque fois plus grande dans le cas des échantillons traités.

1.3- Conclusion

L'amendement calcique utilisé semble, dans les conditions de l'essai de laboratoire, être efficace sur l'amélioration de la vitesse d'infiltration du sol, mais reste sans effet



Anions		Cations	
	Cl ⁻		Na
	SO ₄		Ca
	HCO ₃		Mg
	+CO ₃		

Fig11.5 Profile salins des extraits de pâte après percolation

appréciable, ni sur le dessalage ni sur la désodification du complexe.

En effet, l'eau usée seule a permis, autant que l'eau enrichie par le chlorure de calcium, un dessalage et une désodification appréciables. En ce qui concerne la désodification, l'équilibre cationique de l'eau usée a permis d'éliminer le maximum de Na échangeable puisqu'on n'a pas constaté des différences de concentration en Na ni dans les percolats, ni dans les extraits de pâte saturée.

Nous avons remarqué cependant une différence entre les concentrations du Mg libéré dans les percolats des 2 traitements. Le calcium de CaCl_2 aura-t-il déplacé plus facilement le Mg que le Na du complexe ?

II-2. Etude de l'effet de l'eau usée traitée sur l'activité biologique du sol

Lors de l'expérience préliminaire de dessalage du sol de Kairouan par une pré-irrigation nous avons constaté la formation de flaques d'eau qui persistaient pendant quelques jours, par endroit dans les rayures du labour. Un examen soigné de ces zones nous a permis de relever l'instauration d'un début d'anaérobiose. Cela nous a amené à étudier au laboratoire, l'effet de l'eau usée, connue par sa richesse en substances organiques énergétiques, sur l'activité microbienne du sol.

2.1. En condition aérobie

Nous avons mesuré le dégagement de CO_2 de divers échantillons mis à incuber selon la technique de mesure du carbone facilement minéralisable décrite par BACHELIER (1966). Les résultats obtenus (tableau II-11) peuvent être résumés comme suit:

L'eau usée entraîne un accroissement notable de l'activité biologique du sol, par rapport à l'eau du robinet.

Si l'eau usée est concentrée, on observe une phase de latence pendant laquelle l'activité microbienne est inférieure à celle observée avec l'eau du robinet. Cette phase de latence qui dure 2 semaines pour des concentrations de 2 à 4 fois, passe à 3 semaines pour une concentration de 6 fois.

Cependant l'activité globale, au bout de 8 semaines est supérieure à celle enregistrée avec l'eau du robinet ou l'eau usée non concentrée. Mais notons qu'au delà d'une certaine concentration de l'eau usée (4 fois) l'effet dépressif sur l'activité microbienne devient très net car le résultat global obtenu avec la concentration de 6 fois reste toujours inférieur à la concentration 4. On peut se demander si cet effet, qui

pourrait être du directement ou indirectement à la salinité, peut se réaliser à plus ou moins long terme dans les périmètres irrigués avec des eaux usées après plusieurs cycles d'irrigation.

Tableau II-11 : Quantité de CO₂ dégagé en mg pour 100 g de terre.

	1ère	2ème	3ème	4ème	5ème	6ème	7ème	8ème	Tot
	Semai-								
	ne								
Eau du robinet	111,46	102,48	95,33	80,15	73,33	48,70	30,06	12,40	554
Eau usée normale	128,33	118,06	101,90	94,82	88,00	73,33	52,80	26,40	684
Eau usée c.c x 2	93,86	95,51	124,60	135,0	139,30	113,66	92,40	40,33	834
Eau usée c.c x 4	71,86	68,20	161,30	169,10	176,0	178,93	140,6	80,13	1046
Eau usée c.c x 6	58,66	53,24	51,33	179,60	187,0	209,73	151,80	80,13	978

c.c : concentrée

Tot : total

2.2- En condition anaérobie

Une culture de féverolle a été réalisée sur 3 types de matériaux arrosés à l'eau du robinet au laboratoire dans des tubes à essai, en condition normale (2e horizon argileux du sol de Kairouan, 1er horizon sableux du même sol, et un sol limono-argileux de la région de Tunis). Le 4^{le} jour, 2 traitements répétés chacun 10 fois, ont été distingués pour tous les sols.

T1 = engorgement des tubes à essai à l'eau du robinet

T2 = engorgement " " " usée traitée de Kairouan.

Dans tous les cas, à plus ou moins long terme, il s'est développé une sulfato-réduction rhizosphérique autour des racines visibles des plants de féverolle qui n'ont pas tardé à dépérir.

Ce phénomène de réduction des sulfates se traduit par la formation d'une gaine noire de sulfure de fer autour des racines et la mort des plantules.

Mais, pour les 3 types de sol, l'engorgement à l'eau usée accélère et accentue le phénomène observé, avec cependant des différences d'intensité suivant les sols selon leur composition chimique : L'apparition de la gaine des sulfures est très rapide et très nette dans la couche argileuse du sol de Kairouan, alors qu'elle est beaucoup plus lente et moins marquée pour le sol de Tunis, et intermédiaire pour la couche superficielle du sol Kairouan. La texture et la richesse initiale en sulfates seraient à l'origine de cette différenciation.

III- ESSAI AU CHAMP DE CULTURE DE COTONNIER SUR SOL SALE IRRIGUE A L'EAU USEE TRAITEE (été 1986)

III-1. Matériels et Méthodes

Le sol salé de Kairouan et l'eau usée traitée présentés plus haut ont été utilisés dans cette expérimentation qui se propose de comparer les effets de deux eaux de qualités différentes sur cultures de cotonniers et sur le profil salin du sol.

Deux parcelles rectangulaires (10 m x 20.) espacées de 2 mètres et situées à proximité d'un puits (sondage de 80 m) ont été préparées au mois de Mars 1986 pour recevoir un semis de coton sur 25 billons, au début du mois de Mai. Les irrigations ont démarré au semis et se sont poursuivies jusqu'au 21/8/86, à raison d'une irrigation tous les 15 jours. Les fréquences d'irrigation sont imposées par des contraintes locales de distributions des eaux. La dose est de 50 mm.

Les irrigations ont été effectuées à la raie: l'eau est apportée à l'entrée de la parcelle puis répartie ensuite entre les billons.

La composition de l'eau usée traitée est déjà présentée au tableau II-3.

Celle de l'eau du puits est rapportée au tableau II-12.

Tableau II-12 : Composition chimique de l'eau du puits en meq/l (prélevée en 1986).

Na+	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K+	Cl-	SO ₄ ²⁻	CO ₃	C.E	PH	SAR	SO ₄
18,45	3,30	5,00	0,20	15,00	8,85	3,1	2,95	8,35	19,1	1,7

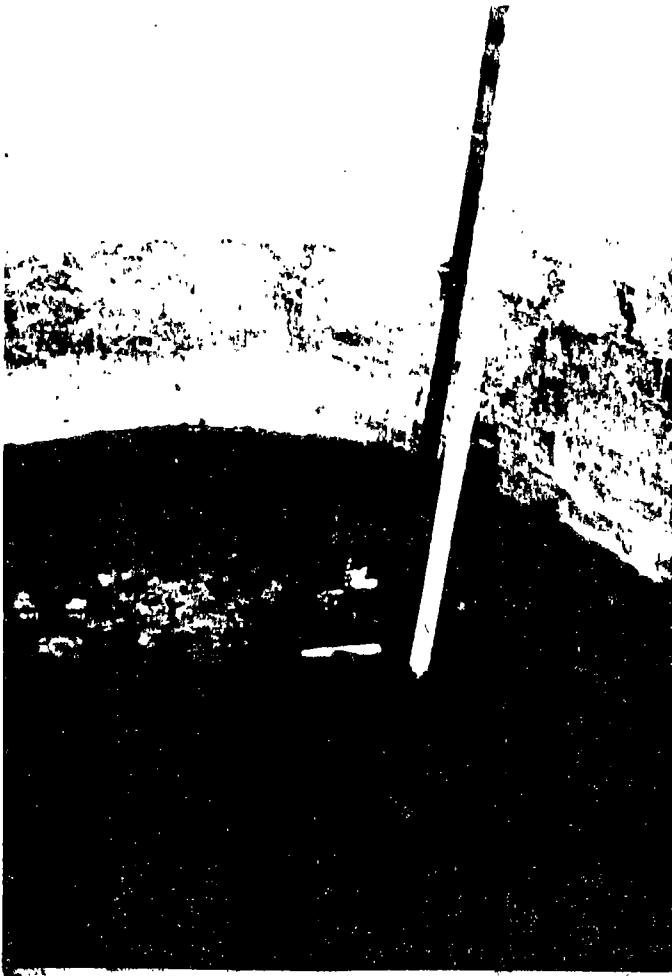


Photo II-1 : Vue du puits
(sondage de 80 m)

Photo II-2 : Vanne d'alimentation
en eaux usées et canalisation
d'arrivée d'eau



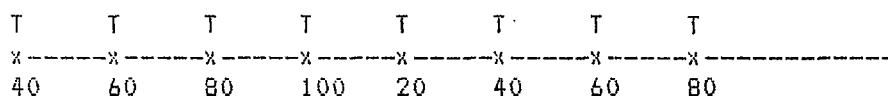
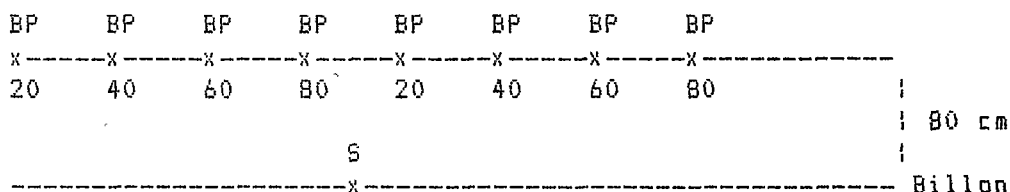
On constate alors que cette eau est moyennement salée. Son faciès est chloruré sulfaté sodique et que dans l'ensemble elle est comparable à l'eau usée utilisée.

Sur chaque parcelle le matériel suivant a été installé:

- 1 Tube d'accès de sonde à neutrons (S).
- 4 Tensiomètres aux profondeurs 40-60-80 et 100 cm (T).
- 8 Bougies poreuses pour l'extraction de la solution (B.P) du sol avec 2 répétitions pour chaque profondeur.
- 4 Salinity sensors (SS).

Le tout étant réparti sur 3 billons selon le schéma suivant:

Dispositif expérimental sur une parcelle d'essai



Ce matériel devait nous permettre de suivre après chaque irrigation l'évolution de l'humidité et de la succion (h) et de suivre l'évolution du profil salin (par la C.Ee et le bilan ionique) sous l'effet des irrigations aux deux eaux considérées.

Nous avons complété ces mesures par des prélèvements de sol à 5 profondeurs, réalisés 10 à 15 jours après chaque irrigation. Le long de chaque parcelle, nous avons prélevé à chaque fois 5 profils ce qui permet de tenir compte de l'hétérogénéité de la salinité induite par le mode d'irrigation et d'apprécier ainsi l'évolution du sol sous l'effet des deux types d'eaux utilisées.

De plus au cours de la période pluvieuse (Octobre - Novembre) nous avons réalisé une autre série de prélèvements dans chaque parcelle (5 profils par parcelle) pour apprécier la persistance des effets de l'irrigation sur la salinité du sol.

III-2. Résultats

Evolution de la salinité du sol

Les tableaux II-13 et II-14 rapportent les compositions des extraits de pâtes saturées des 2 traitements à 3 dates pendant la saison d'irrigation.

L'examen de ces tableaux et de la figure 6 permet de faire le commentaire suivant:

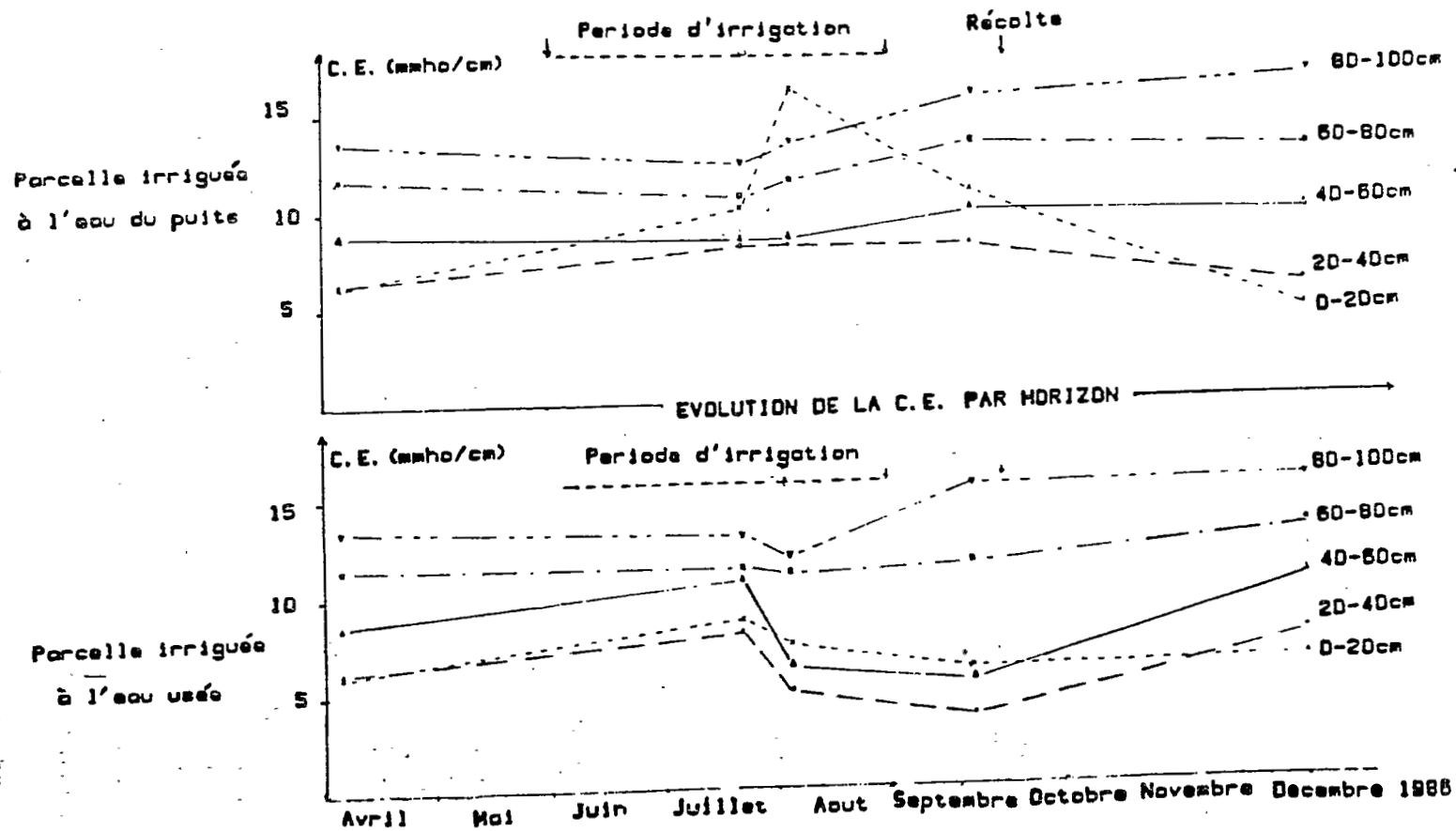


Fig11.6 Evolution de la salinite du sol irriguée à l'eau usée et à l'eau du puits

L'évolution des 2 profils salins dans les 2 traitements se traduit par un accroissement de la salinité du sol. Cela ne concorde pas avec les observations préliminaires faites sur le même type de sol irrigué au mois d'Octobre 1984.

Cette différence de comportement appelle les explications suivantes:

La dose d'irrigation, très faible dans cette manipulation (seulement 50 mm, imposée par les conditions locales de disponibilité en eau, mais qui est conforme à la dose appliquée par les paysans dans cette région) n'est pas en mesure de provoquer un certain dessalage de sol.

Dans cette manipulation, l'irrigation s'est faite en pleine période chaude et sèche, ce qui provoque une concentration des sels dans le haut du profil par suite d'un appel climatique élevé de l'eau, (ETP # 10 mm/jour).

Cependant, l'eau des puits salinise plus le sol que l'eau usée et amène la solution de l'extrait à saturation à un SAR plus élevé.

Cette salinisation du sol affecte surtout les 3 horizons de surface.

Tableau II-13 : Evolution des profils salins durant l'été 1986. Parcelle irriguée à l'eau du puits(en meq/l).

	CE	PH	Na+	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K+	Cl ⁻	SD4 2-	SAR	Cl / SD4
Le 21/07										
0-20	10,1	7,56	81,5	33,0	18,7	1,6	58,0	51,0	16,8	1,1
20-40	8,3	7,81	54,9	22,0	14,0	1,3	44,0	41,1	12,9	1,1
40-60	8,6	7,93	73,4	21,0	12,3	0,4	30,0	62,3	18,0	0,5
60-80	10,8	8,03	97,3	23,0	14,7	0,3	38,0	70,2	22,4	0,5
80-100	12,6	7,72	118,5	27,0	17,4	0,3	50,0	76,0	25,1	0,7
Le 4/08										
0-20	16,3	7,8	125,0	31,0	22,8	2,0	114,0	56,5	24,1	2,0
20-40	8,3	7,85	54,3	19,0	13,5	1,0	40,0	48,7	13,5	0,8
40-60	8,7	7,99	69,6	22,0	14,5	0,4	30,0	66,3	16,3	0,5
60-80	11,6	8,01	96,7	22,0	15,7	0,4	44,0	57,0	22,3	0,8
80-100	13,6	7,90	120,7	22,0	18,1	0,3	52,0	72,6	27,0	0,7
Le 22/09										
0-20	11,0	8,05	71,7	27,0	16,6	2,4	62,0	49,5	15,4	1,3
20-40	8,3	7,71	56,5	23,0	13,8	0,3	30,0	65,9	13,2	0,5
40-60	10,1	7,85	75,5	22,0	16,1	0,3	38,0	67,1	17,3	0,6
60-80	13,6	7,62	114,1	24,0	19,4	0,3	68,0	81,8	24,5	0,8
80-100	16,0	7,69	134,8	25,0	20,4	0,2	80,0	79,3	28,3	1,0

Tableau II-14: Evolution des profils salins durant l'été 1986 dans la parcelle irriguée à l'eau usée (en meq/l).

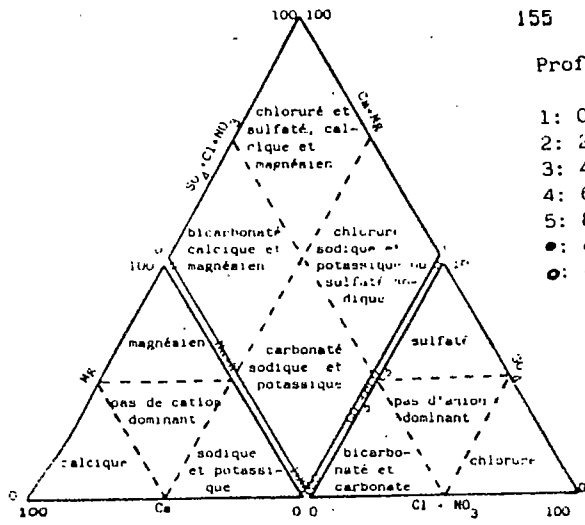
	CE	PH	Na+	Ca++	Mg++	K+	SO4		SAR	Cl / SO4
							Cl-	2-		
Le 21/07										
0-20	8,9	7,53	59,3	26	17,0	1,5	46	49,4	49,5	0,9
20-40	8,3	8,01	66,8	17	11,7	0,4	30	56,5	56,5	0,5
40-60	11,0	7,86	93,5	22	14,5	0,3	38	71,9	71,9	0,5
60-80	11,6	7,87	100,0	21	16,0	0,2	42	74,8	74,8	0,6
80-100	13,2	7,92	115,2	23	17,4	0,2	54	78,1	78,1	0,7
Le 4/08										
0-20	7,6	7,74	47,8	26	12,5	1,9	24	54,4	10,9	0,4
20-40	5,2	7,84	40,2	9	5,2	0,8	20	26,1	15,1	0,8
40-60	6,5	7,80	54,9	12	7,8	0,3	24	44,8	17,4	0,5
60-80	11,3	7,89	92,4	24	14,7	0,3	42	68,1	21,0	0,6
80-100	12,2	7,68	98,9	21	18,9	0,3	44	73,5	22,1	0,6
Le 22/09										
0-20	6,2	7,97	40,8	13	9,6	2,1	22	30,6	21,1	0,7
20-40	3,7	8,31	25,0	6	16,2	1,2	16	26,4	7,5	0,6
40-60	5,6	7,96	40,2	13	9,7	0,9	24	44,5	11,9	0,5
60-80	11,7	7,56	100,0	24	15,8	0,2	52	84,3	22,4	0,6
80-100	15,7	7,89	134,8	24	21,1	0,2	88	87,2	28,4	1,0

En profondeur la CE reste à peu près constante dans les deux cas, mais on peut remarquer une faible diminution de la concentration en Na (le 21/07 et 4/08) par rapport au sol initial, celle-ci remontant dès l'arrêt des irrigations (prélèvement du 22/09), il en est de même pour le chlore.

Pour les deux parcelles, on remarque aussi une augmentation de la concentration en SO4-- sur tout le profil, mais plus marquée en surface.

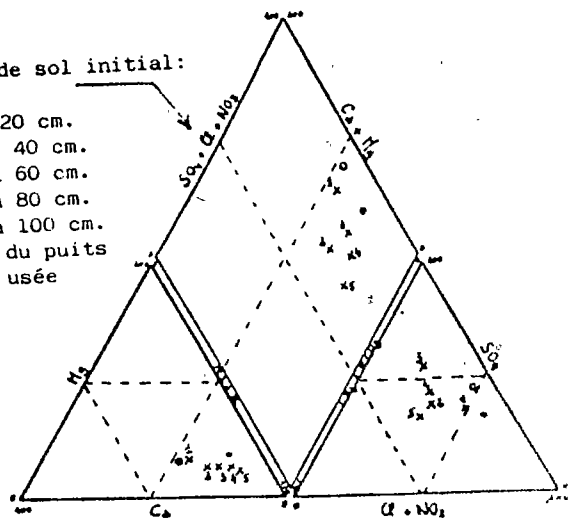
Dans les diagrammes de Piper, cette évolution apparaît beaucoup plus marquée dans le cas de la parcelle irriguée à l'eau usée (Fig.II-7).

Par ailleurs, l'examen du tableau 15 qui rapportent les compositions chimiques des extraits à saturation des sols dans les 2 traitements lors des prélèvements de la saison humide (18/12/86), révèle clairement l'effet bénéfique des pluies abondantes (150 mm) de l'automne, qui sont parvenues à ramener les profils salins pratiquement à leur état initial, sauf pour la couche de surface d'où les chlorures ont apparemment été lixiviés. Les sulfates sont de leur côté stabilisés à un niveau supérieur à l'état initial.



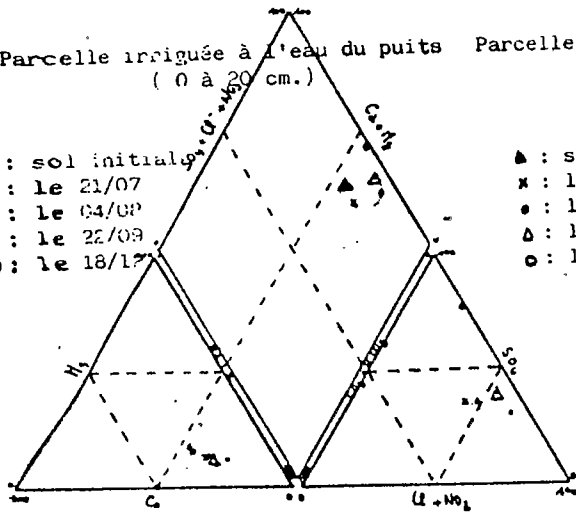
Profil de sol initial:

- 1: 0 à 20 cm.
- 2: 20 à 40 cm.
- 3: 40 à 60 cm.
- 4: 60 à 80 cm.
- 5: 80 à 100 cm.
- : eau du puits
- : eau usée



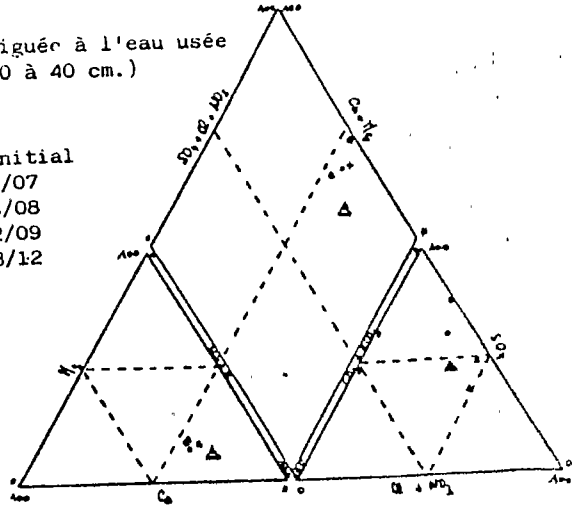
Parcelle irriguée à l'eau du puits (0 à 20 cm.)

- ▲: sol initial
- x: le 21/07
- : le 04/08
- △: le 22/09
- : le 18/12



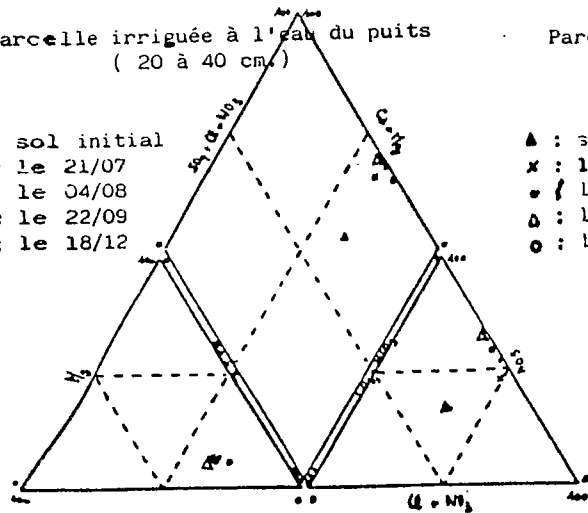
Parcelle irriguée à l'eau usée (20 à 40 cm.)

- ▲: sol initial
- x: le 21/07
- : le 04/08
- △: le 22/09
- : le 18/12



Parcelle irriguée à l'eau du puits (20 à 40 cm.)

- ▲: sol initial
- x: le 21/07
- : le 04/08
- △: le 22/09
- : le 18/12



Parcelle irriguée à l'eau usée (0 à 20 cm.)

- ▲: sol initial
- x: le 21/07
- : le 04/08
- △: le 22/09
- : le 18/12

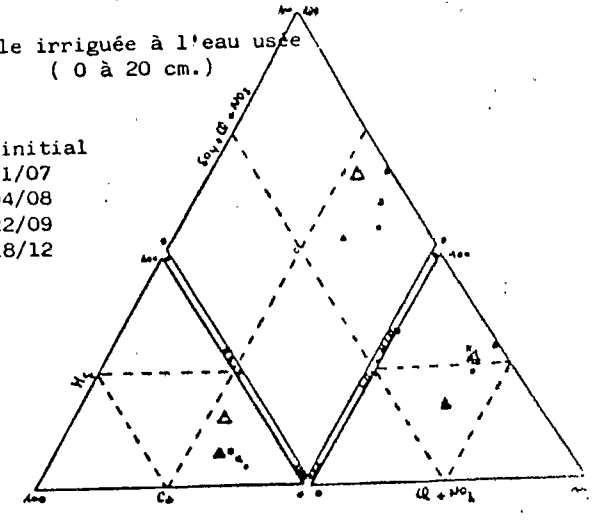


Fig11.7 Faciès chimique du sol irrigué à l'eau du puits

Tableau II-15 : Profils salins en hiver (prélèvement de 18/12/1986) Extrait à saturation (meq/l).

		CE	pH	Na+	Ca++	Mg++	K+	Cl-	SO ₄ -	Cl- / SAR	SO ₄ / SO ₄
									4		2-
Eau	0-20	4,7	8,15	27,2	14	9,2	1,8	12	44,1	8,0	0,3
	20-40	6,1	7,84	48,9	14	8,4	1,0	30	47,0	14,6	0,6
du	40-60	10,0	7,66	77,2	23	14,8	0,5	40	70,9	17,8	0,6
	60-80	13,3	7,59	108,7	23	16,6	0,3	62	73,4	24,4	0,8
Puits	80-100	17,2	7,80	141,3	26	20,7	0,3	102	61,7	29,2	1,7
Eau	0-20	6,4	8,31	37,5	21	12,5	2,1	16	55,8	9,2	0,3
	20-40	7,7	8,04	54,4	16	11,7	0,8	34	49,5	14,6	0,7
	40-60	10,7	7,91	78,3	22	15,2	0,3	44	65,9	18,2	0,7
Usee	60-80	13,3	7,64	105,4	23	17,1	0,3	68	73,8	23,5	0,9
	80-100	15,7	7,86	128,3	26	21,0	0,3	70	67,1	26,5	1,0

L'examen de l'évolution du faciès chimique de la salinité à travers le diagramme de Piper (figure II-7) permet de faire les remarques suivantes:

Tous les horizons ne sont pas affectés de la même manière; les horizons 3,4 et 5 (de 40 à 100 cm) ne subissant pas de modifications très importantes de leur faciès géochimique durant l'été, nous n'avons représenté sur les diagrammes que l'évolution des horizons 1 (0 à 20 cm) et 2 (20 à 40 cm).

Parcelle irriguée à l'eau du puits :

Durant l'été, l'horizon 1, sableux, devient plus chloruré que dans le profil initial, le 18/12 on remarque cependant un enrichissement en sulfate. L'horizon 2 quant à lui devient beaucoup plus sulfaté aussi bien en été que le 18/12.

La composition cationique de ces deux horizons ne montre pas d'évolution marquée, le faciès restant sodique.

Parcelle irriguée à l'eau usée :

Pour les horizons 1 et 2 on remarque un enrichissement net en sulfate, le faciès est nettement moins chloruré que dans le cas d'irrigation à l'eau du puit.

La non plus, on n'a pas de modification très importante du faciès cationique sauf dans le cas de l'horizon 2, à la fin de l'été, où l'on remarque un enrichissement en Mg.

Ces résultats tendent à montrer que l'eau usée traitée peut être utilisée pour l'irrigation sans provoquer une salini-

sation durable, dans les conditions climatiques de Kairouan, puisque les pluies de la saison humide se chargent de ramener le profil du sol à sa salinité initiale. Mais il est important de souligner que l'effet de bonification (dessalement) attendu par cette eau ne s'est pas manifesté au cours de ce premier cycle d'irrigation.

Cette manipulation devait être reprise l'année d'après, et tout a été mis en oeuvre pour la démarrer au mois d'avril 1987. Malheureusement, la station d'épuration des eaux de la ville de Kairouan est tombée en panne, et n'a pu être réparée à temps. Pour cette raison nous avons été privé d'eau et par voie de conséquence, de renouveler la même expérience de l'an passé. Ce qui nous laisse avec des résultats d'une seule année, que l'on ne peut considérer que comme provisoires.

Effet de la qualité de l'eau sur les rendements du cotonnier

La récolte a été nettement meilleure dans la parcelle irriguée à l'eau usée soit l'équivalent de 21,5 qx/ha dans la parcelle irriguée à l'eau du puits. Rappelons que ces rendements ont été obtenus sans fertilisation. On comprend alors que les différences de productivité entre les deux eaux utilisées sont dues surtout aux apports d'azote ammoniacal et des ions phosphates par l'eau usée. D'ailleurs la croissance, le développement et l'aspect des plants traduisent une meilleure nutrition des plants de cotonnier avec l'eau usée.

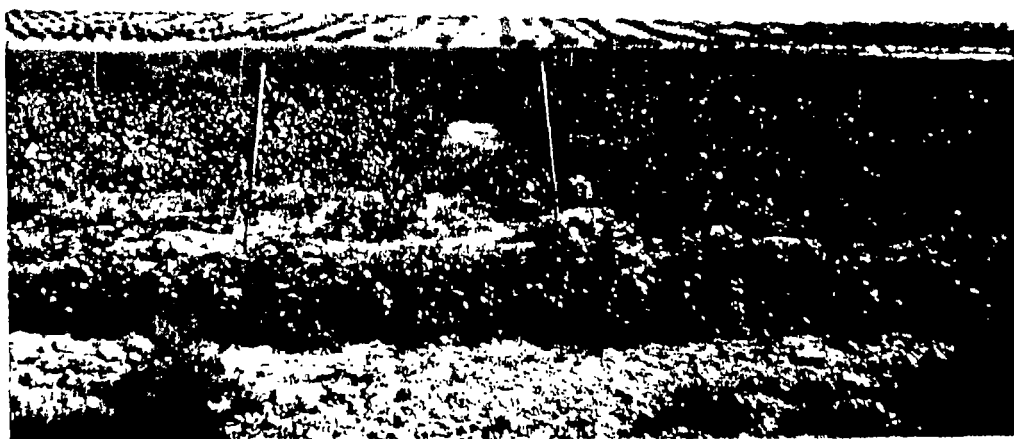


Photo II-3: Vue générale des deux parcelles avec leur culture de coton (Octobre 1986).
à gauche: parcelle irriguée à l'eau du puits.
à droite: parcelle irriguée à l'eau usée.

III-3. Conclusion

Contrairement aux fortes doses utilisées dans l'expérimentation préliminaire, une dose de 50 mm utilisée pendant la saison sèche et chaude sur une culture de cotonnier provoque une certaine salinisation des horizons de surface, aussi bien à l'eau usée qu'à celle du puits, de salinité comparable.

Cependant, pendant la saison humide, la pluie semble être suffisante pour ramener la salinité du sol à son niveau initial. Il s'en suit donc que l'effet bonificateur attendu par les irrigations d'été ne s'est pas réalisé dans le type de sol pris en considération. On devrait s'orienter vers l'adoption d'une pré-irrigation suffisante avant le semis pour dessaler partiellement le sol. Le recours à un amendement calcique très soluble (comme CaCl_2) pour améliorer l'infiltration de l'eau devrait être essayé au champ, après avoir ameubli les 50 premières cm.

Quant à la productivité de l'eau usée dans le sol considéré, elle s'est avérée bien supérieure à celle de l'eau du puits. La richesse de l'eau usée en azote ammoniacal et en phosphates de ces eaux résiduaires en serait la cause.

IV- EXPERIMENTATION SUR LE DESSALAGE DU SOL SALSODIQUE DE KAIROUAN RECONSTITUE EN CASE LYSIMETRIQUE

IV-1. Matériels et Méthodes

Dans cette manipulation, le sol de Kairouan reconstitué dans une case lysimétrique de l'INAT présente à peu près la même granulométrie que celle présentée au tableau 1, mais plus salé et plus sodique. Le tableau II-16 donne les caractéristiques chimiques de la solution du sol des horizons argileux.

Tableau II-16 : Caractéristiques chimiques du sol reconstitué en case lysimétrique

	Na+	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ₂	Cl-	SO ₂₋₄	HCO ₃ ⁺ CO ₃	CE	SAR	Cl/ SO ₄
25-35 cm	151,0	30,0	16,7	0,2	161	33,7	3,0	21,7	31,3	4,8
45-60 cm	165,0	37,3	21,0	0,2	157	65,2	1,5	22,1	30,6	2,4
85-140 cm	185,0	34,3	32,0	0,2	148	104,0	1,5	23,8	32,1	1,4

La première couche, sablo-limoneuse, a été prélevée seule. Comme le reste du profil est assez homogène, le passage d'un horizon à un autre est peu net, nous avons fait les prélèvements par couche de 20 cm jusqu'à 135 cm de profondeur, en ayant

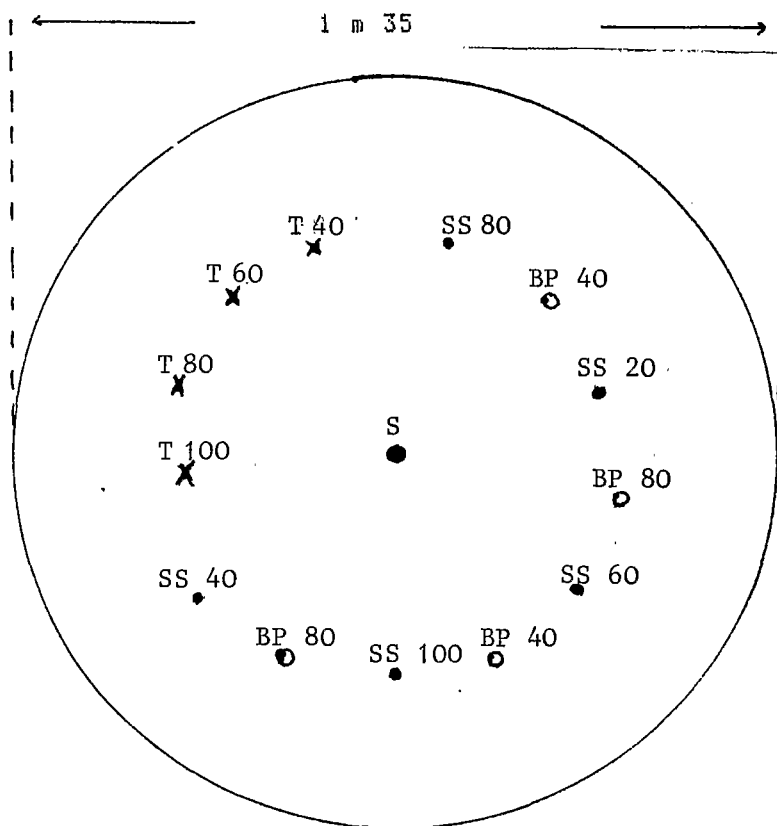
soin, à chaque fois, de faire des mesures de la densité apparente pour être à même de reconstituer le sol dans le lysimètre. Ainsi environ 8 tonnes et demi ont été transportées de Kairouan à Tunis où l'on a procédé au séchage et tamisage du sol de la terre et au remplissage du lysimètre, couche par couche, en reproduisant la densité apparente existant in situ.

Le lysimètre utilisé est en P.V.C.circulaire d'environ 125 cm de diamètre; Une sortie d'eau étant prévue au fond du lysimètre pour recueillir les eaux de drainage.

Pour suivre l'évolution saline et hydrique du profil nous avons installé le matériel suivant (cf. Fig.II-8)

- 1 Tube d'accès de sonde à neutrons .
- 4 Tensiomètres aux profondeurs 40, 60, 80 et 100 cm.
- 4 Bougies poreuses à 2 profondeurs 40 et 80 cm.
- 5 Salinity sensor à 20, 40, 60, 80 et 100 cm.

Fig II-8:Dispositif de mesure sur le lysimètre du sol de Kairouan.



BP : bougie poreuse
 T : tensiomètre
 S : tube d'accès de sonde à neutrons
 SS : salinity sensor

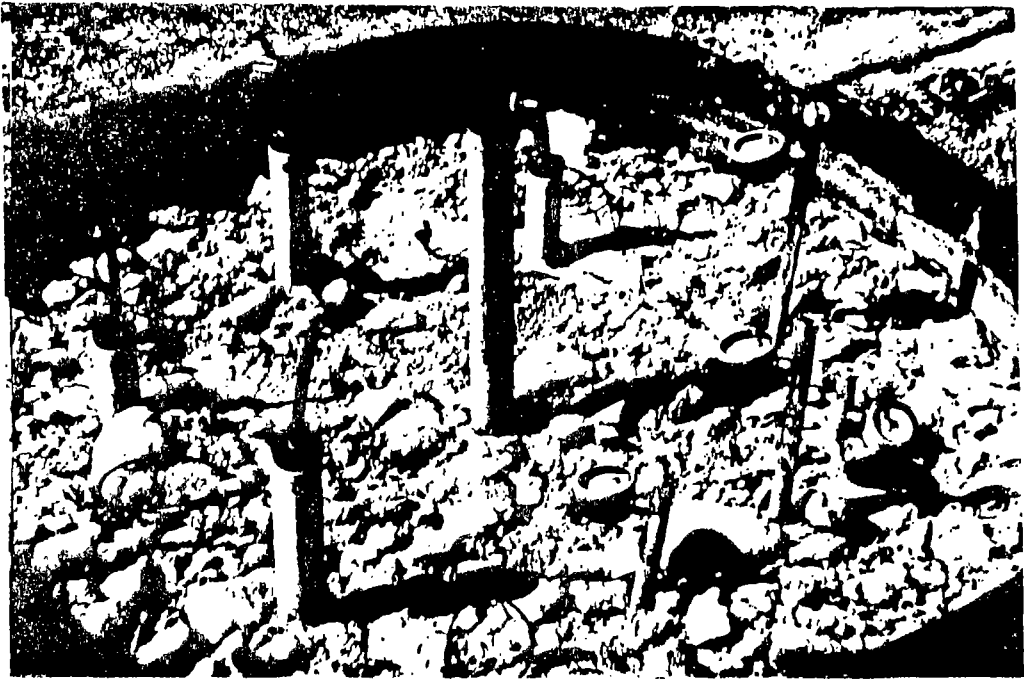


Photo II-4: Lysimétrie du sol de Kairouan avec matériel de mesure implanté.

L'eau utilisée pour l'irrigation est une eau usée d'un quartier de la banlieue de Tunis traitée dans une usine expérimentale installée à l'INAT. Les caractéristiques de cette eau sont présentées au tableau II-12.

IV-2. Résultats

Le sol est au départ sec. Une dose de 200 mm a été apportée à la surface du sol. Malheureusement au-delà de la couche sableuse de surface, l'infiltration de l'eau s'est avérée presque nulle; et après plusieurs tentatives, le front d'humectation du sol dans le lysimètre n'a pas dépassé les 40 premiers centimètres. Cela fait qu'il ne nous a pas été possible de recueillir la solution du sol dans les bougies poreuses, et à fortiori non plus, pas d'eau de drainage à la base du profil.

Cette manipulation a été un échec et aucun résultat n'a pu être noté. Nous pensons que le gonflement de l'argile au niveau de la discontinuité texturale vers les 20 cm de profondeur est à l'origine de l'imperméabilisation du sol.

IV-3. Conclusion

La reconstitution d'un sol salé et sodique dans un lysimètre, s'est avéré un outil inefficace pour l'étude de son dessalage par suite d'une quasi totale imperméabilisation de sol. Déjà sur le terrain nous avons constaté que les fortes doses d'irrigation (450 mm) ne pénètrent pas beaucoup plus dans ce sol que la dose la plus faible appliquée (150 mm). Il est compréhensible que la destruction de la structure et le compactage du sol dans le lysimètre pour le ramener à la densité apparente trouvée au champ, ne favorise pas la migration de l'eau.

V- EXPERIMENTATION SUR L'UTILISATION DE L'EAU USEE TRAITEE EN IRRIGATION DE 3 TYPES DE SOLS EN CASES LYSIMETRIQUES

Comme nous avons pu bénéficier de la possibilité d'utiliser à l'INA Tunis même, une eau usée provenant d'une station expérimentale de l'INAT nous avons élargi notre expérimentation à deux blocs de cases lysimétriques (en place depuis trente ans), comportant trois types de sol, pour essayer de suivre les effets de cette eau sur les sols et sur une culture de cotonnier.

V-1. Matériels et Méthodes

Matériel

Les lysimètres :

On est en présence de deux blocs formés chacun de 4 cases lysimétriques carrées ayant chacune 2 m de côté et deux mètres de profondeur; les parois sont en béton d'une épaisseur de 15 cm. Le fond de la case est également en béton et légèrement incliné afin de recueillir l'eau percolée et la conduire dans un conduit en béton accolé à la case afin de pouvoir procéder aux mesures des quantités d'eau drainées. Une chambre est aménagée au-dessus du conduit; elle permet d'accéder à celui-ci par une ouverture et par une échelle implantée dans la paroi (Fig II-9).

Chaque bloc de 4 cases est enterré jusqu'au bord supérieur de la case qui se trouve au niveau du sol; le bloc reposant sur deux poutres en ciment armé. Par ailleurs le bord supérieur des cases forme une légère rigole afin d'éviter le rejet dans la case de la pluie tombée sur le bord.

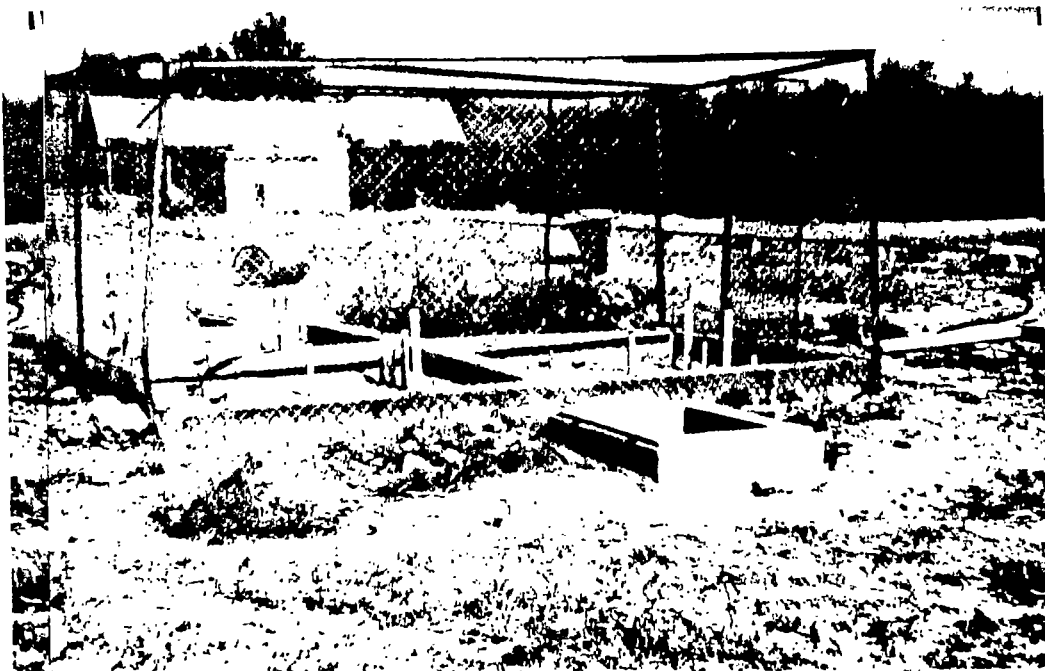
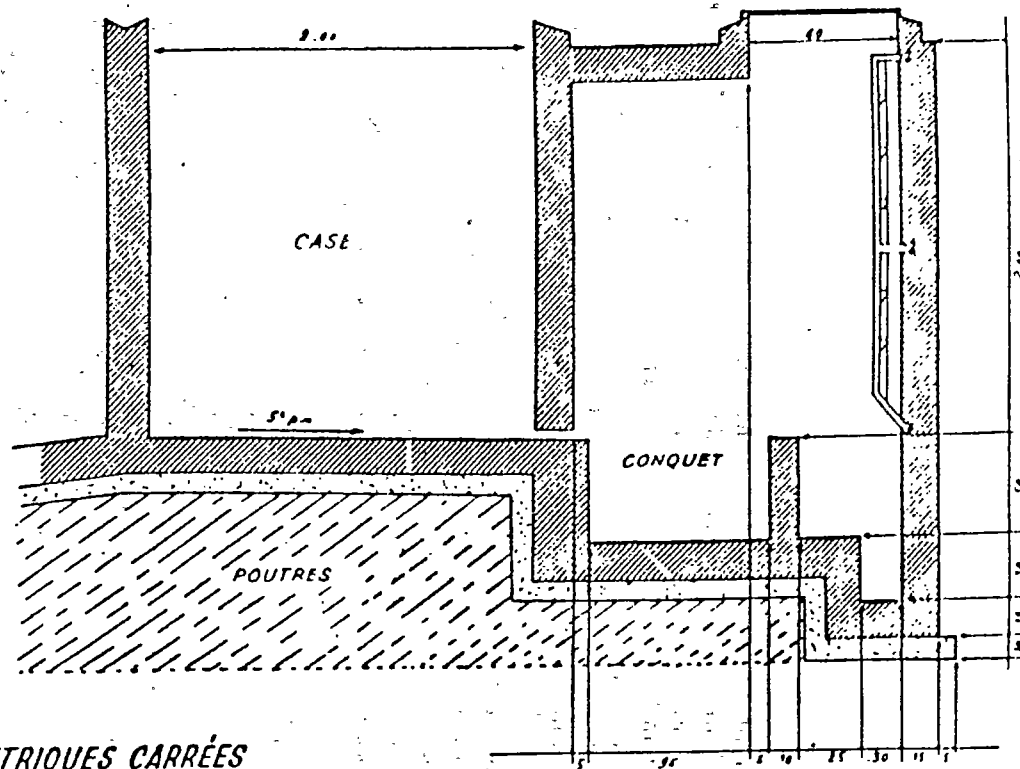


Photo II-5: Vue d'un bloc de 4 cases lysimétriques.



CASES LYSIMÉTRIQUES CARRÉES

FigII.9 Coupe d'une case lysimétrique

Les sols :

La construction date du début de 1955; le remplissage des cases par les sols s'est fait couche par couche en respectant la densité du sol in situ.

Pour chaque bloc on a :

-Deux cases remplies avec le sol existant sur sol INAT qui présentait les 3 couches suivantes:

1ère couche : de 0,8 à 1 m, remuée par défoncement.

2ème couche : de 1 m environ, de terre brune compacte.

3ème couche : de terre noire correspondant à un ancien sol enter-ré allant jusqu'au bras du profil, cette couche reposant sur 1 horizon calcaire.

-Une case remplie de terre rouge, de type sol marron sur colluvion rouge provenant d'une région peu éloignée de Tunis (Sidi Thabet).

Là aussi on a 3 couches :

1ère couche : 0,65 m d'épaisseur : terre beige-gris granuleuse

2ème couche : 0,57 m d'épaisseur : terre rouge à gravillons calcaires à tendance micropolyédrique.

3ème couche : 0,40 m d'épaisseur : rosée à gravillons calcaires, plus grise, les débris de la roche-mère gréseuse étant plus nombreux.

-Une case remplie de sable éolien de la Soukra.

Les caractéristiques physiques et chimiques de ces sols sont présentés au tableau II-17.

Les eaux :

On a employé dans cet essai, deux types d'eaux: Une eau usée provenant d'une station d'épuration expérimentale de l'INAT et l'eau du robinet, utilisée comme traitement témoin.

La composition de l'eau usée étant variable dans le temps, nous avons donc fait des prélèvements avant chaque irrigation, les chiffres donnés au tableau II-18 représentent donc une moyenne des différents prélèvements:

Tableau II-17 : Caractéristiques des sols.

Sol INAT:

Couches	GRANULOMETRIE (%)			D.A.	M.O (%)	CEC		Bases échangeables meq/100g				
	Argile	Limons	Sable			meq/100g	CaT (%)	CaA (%)	K+	Ca++	Mg++	Na+
0-20	30,5	25,0	44,5	1,54	1,04	29	40,3	14,5	2,5	23	3	0,3
20-40	35,2	28,3	36,5	1,49	0,83	26	42,5	13,3	1,35	22	3	0,2
40-60	33,9	22,6	43,5	1,55	0,83	28	43,6	13,8	1,45	24,5	2	0,15
60-80	33,3	21,9	44,8	1,56	0,76	30,0	43,8	13,5	1,35	25	4	0,2
80-100	33,0	21,7	45,3	1,58	0,69	28,5	43,2	16,0	1,45	25	2,5	0,4

Sol Sidi Thabet:

Couches	GRANULOMETRIE			D.A.	M.O. (%)	CEC		Bases échangeables meq/100g				
	Sables	Limons	Sable			meq/100g	CaT	CaA	K+	Ca++	Mg++	Na+
0-20	20,1	16,5	63,4	1,38	0,90	16	15,8	7,0	1,3	13	2	0,2
20-40	19,0	15,5	65,5	1,31	0,83	15,5	15,6	6,0	0,8	12,5	1,5	0,3
40-60	20,1	13,4	66,5	1,27	0,76	17,5	14,3	7,3	1,2	14	1,5	0,3
60-80	20,8	10,2	69,0	1,34	0,55	16,0	20,6	10,8	0,9	13	1,5	0,4
80-100	20,7	10,5	68,8	1,31	0,41	17,0	23,2	11,5	0,7	14	1,5	0,2

Sol Soukra:

Couches	GRANULOMETRIE			D.A.	M.O (%)	meq/100g	C.T (%)	C.A (%)
	Argile	Limons	Sable					
0-20	4,5	3,1	92,4	1,51	0,07	4,5	23,7	2,5
20-40	6,9	2,9	90,2	1,33	0,07	2,5	24,0	2,0
40-60	5,8	3,4	90,8	1,28	0	3,0	24,2	2,0
60-80	6,9	2,5	90,1	1,32	0	2,5	22,9	1,8
80-100	6,6	2,8	89,6	1,30	0	2,0	24,7	1,5

Tableau II-18 : Composition des eaux en meq/l

	PH	CE	Na+	Ca++	Mg++	K+	Cl-	SO4 =	SAR	Cl-/SO4=
Eau Usée	6,7	2,10	10,3	5,2	n.m.	0,5	11,0	3,9	-	2,8
Eau Rob.	7,6	1,75	8,9	4,9	n.m.	0,1	9,2	4,1	-	2,2
Eau Usée	7,2	1,70	8,5	5,6	2,1	0,4	8,9	3,8	4,3	2,3
Eau Rob.	7,4	1,10	6,8	4,3	1,6	0,07	6,0	2,8	4,0	2,1

L'eau usée apparaît donc un peu plus salée que l'eau du robinet, mais de faciès peu différent.

En 1986, nous avons déterminé les formes d'azote minéral et l'ion phosphate.

Tableau II-19 : Teneur en azote et phosphate des eaux (ppm)

	N total	NO3	NO2	NH4+	PO4---
Eau Usée	42,9	1,59	0,2	38,9	37,3
Eau Rob.	2,4	2,21	0	0	0

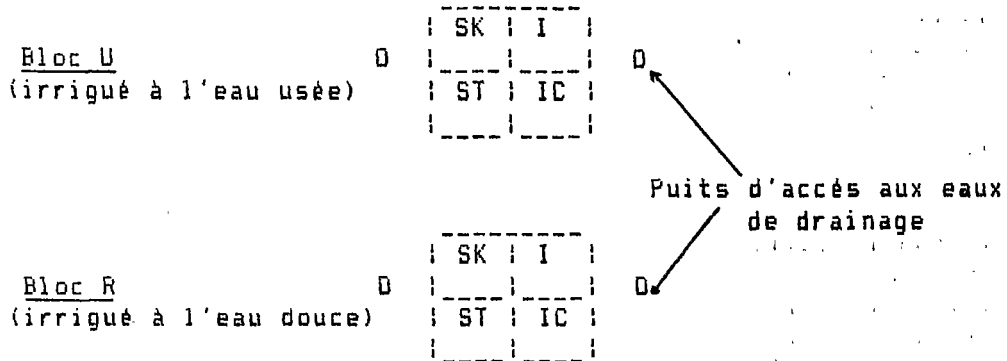
On constate que l'eau usée est beaucoup plus riche en azote (NH4) et en phosphate que l'eau du robinet.

Méthodes

Nous avons irrigué un bloc avec les eaux usées et un bloc avec de l'eau du robinet (Fig II-10). Dans chaque case, le matériel suivant a été installé (Fig II-11).

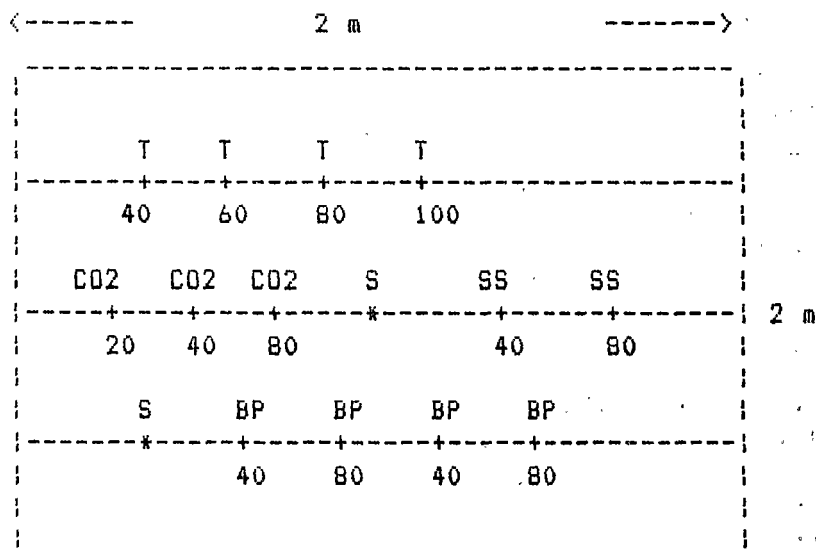
- Un tube d'accès de sonde à neutrons.
- 4 tensiomètres à 40; 60; 80 et 100 cm.
- 4 bougies poreuses à 40 et 80 cm (2 répétitions) pour l'extraction de la solution du sol.
- 3 tubes en cuivre avec une chambre de diffusion de gaz pour la mesure de CO2 de l'atmosphère du sol à 40-60 et 80 cm de profondeur.

Fig II-10: Dispositif des cases lysimétriques de l'I.N.A.T. (1986)



SK : sol sableux de la Soukra
 ST : sol marron de Sidi Thabet
 I : sol INAT non cultivé
 IC : sol INAT cultivé

Fig II-11 : Schéma de l'installation du matériel dans chaque case



T : tensiomètre
 CO2: Tube pour le prélèvement de CO2
 S : Tube d'accès de sonde à neutrons
 SS*: Salinity sensors
 BP : Bougie poreuse

* Les salinity sensors ne sont implantés que dans les cases INAT qui ont été cultivées (IC).

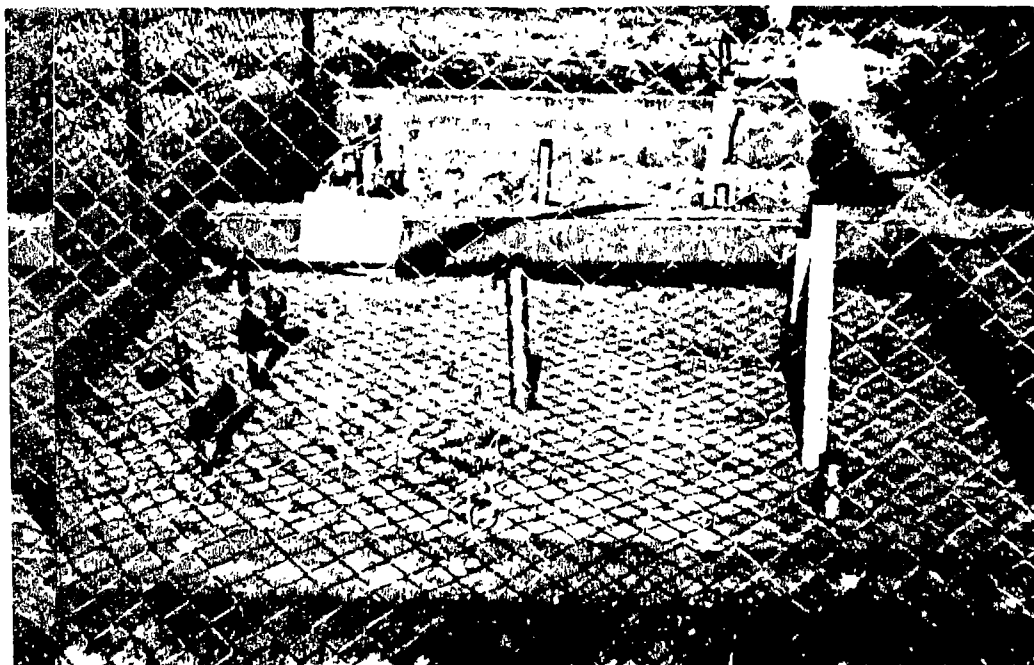


Photo II-6 : Matériel de mesure implanté sur les cases



Photo II-7 : Vue du puits de récupération des eaux de drainage

Des prélèvements de la solution du sol, de l'eau de drainage à la base de chaque case ont permis de suivre l'évolution de la conductivité électrique, le bilan ionique, les nitrates, la pollution bactérienne. De même le bilan hydrique fut établi pour chaque cycle d'irrigation.

Occupation des sols en 1986 :

Seule une case INAT dans chaque bloc a été cultivée par le cotonnier :

Le semis installé au mois de Mai et les irrigations se sont poursuivies jusqu'au 25/8/86 à raison de 60 mm par irrigation pour tous les sols. L'intervalle des irrigations est de 10 à 15 jours.

Occupation des sols en 1987 :

Le protocole a été modifié par rapport au précédent : Les trois types de sol ont été cultivés en cotonnier, une seule case INAT a été laissée nue dans les 2 blocs. Les irrigations se sont poursuivies jusqu'au 10/9/87 avec la même dose (60 mm) et la même fréquence que l'année d'avant.

Les observations et mesures ont été effectuées 1,3 et 6 jours après chaque irrigation. Dans certaines situations, la solution du sol et l'eau de drainage n'ont pu être obtenues, particulièrement dans les cases cultivées en fin de cycle végétatif.

Analyses bactériologiques :

Des prélèvements d'échantillons de sols à 40 et 80 cm de profondeur avant la 1ère irrigation ont permis de caractériser la situation bactériologique de départ par les techniques de suspension - dilution et N.P.P. en milieu liquide.

Après le début de l'expérimentation, les extraits des bougies poreuses à 40 et 80 cm de profondeur, et l'eau de drainage de chaque case ont fait l'objet de recherche et de numération bactériologique.

V-2. Résultats

Evolution de la salinité (Fig. II-13 à II-28 en annexes)

L'irrigation avec les 2 eaux provoque un accroissement significatif de la conductivité électrique de la solution du sol extraite au champ dans les bougies poreuses, dans les 3 types de sols, cultivés ou non et au cours des 2 cycles d'irrigation. Cependant, cette tendance à la salinisation est plus importante à l'eau usée qu'à l'eau du robinet. En plus, la culture contribue à accentuer davantage la concentration de la solution du sol.

Mais, au cours de la saison humide, les eaux pluviales (450 mm/an à Tunis) provoquent une lixiviation des sels accumulés dans le profil au cours de la période d'irrigation. Cela se voit nettement au démarrage de la période d'irrigation de 1987. Cela confirme les tendances observées à Kairouan.

Si nous comparons l'évolution de la salinité des sols, on pourra relever tout au plus un léger dépassement de la C.E dans le sol sableux de la Soukra. Ce serait dû à la faible capacité de rétention d'eau de ce sol où la solution du sol se concentre plus précocément que dans les autres sols. Par ailleurs, les sols INAT (I) et Sidi THABET (S.T) se sont comportés de la même manière.

Le faciès chimique de cette salinité n'a pas changé (chloruré sodique). Quant au S.A.R. il évolue parallèlement à la C.E. de la solution du sol : Une légère augmentation pendant la saison de l'irrigation, sans atteindre des valeurs inquiétantes. Puis, on note un retour au point de départ à la fin de la saison humide.

Les nitrates : (Fig. II-29 à II-32 en annexes)

Mentionnons d'abord que l'année 1985-86 a été particulièrement sèche à Tunis. Ceci a eu pour conséquence le stockage dans le profil des engrais azotés hérités du précédent cultural du cotonnier, et de l'azote provenant de la minéralisation de la matière organique.

On comprend alors pourquoi dans tous les sols les teneurs en nitrates sont plus élevées en 1986 qu'en 87. En outre, en 1987, tous les sols ont porté la culture du cotonnier qui a joué un rôle dans le bilan azoté.

Dans l'ensemble, les teneurs des sols en nitrates sont très élevées. Mais on note des différences qui méritent d'être soulignées :

-À l'eau usée, les teneurs sont plus élevées qu'à l'eau douce. Cela est normal. L'ammoniac apporté par l'eau résiduaire est très vite minéralisé: Une partie est drainée, le reste est stocké dans le profil.

-Sous culture, le stock des nitrates est généralement épuisé du sol en fin du cycle du cotonnier. Par contre, l'eau de drainage qu'on obtient 24 heures après l'irrigation se concentre progressivement au cours de l'été et la concentration atteinte à la sortie du profil semble être fonction de la texture. Le tableau II-20 montre cette tendance.

Tableau II-20 : Teneurs maximales en nitrates de l'eau de drainage (ppm).

Sol	Eau du robinet	Eau Usée
SDUKRA Cultivé	50	150
INAT sans culture	< 25	< 25
INAT cultivé	50	75
S.T. Cultivé	< 25	50 - 100

Ceci montre que l'eau de drainage, à 2 m de profondeur constitue une source de pollution par les nitrates qui peuvent rejoindre les nappes phréatiques.

Pollution du sol et de l'eau de drainage par les microorganismes pathogènes:

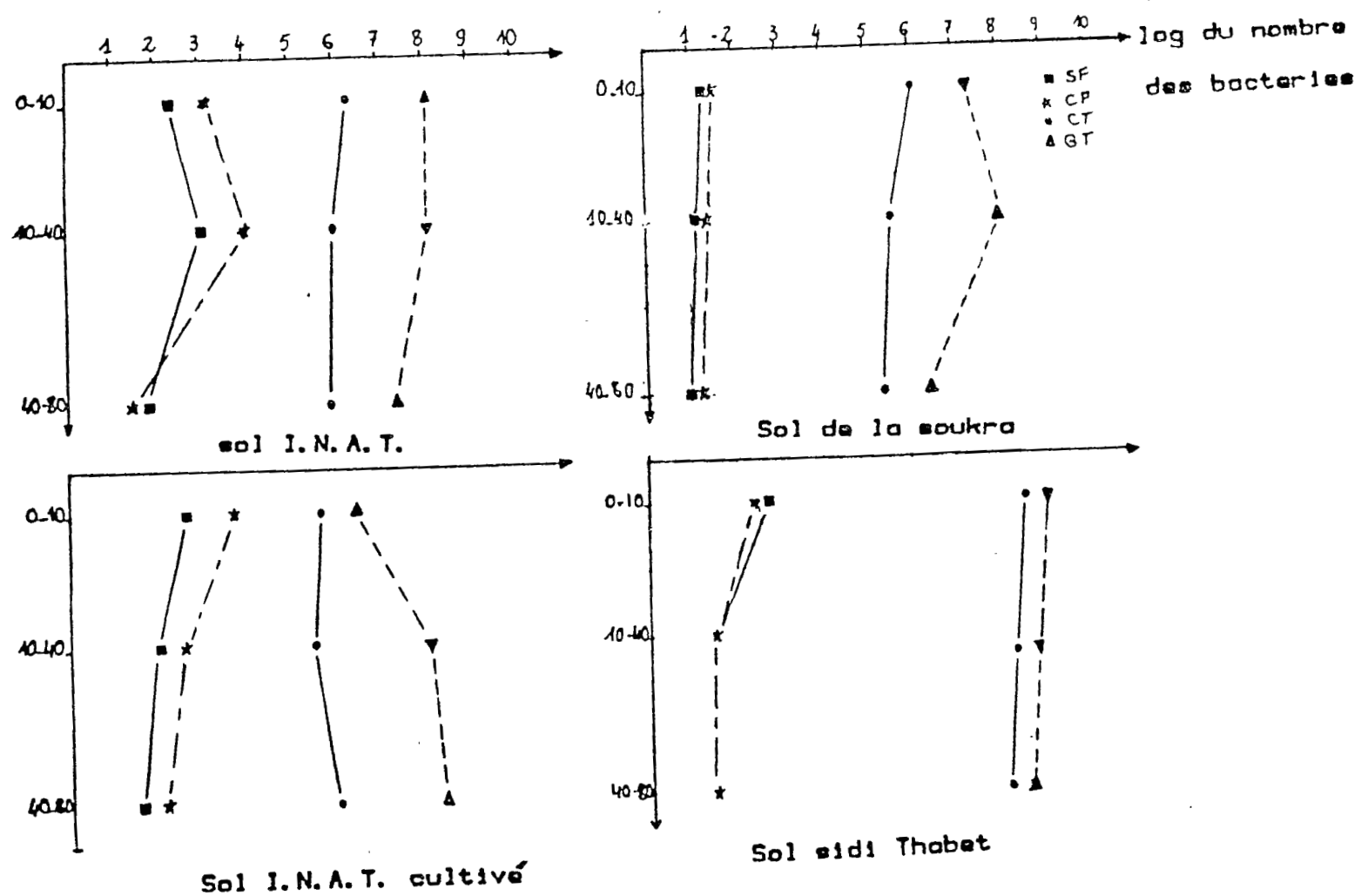
La situation bactériologique des sols avant leur irrigation est résumée à la figure II-12.

L'évolution de la dissémination des bactéries indicatrices de pollution fécale s'est basée sur l'établissement du profil du peuplement bactérien de 8 cases lysimétriques, et la numération des bactéries mésophiles, des coliformes totaux et fécaux thermotolérants ainsi que les streptocoques fécaux, et ceci dans les eaux de drainage après irrigation avec les eaux usées et l'eau du robinet. Les caractéristiques biologiques de ces eaux sont données au tableau II-21.

Tableau II-21 : Caractéristiques biologiques des eaux d'irrigation.

		/ 100 ml			
		G.T à 37 °C	C.T à 37 °C	C.F.T.T. à 44 °C	S.F. à 37 °C
Eau usée	25/7/86	> 1,1x10	> 1,1x10	> 1,1x10	> 2x10
INAT	11/8/86	> 1,1x10	> 0,3x10	> 0,3x10	> 0,3x10
Eau du robinet		> 1,1x 10	< 3	-	< 3

- G.T = Germes totaux
 G.T = Coliformes totaux
 C.F.T.T. = Coliformes fécaux thermotolérants
 S.F. = Streptocoques fécaux.



FigII.12 Profil de la répartition bacterienne dans les sols à l'état initial.

Après la mise en eau des cases, les analyses bactériologiques des extraits des bougies poreuses à 40 et 80 cm de profondeur ont révélé des résultats tous négatifs pour les coliformes thermo-tolérants et les streptocoques fécaux. Quant à la numération totale des bactéries mésophiles elle n'a pas révélé des différences entre les sols (de l'ordre de 10^9 / 100 ml de solution). Ce résultat laisse penser à une sélectivité probable au niveau de la porosité des bougies, vis à vis des micro-organismes.

Pour cette raison, notre attention a été concentrée surtout sur les eaux de drainage des différentes cases. Les analyses bactériologiques de ces eaux ont donné :

-Le nombre total de bactéries mésophiles est généralement supérieur à 10^7 bactéries/100 ml. Si on compare ce nombre avec celui des eaux usées d'irrigation, il lui est en moyenne souvent inférieur d'une unité décimale, mais supérieure d'une unité décimale à celui de l'eau potable. Mais en fin de compte, ce nombre de bactérie mésophile n'apporte pas de renseignement précis vu le grand nombre de bactéries se trouvant également dans les eaux d'irrigations et les sols.

-Le dépistage des germes coliformes fécaux thermo-tolérants et Streptocoques n'a pas apporté suffisamment de preuve d'une infiltration de ces germes au travers du profil des sols, car ces germes peuvent être d'origine tellurique puisque les *E. Coli* (coliformes thermo-tolérants) et *Streptococcus faecalis* var *liquefaciens* (streptocoques fécaux) sont très répandus dans le milieu naturel.

-La contamination des eaux de drainage avec les eaux usées n'est pas significativement différente de celle des eaux de drainage récupérées après irrigation à l'eau de ville.

Conclusion :

Les observations des 2 années consécutives n'ont pas donné de preuve de migration verticale des germes à 2 m de profondeur des 3 types de sols, dans les cases irriguées à l'eau usée plus que dans les cases irriguées à l'eau potable. Le sol aura-t-il joué sa fonction d'auto-épuration quant aux germes pathogènes apportés par les eaux usées ? Nous pouvons le penser, mais il serait nécessaire de continuer les observations pendant quelques années avant de pouvoir affirmer qu'il n'y a pas de risque de contamination.

Réponse de la culture de cotonnier à l'eau usée :

Exception faite du sol sableux de la SOUKRA, l'eau usée a eu sur les 2 autres sols un effet positif sur le rendement de la culture du cotonnier, comparé à celui obtenu avec l'eau du robinet, pendant les deux années consécutives. Le tableau II-22 rapporte les rendements obtenus en 1987.

Tableau II- 22 : Rendement du cotonnier en 1987 en cases lysimétriques.

Sol	Eau	Rendement qx/ha
Soukra (SK)	U	4,48
	R	7
Sidi Thabet (S.T)	U	30,3
	R	20,7
INAT (I)	U	33
	R	16,8

L'accroissement de la production enregistré, sans fertilisation, varie de 50 à 100 % du rendement à l'eau de ville.

Cet effet est du certainement à l'apport par les eaux usées des quantités très importantes d'éléments nutritifs immédiatement assimilables (N.P.K.). Mais il semble exister une interaction entre la qualité de l'eau et le type du sol (teneur en argile, C.E.C...).

Par ailleurs, dans le sol très pauvre de la SOUKRA, l'eau usée semble avoir même un effet dépressif sur la production végétale. La confirmation de cette tendance ainsi que son explication nécessite la poursuite des observations pendant encore quelques années.

V-3. Conclusion

En cases lysimétriques, nous avons enregistré des résultats qui confirment les observations faites au champ à Kairouan. L'irrigation à l'eau usée provoque une légère salinisation du sol, que les pluies hivernales finissent par rabattre au niveau initial.

Cependant, les eaux de drainage se sont avérées très riches en nitrates, ce qui constitue une source de pollution du sous-sol et probablement des nappes phréatiques.

Par contre les analyses bactériologiques n'ont pas révélé de preuves d'infiltration de germes pathogènes dans le sous-sol. Le sol aura joué son rôle d'auto-épuration biologique.

Finalement, l'eau usée a une grande productivité sur le plan agronomique, grâce à sa richesse en éléments nutritifs.

CONCLUSIONS GENERALES

Les travaux réalisés sur deux périmètres irrigués très différents de Tunisie permettent de tirer un certain nombre d'enseignements sur l'utilité et la pratique de la simulation de l'évolution de la salure des sols.

Il convient cependant de noter que les travaux n'ont pas toujours pu être menés selon le protocole initial, par suite de pannes du matériel de terrain ou du retard de certaines opérations. Seul le périmètre de ZELBA a pu être correctement étudié, notamment au point de vue de la simulation ponctuelle; par contre la simulation spatiale n'a pu qu'être abordée.

Malgré ces restrictions, les résultats obtenus sont importants, tant sur le plan méthodologique que sur celui de l'évolution simulée et contrôlée de la salinisation du périmètre, phénomène que pouvait faire craindre l'utilisation d'une eau titrant plus de 4 grammes de sels par litre.

Méthodologie

Pour le choix des sites de simulation, on a pu constater qu'une bonne étude pédologique était un préalable important pour mettre en évidence les variations morphologiques, texturales et structurales, les obstacles en profondeur. Cela doit permettre de placer une station expérimentale sur le sol dominant.

Une étude géostatistique basée sur un maillage d'observations permet de faciliter ce travail. Cette étude peut également porter sur certaines caractéristiques hydriques et hydrodynamiques du sol: teneur en eau maxima, perméabilité par horizons (Muntz ou Porchet), dont la liaison est évidente avec la conductibilité hydraulique qui est prise en compte par le modèle de simulation.

Par ailleurs, le bon choix des sites d'essai complémentaires est aussi important que celui de la station principale.

Conduite des essais

La réalisation d'un essai d'infiltration complet, comprenant des séries conjointes de mesures neutroniques et tensiométriques, est assez complexe et coûteux, pour un résultat final qui n'est guère meilleur qu'avec un dispositif allégé. Cependant, l'utilisation de capteurs de la salure bien observés et le contrôle précis des doses d'irrigation s'avèrent nécessaires pour la mise au point des simulations.

Il n'a pas été possible de conduire les essais sur les parcelles complémentaires avant la mise en culture; les résultats obtenus sous culture ont cependant permis de montrer qu'il était possible de caler les simulations à partir des paramètres de la station principale, moyennant des tâtonnements réduits, ce qui

est très encourageant pour l'avenir, dans le cas de sols pas trop différents, les variations étant le plus souvent réduites à des différences de profondeur et de structure des horizons.

Simulation

L'adaptation du modèle SIMUL (RIEU 1983) au BASIC a permis de rendre son utilisation beaucoup plus aisée.

Le calage préliminaire impose de disposer d'une série de profils hydriques témoins des phases d'infiltration, de drainage interne et de bilan naturel. Ceci est surtout vrai pour la station principale, car pour les sites complémentaires, il a suffi de prélever des échantillons représentatifs des états "secs" précédant les irrigations. Quelques simulations suffisent en général dans les deux cas pour parvenir à une bonne restitution des profils de contrôle.

Cependant, comme on l'a remarqué au cours de cette étude, il faut s'attendre à d'assez fortes modifications des caractéristiques hydrodynamiques du sol, quand il passe brutalement d'un régime relativement aride (300 à 400 mm de pluies annuelles) à une forte irrigation. Il est donc indispensable de contrôler les paramètres précédemment obtenus sur une ou plusieurs périodes inter-irrigation après quelques mois de mise en eau.

Finalement seule une série de contrôles portant sur une année agricole complète peut permettre de valider correctement les paramètres des simulations. Des simulations prévisionnelles de plus longue durée, quelques années par exemple, peuvent alors être envisagées, à condition de connaître avec assez de précision les quantités d'eau qui seront effectivement appliquées et les dates de ces apports, ce qui nécessite évidemment une surveillance étroite du périmètre.

La surveillance est d'autant plus nécessaire qu'il sera sans doute indispensable de retoucher les paramètres de calcul, que l'on ne peut jamais considérer comme définitifs.

Là se pose le problème de la simulation de l'évolution de la salure avant l'implantation d'un périmètre. Puisque l'on ne peut disposer dans ce cas que d'essais préliminaires, il faudra s'appuyer sur l'expérience vécue ailleurs, sur des sols suffisamment proches, pour des études de factibilité.

Résultats obtenus

Le calage de la simulation sur l'essai d'infiltration et entre irrigations a été réalisé sans problèmes majeurs.

Pour les simulations de plus longue durée, deux, puis quatre mois, on a dû faire des hypothèses sur les "crop-factors" à appliquer à la culture considérée (luzerne pour la parcelle expérimentale, coton pour les essais complémentaires).

Les choix faits se sont révélés bons car on a obtenu une reproduction correcte des profils de teneurs en eau et de conductivité, moyennant l'hypothèse simplificatrice selon laquelle les transferts de solutés se feraient surtout par dilution-concentration, ce qui n'est pas tout à fait exact compte-tenu des essais complets réalisés avec SIMUL.

En fait, pour obtenir un bilan d'eau correct, il faut jouer sur deux actions complémentaires, la consommation et le drainage. Si l'on augmente la première en augmentant le crop-factor, on obtient une diminution du second, mais dans ce cas on augmente la salure. Dans le cas contraire, c'est à un effet inverse qu'il faut s'attendre.

Ainsi donc, après que l'on ait correctement simulé la reproduction des profils hydriques de contrôle, c'est en jouant sur la consommation que l'on pourra obtenir des profils salins conformes.

Il n'est peut-être pas inutile de noter qu'il s'agit là d'approximations assez grossières, mais justifiées par les résultats obtenus, et qui donnent à la méthode sa facilité d'utilisation.

On peut donc espérer que la répétition de telles études dans les sites d'irrigation les plus divers permettra d'acquérir un "catalogue" des comportements prévisibles des sols irrigués, et surtout une méthode de "suivi" applicable très généralement.

Quant à l'utilisation de l'eau usée traitée sur un sol alluvionnaire de texture argileuse, salsodique, couvert par une couche d'alluvion sableuse, cultivé en cotonnier, avec des doses de 50 mm, elle n'a pas permis d'induire une dessalinisation décelable à l'échelle d'une année. Bien au contraire, nous avons noté une certaine salinisation des horizons de surface, mais qui se corrige naturellement par les eaux pluviales qui ramènent le profil salin à sa situation initiale.

La cause du mauvais fonctionnement du processus du dessalement du sol par les eaux usées est à rattacher à la très faible perméabilité du matériaux argileux alluvionnaire. Mais malgré cela, ce sol auparavant inculte, a donné à l'eau usée des résultats très satisfaisants même sans fertilisation, avec le cotonnier. Comparée à une eau non usée de même salinité que celle de l'eau résiduaire traitée, cette dernière a donné 21 qx/ha contre 16 qx/ha de coton pour l'autre eau d'irrigation.

D'un autre côté, une pré-irrigation à des fortes doses (jusqu'à 450 mm) n'a provoqué qu'une dessalinisation très partielle du sol en surface: la discontinuité texturale entre l'horizon sableux superficiel et les couches argileuses sous-jacentes a favorisé plutôt un écoulement hypodermique latéral qu'une infiltration verticale. Et au laboratoire, il s'est avéré qu'un amende-

ment du sol par le chlorure de calcium (très soluble) à raison de 30 t/ha, améliore nettement l'infiltration de l'eau usée dans le même sol. Il serait alors intéressant de chercher à l'avenir à vérifier au champ l'effet de ce genre d'amendement combiné avec des techniques d'ameublissement des 50 premiers centimètres du sol en place.

Par ailleurs, utilisée sur des sols sains (non salés) de textures différentes reconstitués en cases lysimétriques, l'eau usée a causé pendant la période d'irrigation estivale une légère salinisation du profil. Ce résultat concorde avec ce qui a été observé au champ. De même cette salinisation est fugace, et les eaux pluviales se sont chargées de lixivier les sels.

Par contre, les eaux usées provoquent une accumulation importante d'azote nitrique dans le sol et dans les eaux de drainage. Cet azote nitrique provient de la nitrification de l'ammoniac apporté par l'eau usée (autour de 40 meq/l). Dans l'eau de drainage récupérée à 2 m de profondeur, nous avons enregistré des concentrations de 150 meq/l pendant la période de l'irrigation. Et comme pour les autres ions, les nitrates sont entièrement évacués au bas du profil. Ce qui constitue un haut risque de pollution des nappes phréatiques peu profondes, qui dans le contexte rural tunisien, servent à fournir l'eau potable.

Cependant, l'analyse bactériologique de la solution du sol et de l'eau de drainage n'a pas révélé de preuve d'une migration verticale des germes fécaux avec les eaux usées plus qu'avec l'eau témoin non usée. Ce résultat qui reste à confirmer sur le sol en place, semble prouver un bon fonctionnement du pouvoir auto-épurateur des 3 sols considérés. Les germes étudiés seraient bloqués dans les couches superficielles, même dans le sol sableux très perméable.

BIBLIOGRAPHIE

1ère Partie

- AGRAR, 1977. Aménagement hydro-agricole de l'Oued Bou Heurthma. Données de base, 139 p.
- BOIVIN P., 1986. GEDSOL, Programme conversationnel de calcul géostatistique pour micro-ordinateur. DRSTOM-Dakar.
- BOIVIN P., 1987. Etude de la variabilité spatiale du pH de quelques sols sulfatés acides et potentiellement sulfatés acides en Basse Casamance. DRSTOM-Dakar, 17 p.
- BOUSNINA H., 1984. Comparaison de différentes méthodes d'étude des propriétés hydrodynamiques d'un sol à texture fine. Mém. INAT, 162 p.
- CHATTAOUI T., DUFEY J.E., LAUDELOUT., 1977. Simulation physique et mathématique du mouvement des sels dans les sols de la Haute Vallée de la Mejerdah de Tunisie. Sols de Tunisie, 9. Dir. Sols: p. 108-147.
- COLOMBANI J., LAMAGAT J.P. et THIEBAUX 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. DRSTOM., sér. Hydrol., vol. IX, n° 3: pp. 15-46.
- CRUESI-PNUD/UNESCO, 1970. Recherche et formation en matière d'irrigation avec des eaux salées (1962-1969). Rapport technique, 243 p.
- DOORENBOS J., PRUITT W.D. et al., 1975. Les besoins en eau des cultures. Bull. Irr. Dr. N° 24, FAO, Rome, 198 p.
- FAO, 1975. Réponse des rendements à l'eau. Bull. Irr. Dr. N° 33, Rome: p. 85-89.
- GASCUEL-ODOUX Ch., 1984. Application de la géostatistique à l'étude de la variabilité spatiale des propriétés hydriques du sol. Thèse Doc. Ing. ENSM- Paris, 235 p.
- HACHICHA M., 1987. Exploitation de données: traitement informatique d'un suivi de l'évolution de la salure du sol par des capteurs-analyse géostatistique. Rap. Stage. Dir. Sols. ES-235, 19 p.
- LAUDELOUT H., DUFEY J.E. & SHETA T.H., 1979. Ionic equilibria in semi-arid soils. 14th Coll. of the Int. Potash. Inst. On soils in mediterranean type climates and their yield potential. Sevilla, Spain. Preprints: pp. 99-114.
- RIEU M., 1983. Simulation numérique des flux hydriques et prédiction de la salinité dans les sols. DRSTOM-Paris, 161 p.
- RIEU M., BEN ZINA N., 1985. Préviation de la salinisation des sols dans les périmètres irrigués - Périmètre de Bou Salem. Dir. Sols ES-216, 64 p.
- SOUISSI A., 1977. Notice sur les études pédologiques de la Haute Vallée de la Mejerdah. Dir. Sols E. 433.

- VALLES V., VALLES A.M. 1982. Etude méthodologique des transferts d'eau et des sels dans un monolithe de sol argileux, 2ème Partie. DRES-ORSTOM.ES-199, 47 p.
- VALLES V., VALLES A.M. & VIEILLEFON J. 1983. Etude méthodologique des transferts d'eau et des sels dans un monolithe de sol argileux, 3ème Partie. DRES-ORSTOM.ES-203, 70 p.
- VALLES V., 1985. Etude et modélisation des transferts d'eau et de sels dans un sol argileux. Application au calcul des doses d'irrigation. Thèse Doc. INP. Toulouse, 146 p.
- VIEILLEFON J., ZANTE P. 1981. Etude du régime hydrique et de la salure en périmètre irrigué sur sol gypseux salé. DRES-ORSTOM.ES-190, 101 p.
- VIEILLEFON J., OLIVE Ph. & HUBERT P. 1983. Etude méthodologique des transferts d'eau et de sels dans un monolithe de sol argileux, 1ème Partie. DRES-ORSTOM.ES-198, 36 p.
- VIEILLEFON J. 1985. Essai de traitement automatique des mesures de perméabilité des sols par la méthode PORCHET. Programme de calcul PERPOR.DS-ORSTOM, 14 p.
- WIDMOSER P., 1984. Programme d'actions pour la maîtrise de la salinité et pour les mesures d'amendements des sols dans et P.I de BDU HEURTHMA. GTZ-OMVPI. JENDOUBA, 78 p.

2ème Partie:

- BACHELIER G. 1966. Dosage du carbone minéralisable des sols. Cahiers ORSTOM série Pédologie IV, n°2, p. 99 à 101.
- BELKHODJA K. 1970. Origine, évolution et caractères de la salinité dans les sols de la plaine de Kairouan Thèse doct.-ing. Toulouse. Bull. Division des sols no. 4. DRES-Tunis.
- BOULAIN J., 1954. La Sebkhah BEN ZIANE et sa lunette ou bourrelet, exemple de complexe morphologique formé par la dégradation éolienne de sols salés. Rev. Géomorph. Dyn, 5e année. no.3, 102-123.
- BULLOCK P., FEDOROFF N., JONGERIUS A., STOOPS G. & TURSINA T., 1985. Handbook for soil thin section description. Waine Research Publ. Wolverhampton. 152 p.
- COQUE R., 1979. Sur la place du vent dans l'érosion en milieu aride. L'exemple de lunettes (bourrelets éoliens) de la Tunisie. Méditerranée no. 1 et 2. 15-21.
- FRENKEL H., PRATHER R.J., GOERTZEN S.O. & RHODES J.D. 1978. Efficient amendment use in sodic soil reclamation Soil Sc. Soc. of Am. J. -vol 42 -n° 5, p.782-786.

- HACHICHA M., M'HIRI A. & STOOPS G., 1987. Aspects-micromorphologiques de l'évolution des sols de lunettes argileuses en Tunisie. *Micromorphologie des Sols-AFES*, P 193-196.
- HENIN S., GRAS R. & MONNIER G. 1969. Le profil cultural- 1 état physique du sol et ses conséquences agronomiques de sol. MASSON et Cie Ed. 332 p.
- HILLS E.S.N. 1940. The lunette, a new land form of aeolian origin. *The Australian Geographer*, vol. 3, no 7, 15-21.
- JAUZEIN A., 1967. Contribution à l'étude géologique des confins de la Dorsale Tunisienne. Thèse d'Etat, 1962. *Ann. des Mines et de Géologie*. no 22. Service géologique, Tunis.
- PERTHUISOT J.P. & JAUZEIN A., 1975. Sebkhass et dunes d'argile: l'enclave endoréique du Pont du Fahs, Tunisie. *Rev. de géogr. phys. et de géodyn.*, 2. vol. XVII, fasc. 3, 295-306.
- ZNAZEN S. 1982. L'utilisation des eaux usées en irrigation dans un sol salin- Création d'un périmètre irrigué expérimental à Draa Tammar - Kairouan. Mémoire de fin d'étude de cycle de spécialisation INAT- 1982.

A N N E X E

2ème Partie

Légende des figures 13 à 32

Figures 13 à 16 : Evolution de la conductivité électrique.

Figures 17 à 20 : Evolution des concentrations des anions.

Figures 21 à 24 ; Evolution des concentrations en Ca et en Mg .

Figures 25 à 28 : Evolution des concentrations en Na.

Figures 29 à 32 : Evolution des Nitrates.

Case R SK : Case lysimétrique du sol Soukra irriguée à l'eau du robinet.

Case U SK : Case lysimétrique du sol Soukra irriguée à l'eau usée.

Case R ST : Case lysimétrique du sol Sidi Thabet irriguée à l'eau du robinet.

Case U ST : Case lysimétrique du sol Sidi Thabet irriguée à l'eau usée.

Case R I : Case lysimétrique du sol INAT irriguée à l'eau du robinet.

Case U I : Case lysimétrique du sol INAT irriguée à l'eau usée.

Case R IC : Case lysimétrique du sol INAT cultivé irriguée à l'eau du robinet .

Case U IC : Case lysimétrique du sol INAT cultivé irriguée à l'eau usée .

Indice 40 : prélèvement de la solution du sol à 40 cm de profondeur

Indice 80 : prélèvement de la solution du sol à 80 cm de profondeur.

CE 40 : Conductivité électrique mesurée à la profondeur de 40 cm.

CE 80 : Conductivité électrique mesurée à la profondeur de 80 cm.

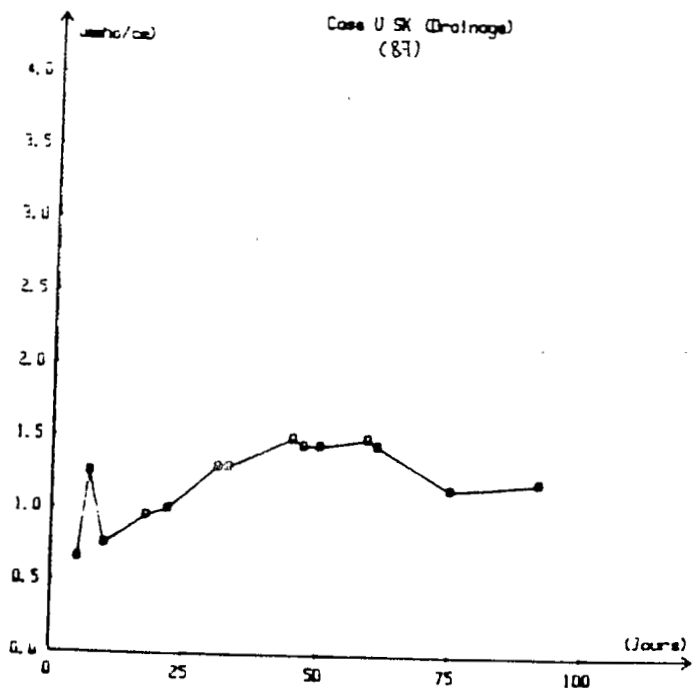
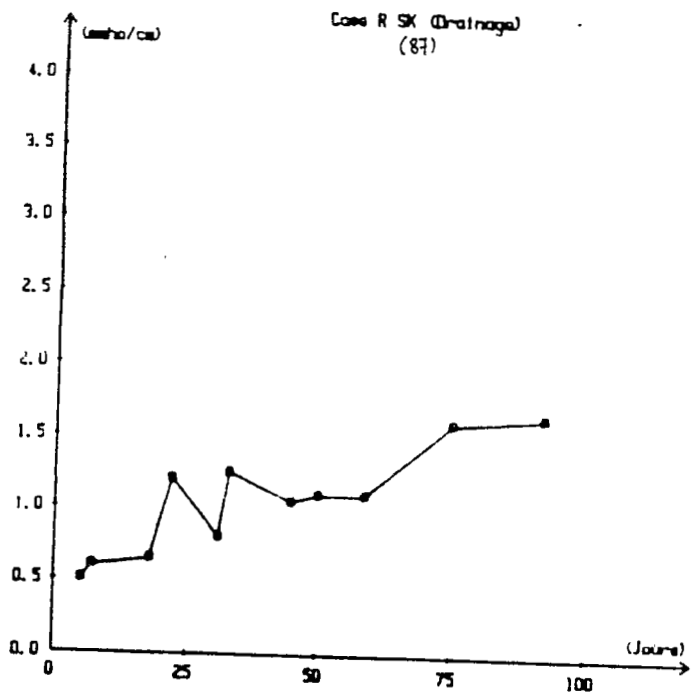
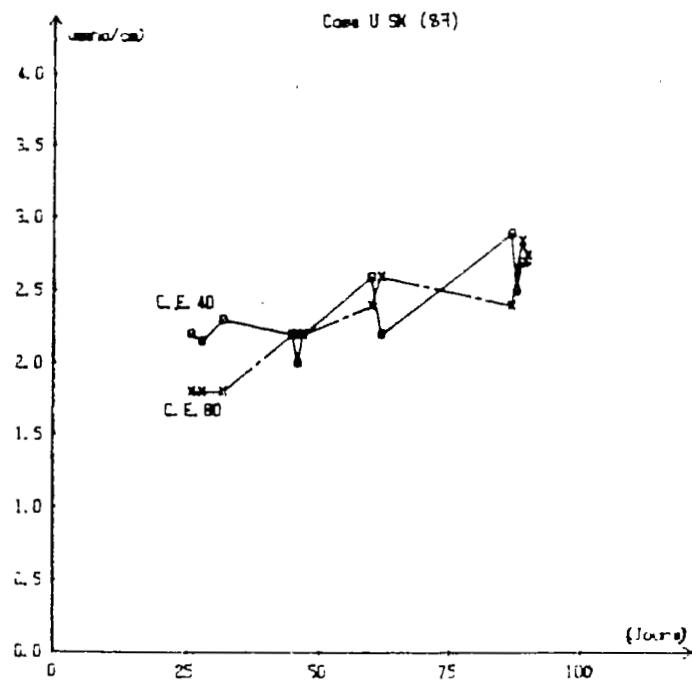
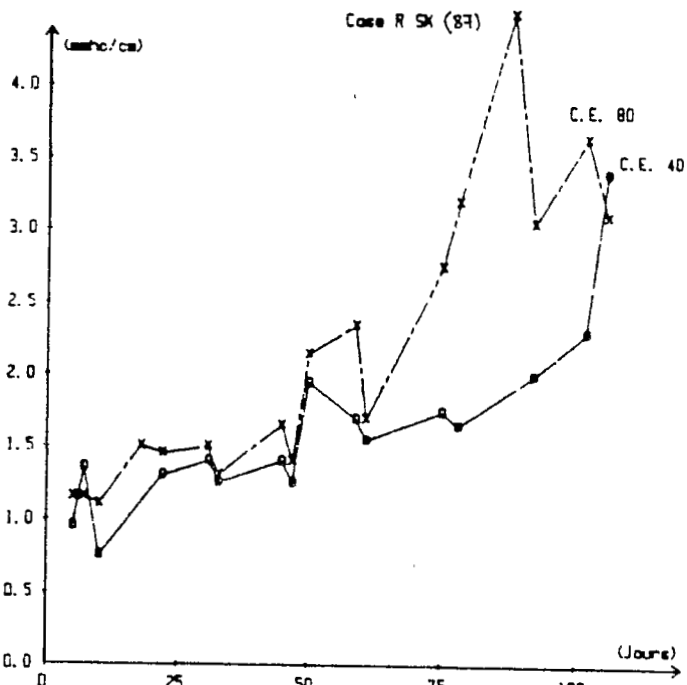
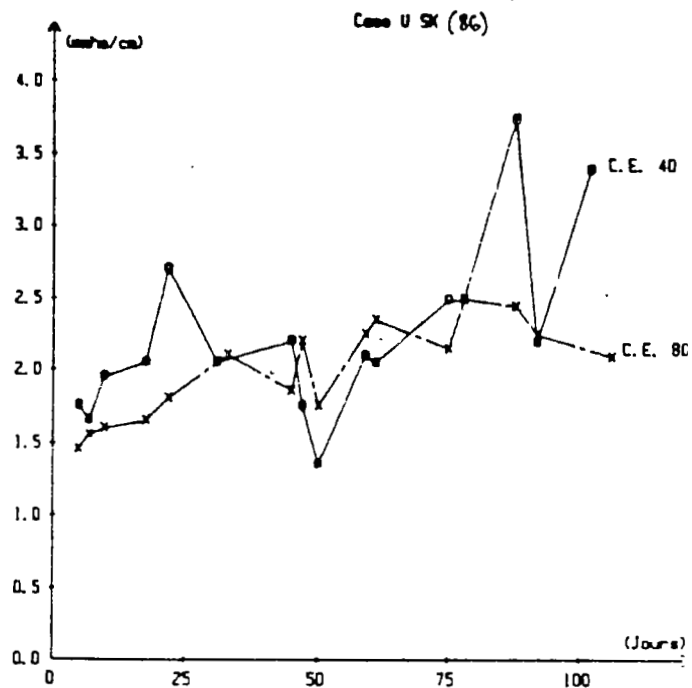
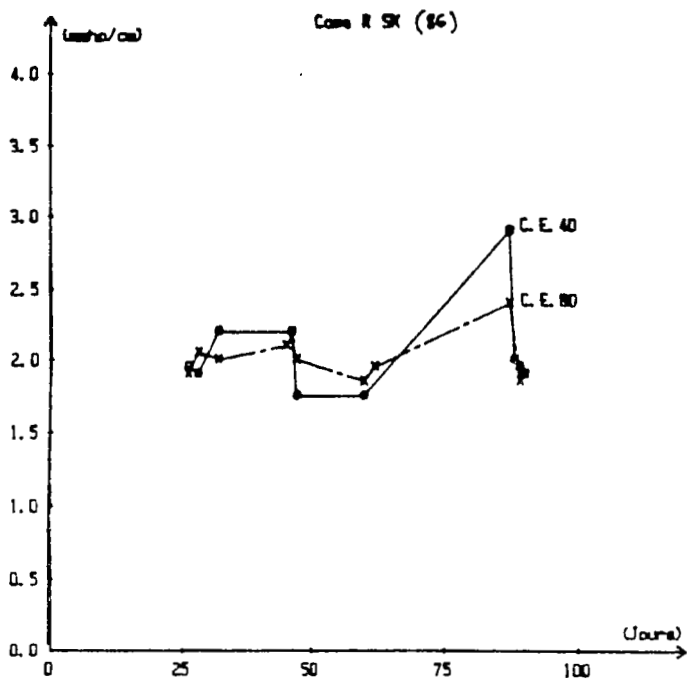
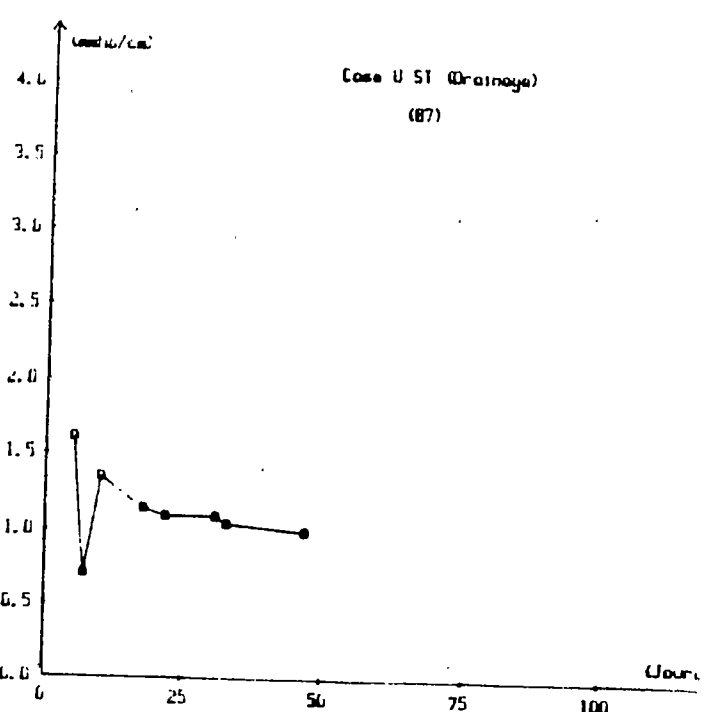
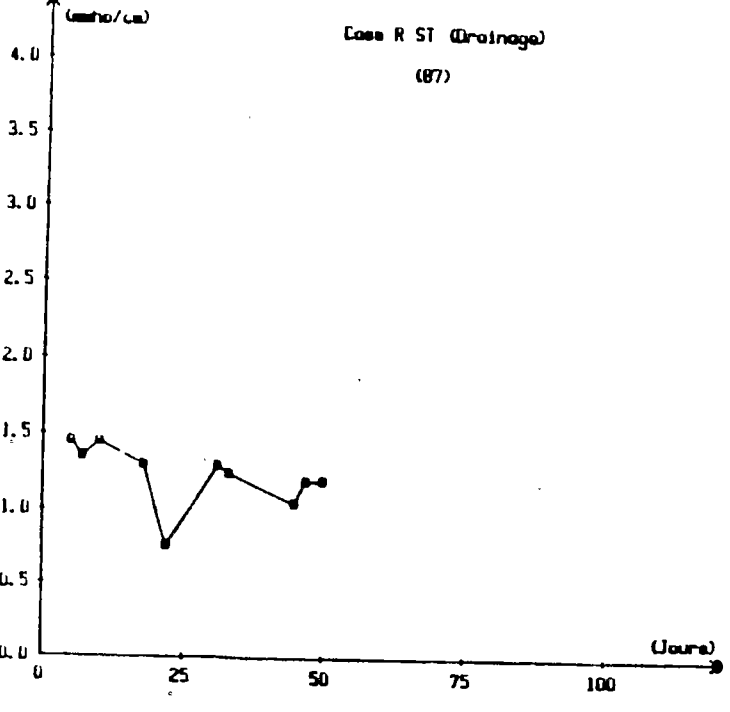
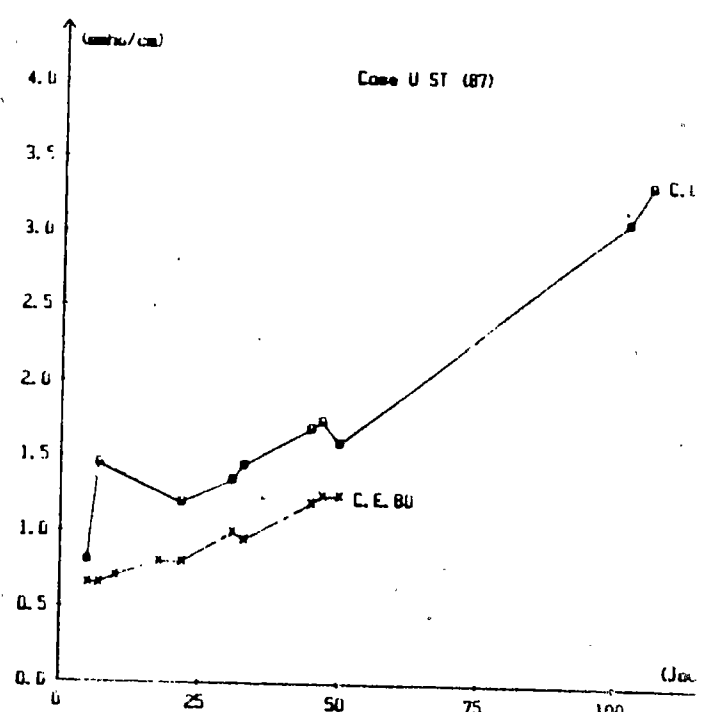
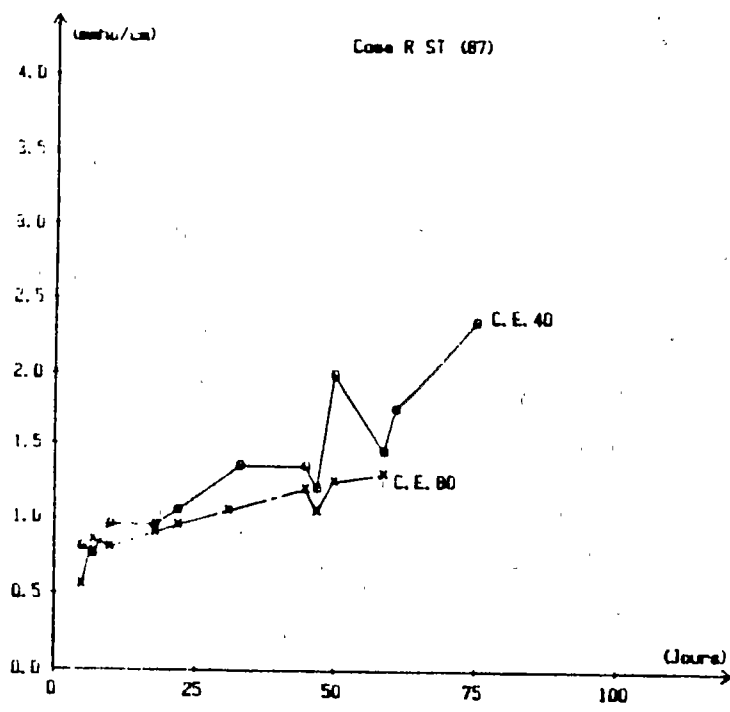
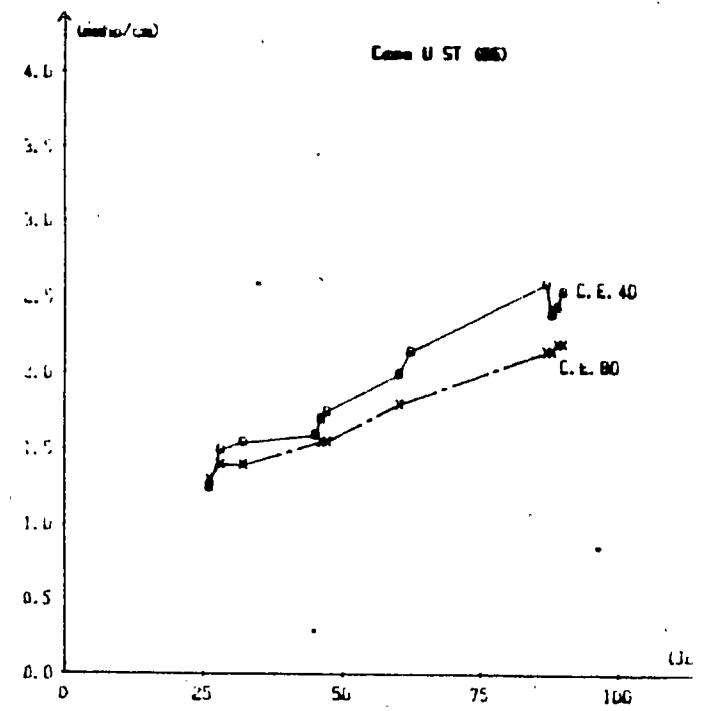
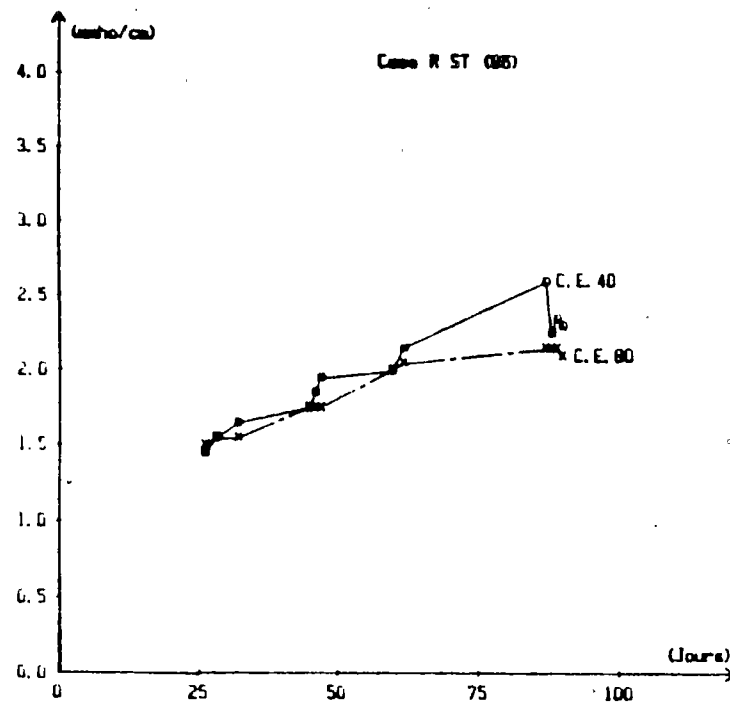


FIG. 13 EVOLUTION DE LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE



FigII.14 EVOLUTION DE LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE

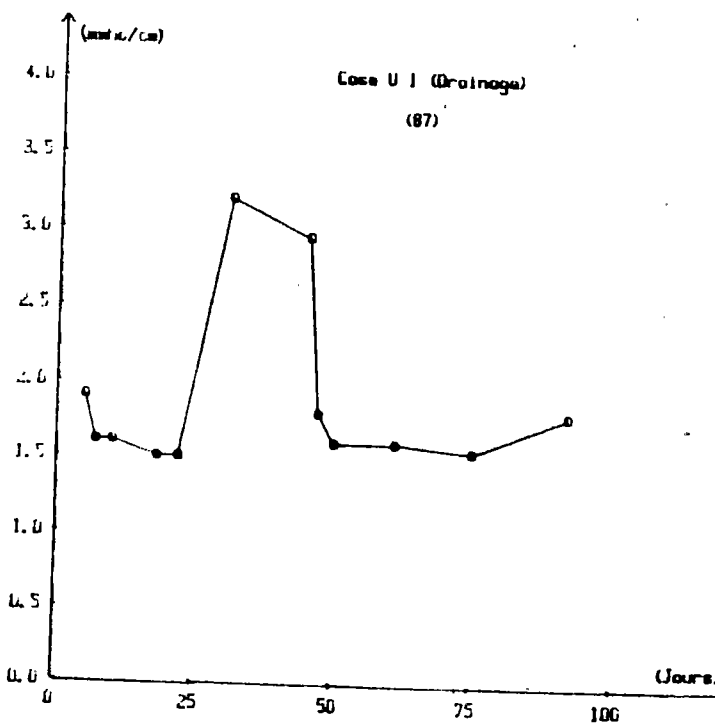
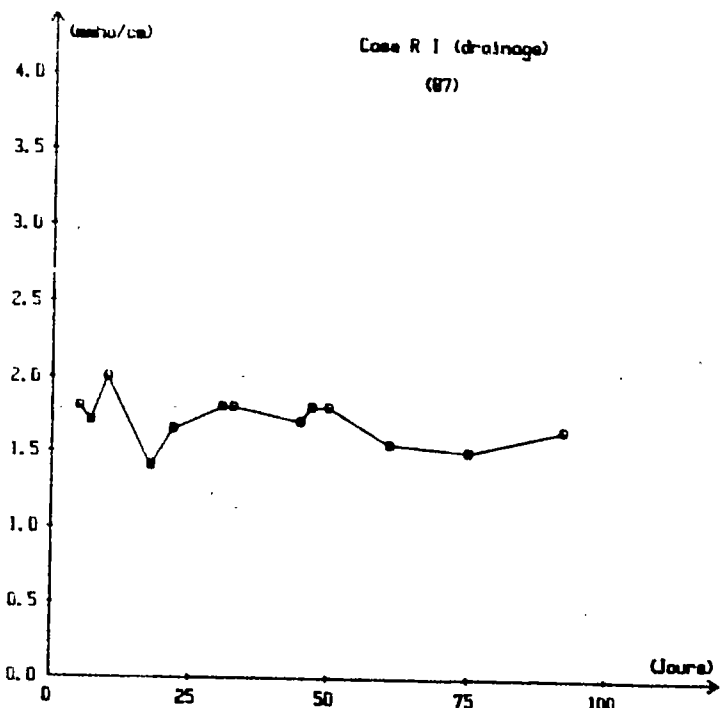
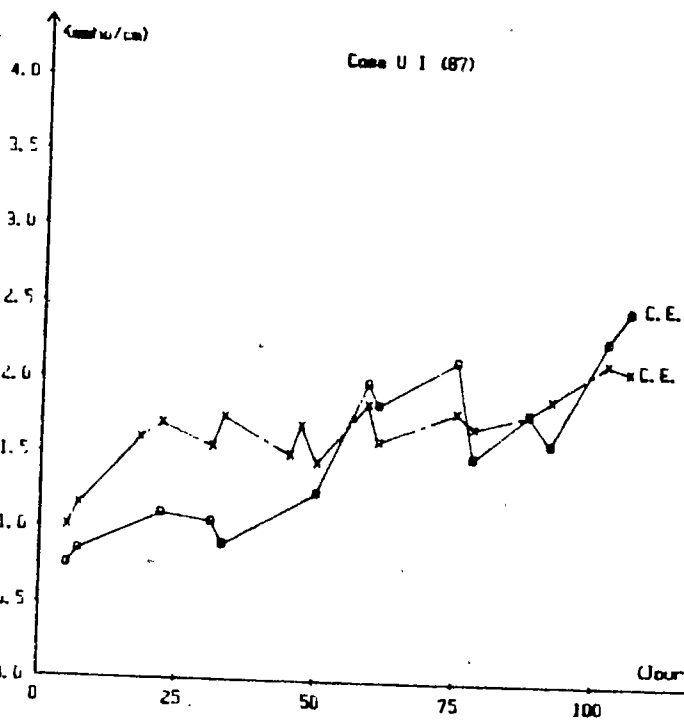
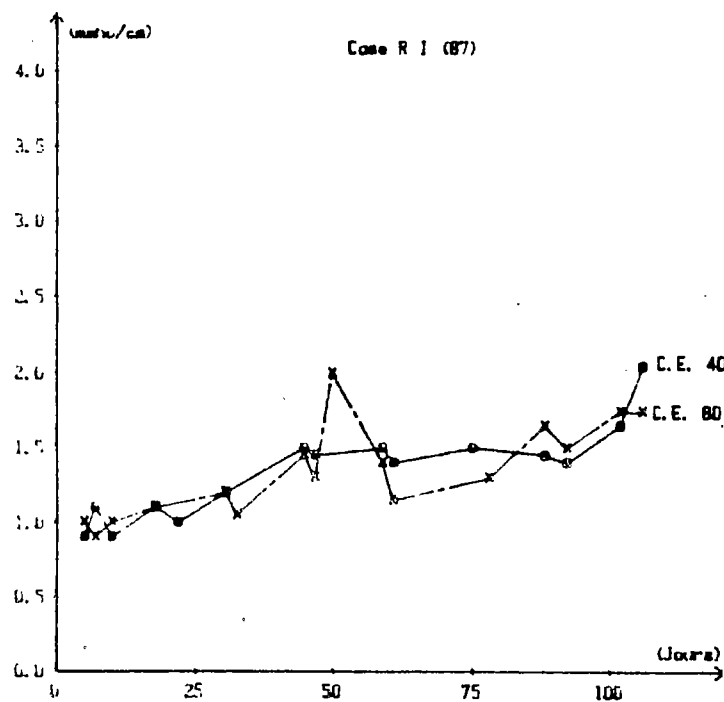
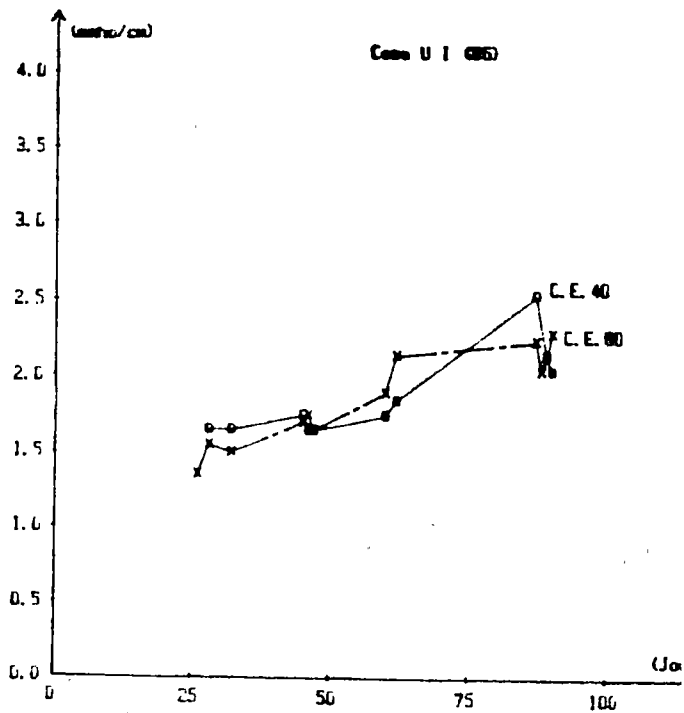
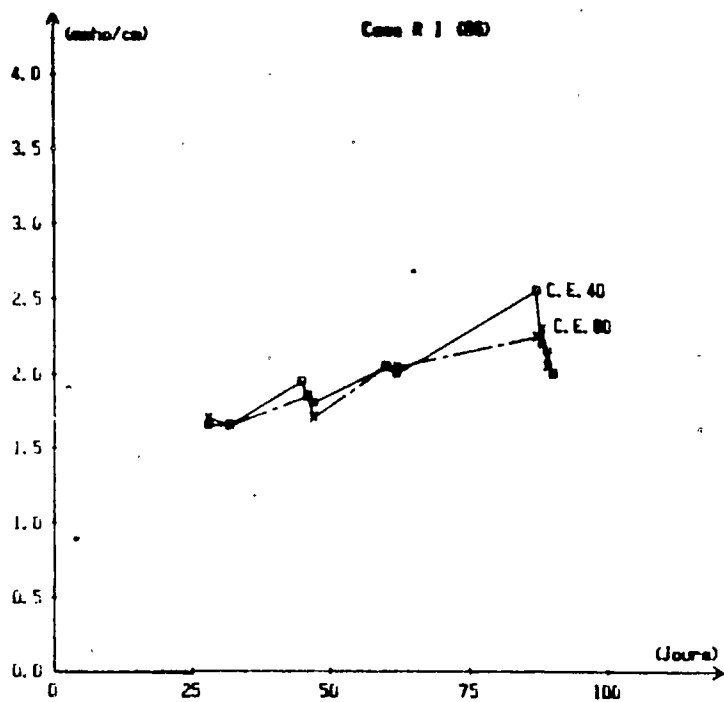


FIG. 15. EVOLUTION DE LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE

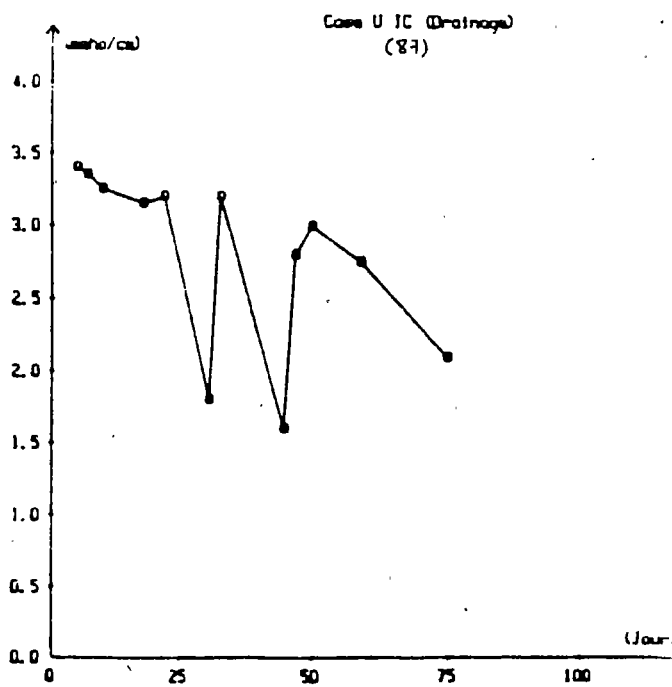
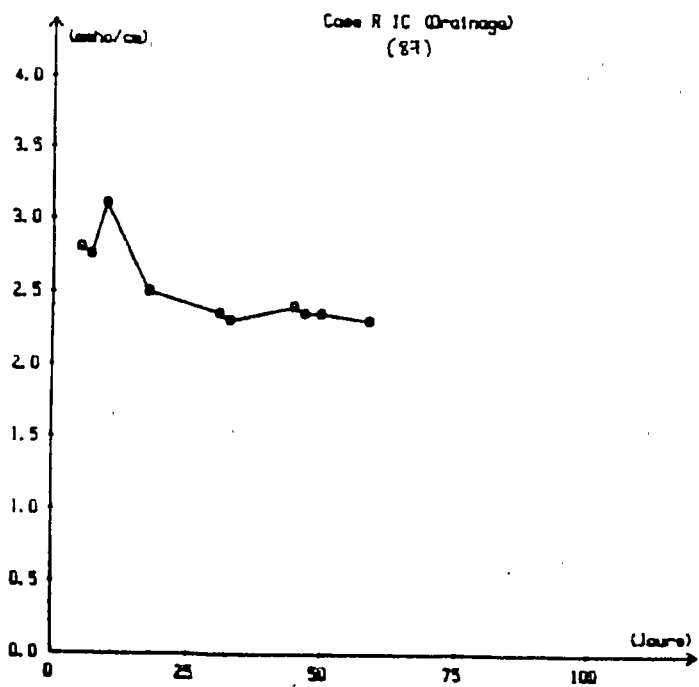
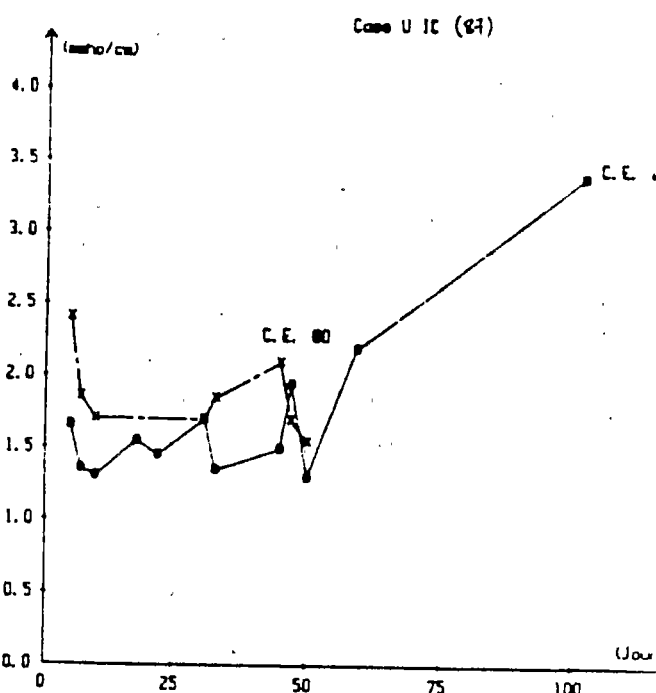
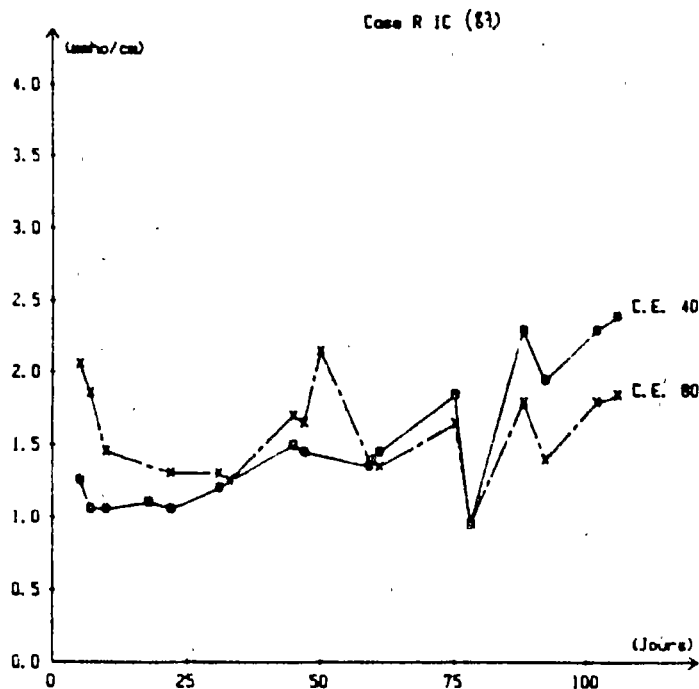
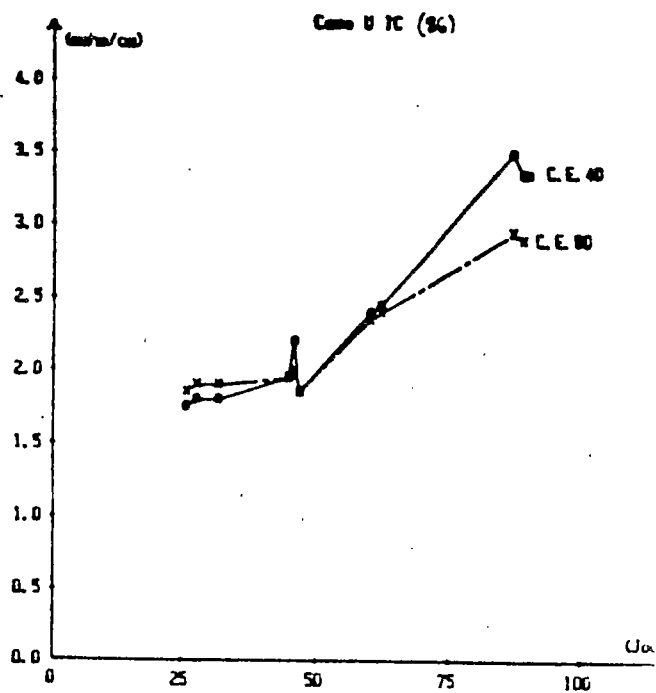
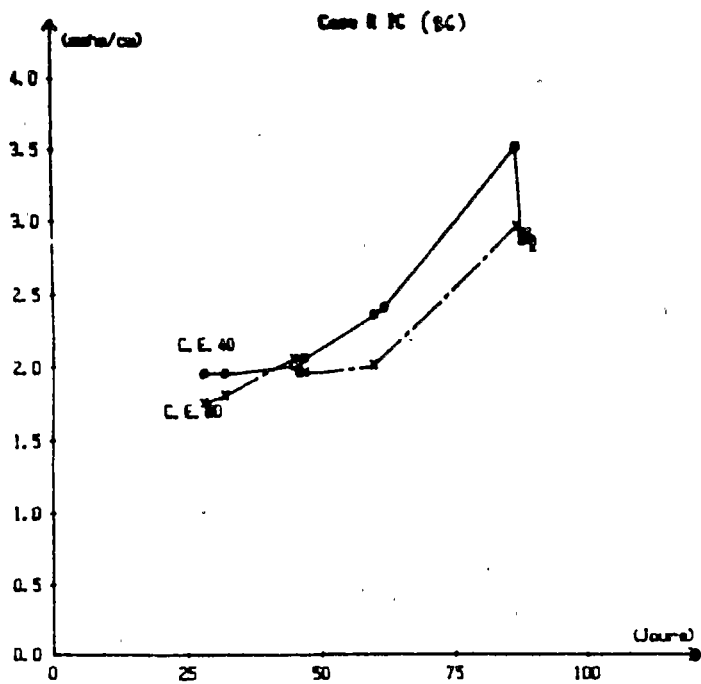


FIGURE 16. EVOLUTION OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY

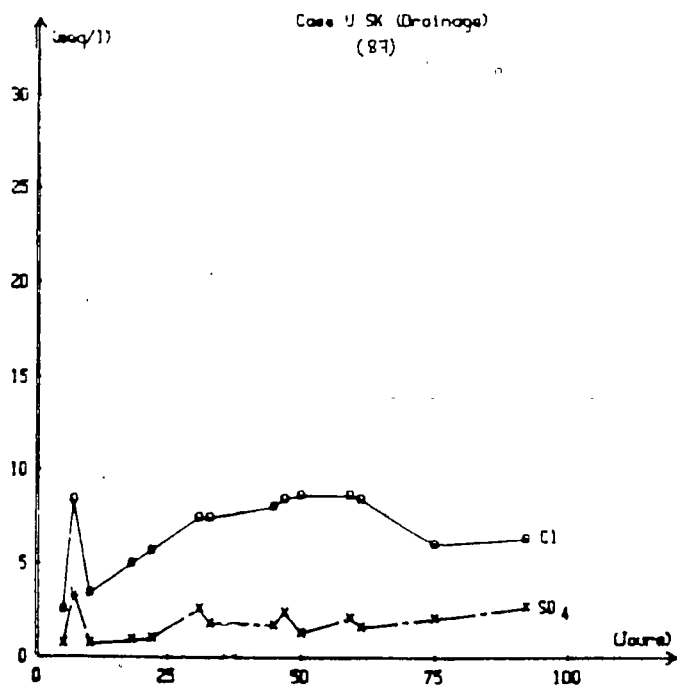
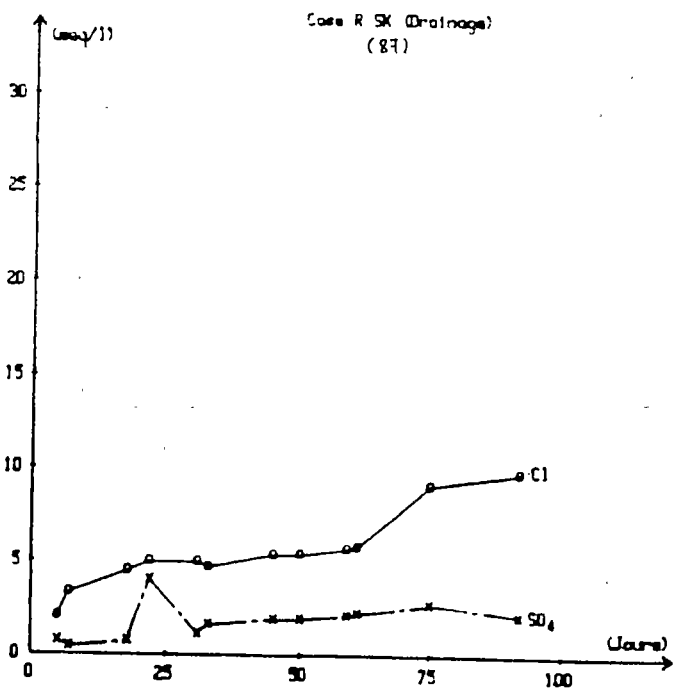
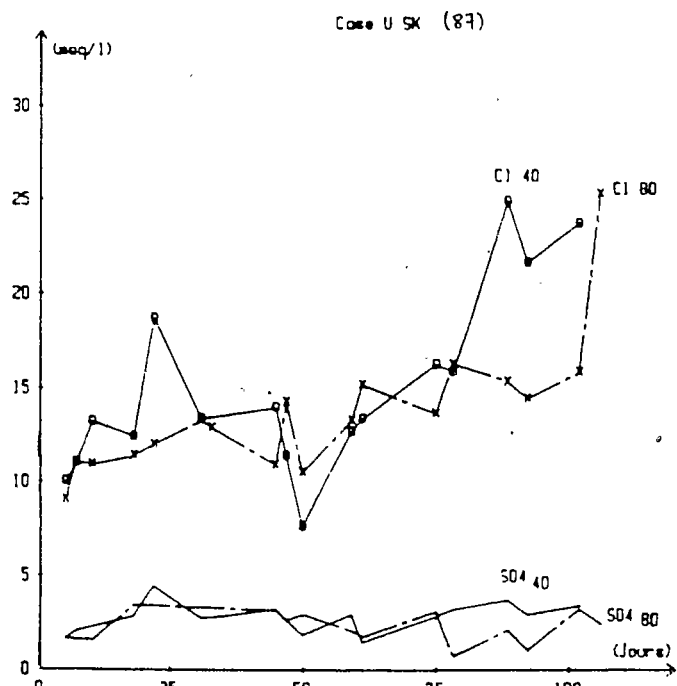
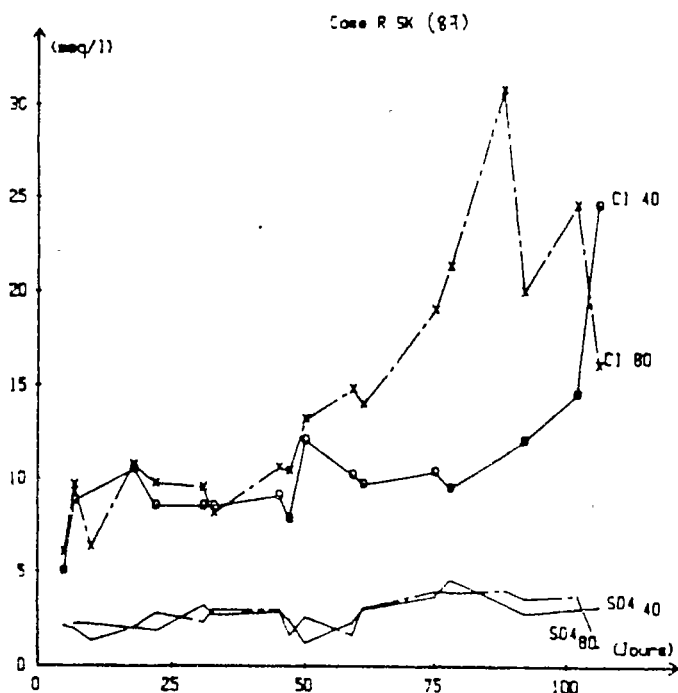
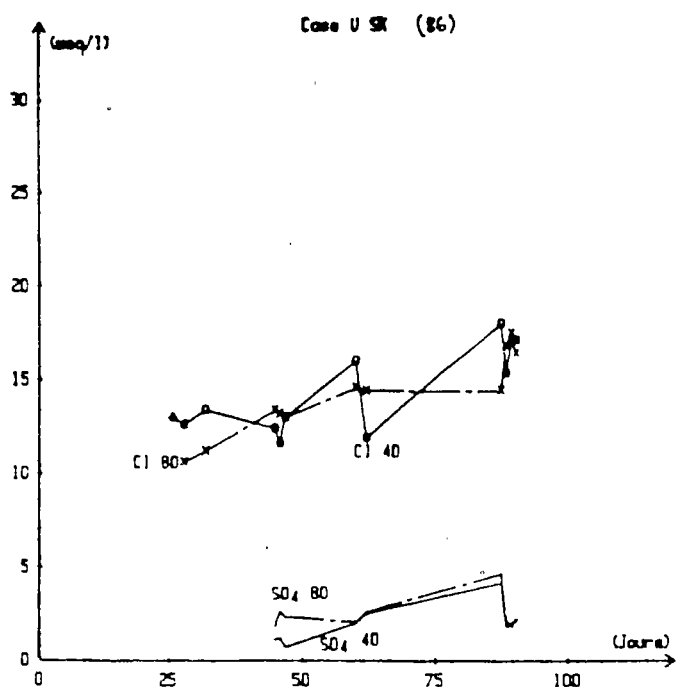
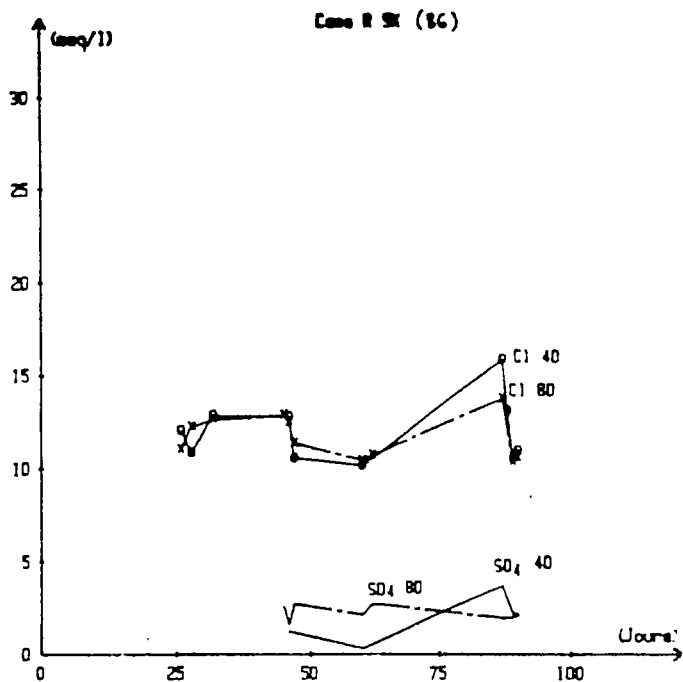
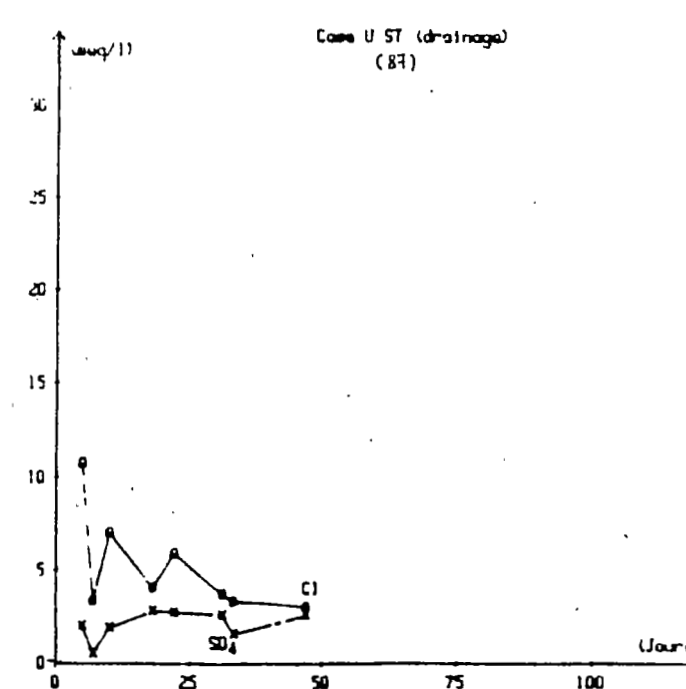
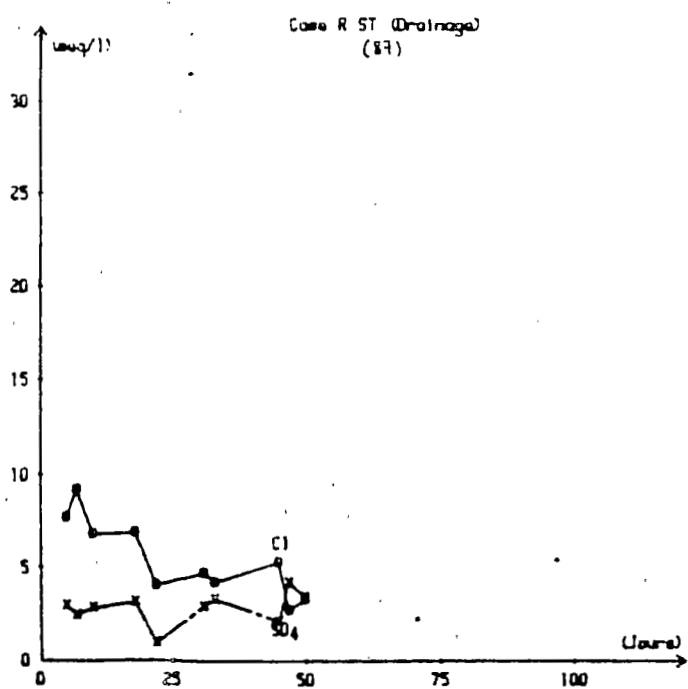
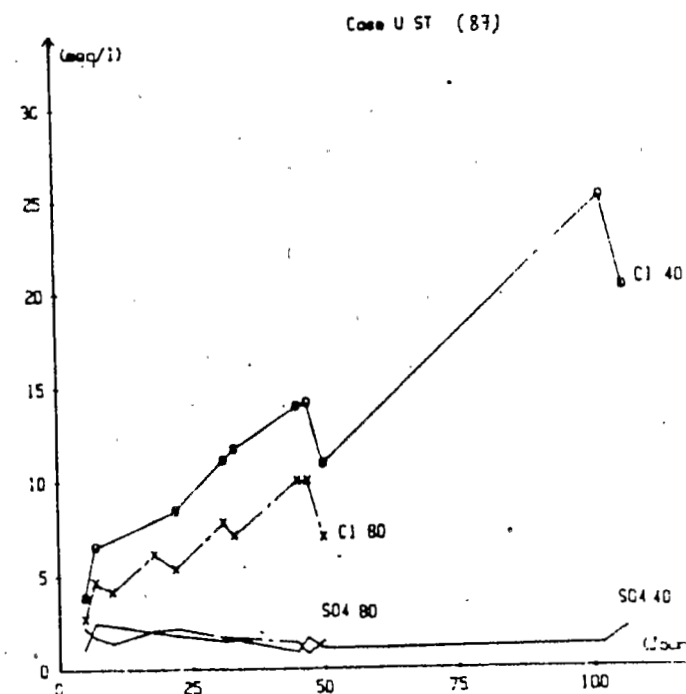
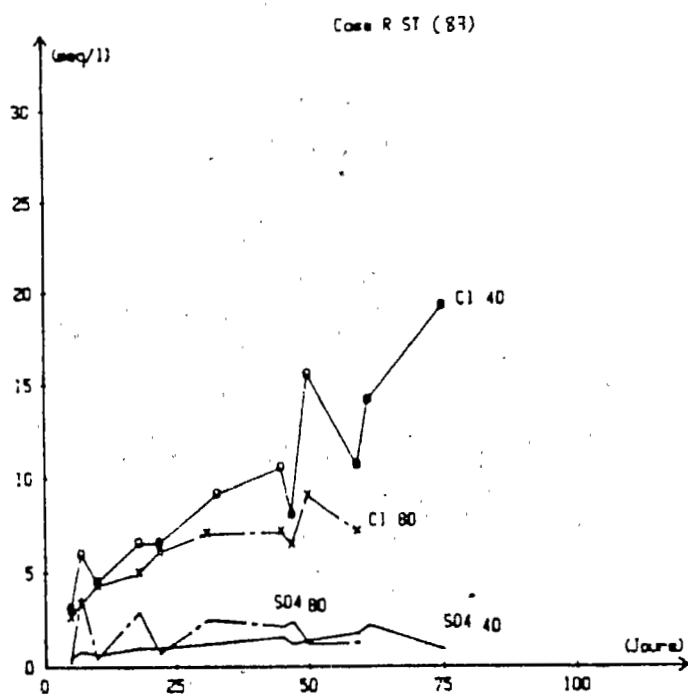
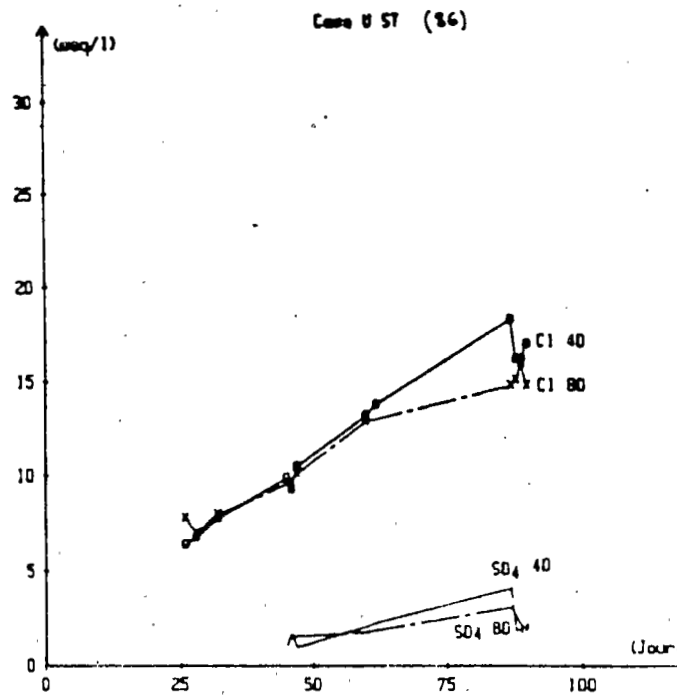
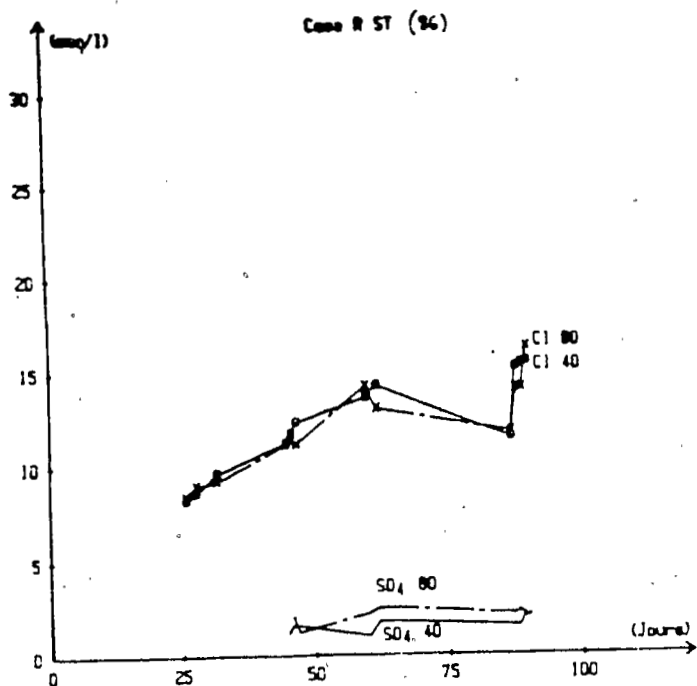


Fig11.17 EVOLUTION DES CONCENTRATIONS DES ANIONS



FigII. 18 EVOLUTION DES CONCENTRATIONS DES ANIONS

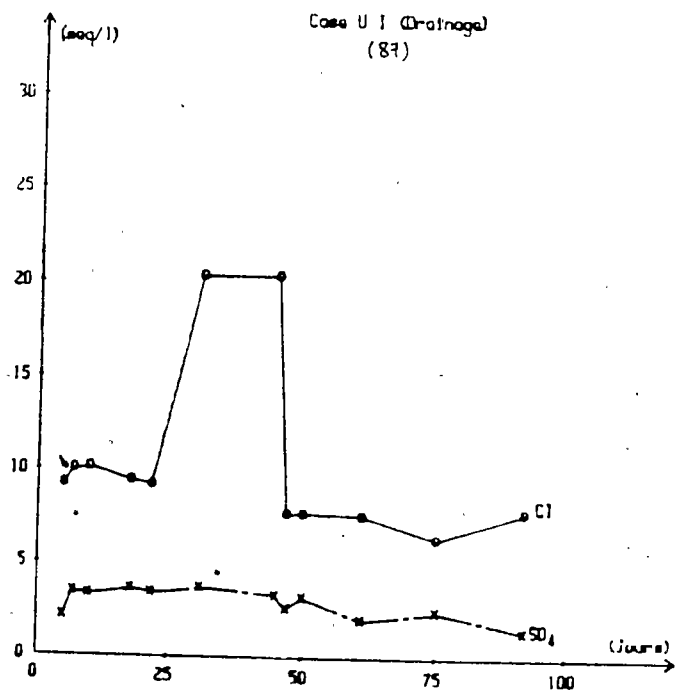
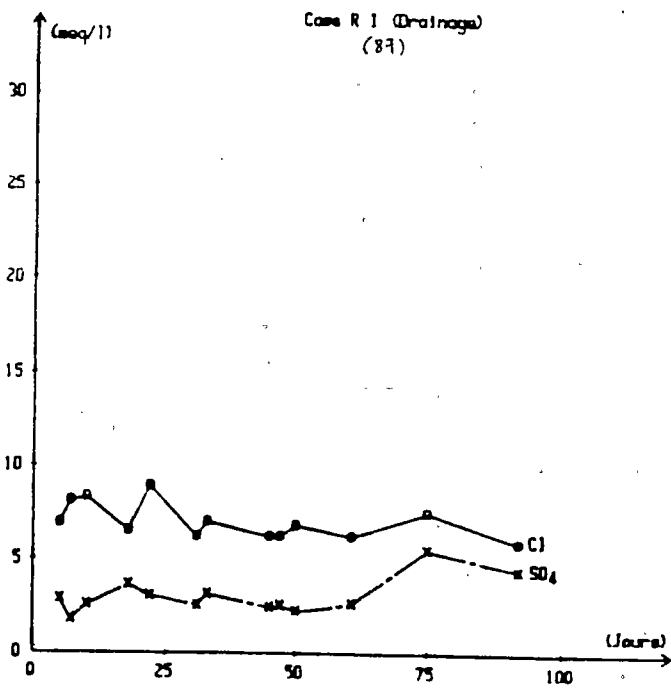
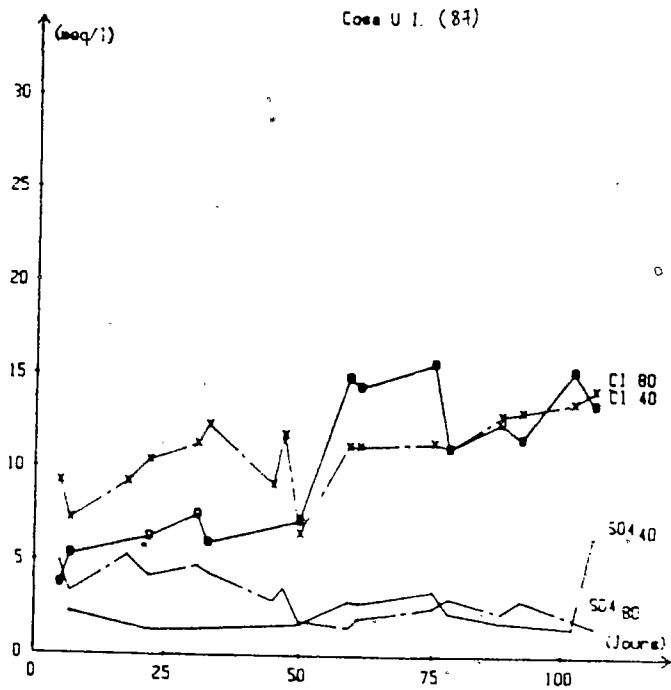
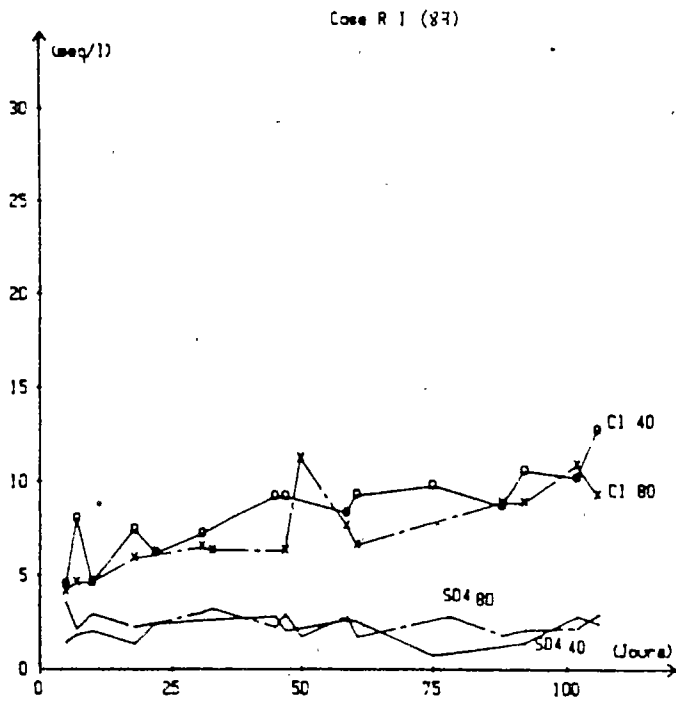
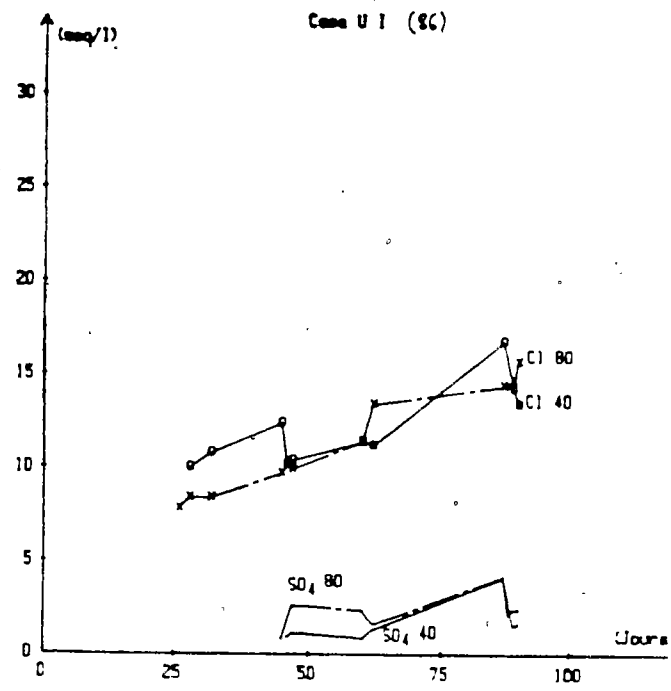
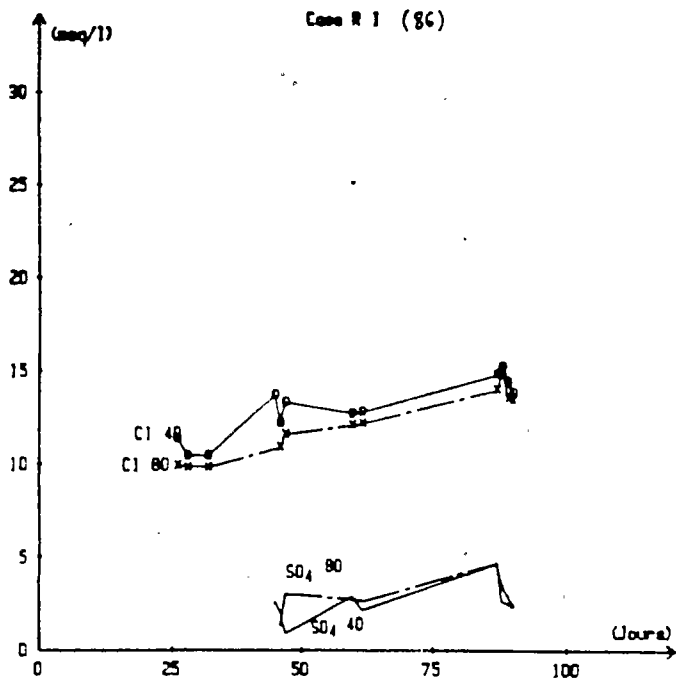
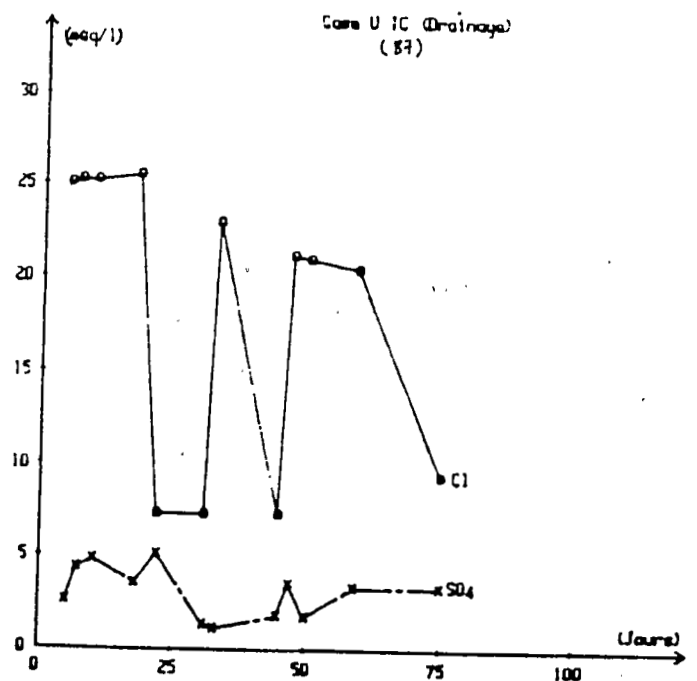
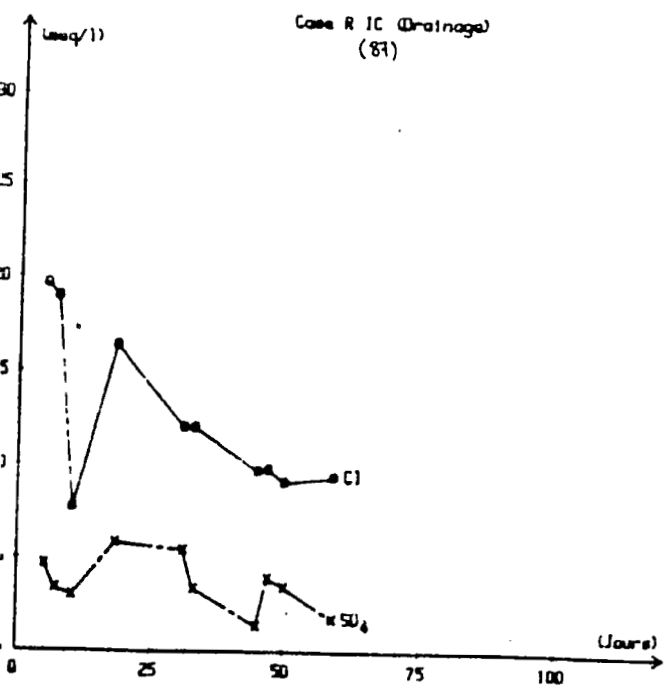
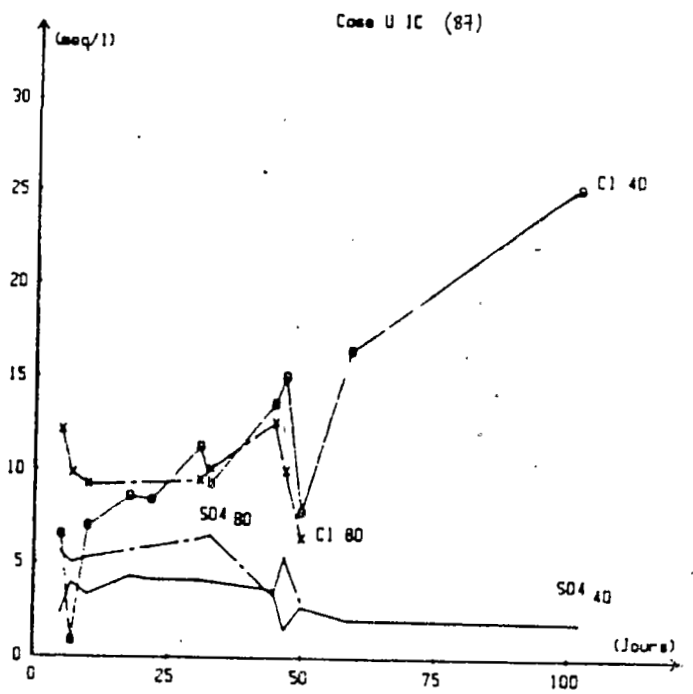
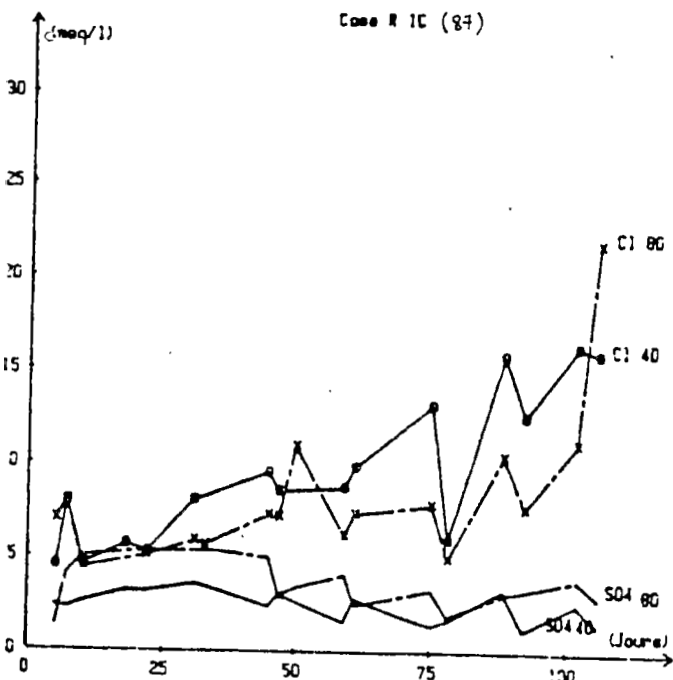
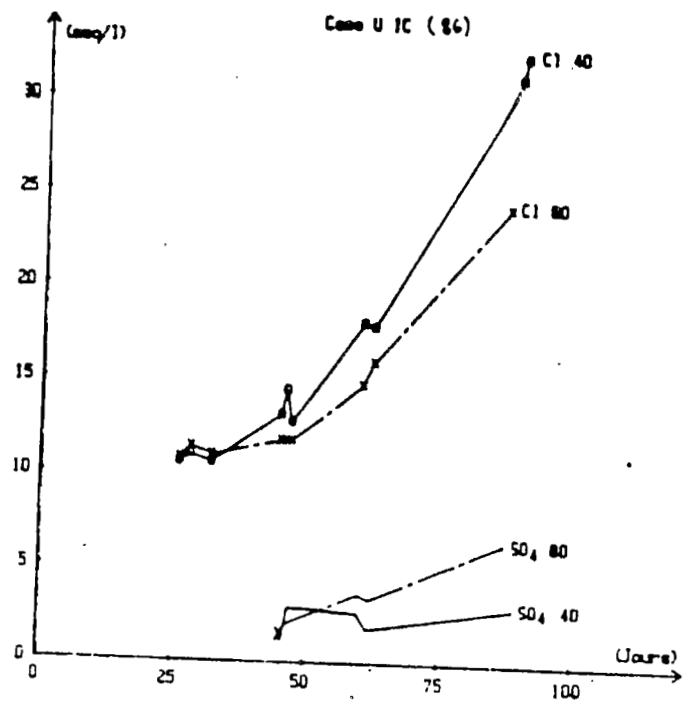
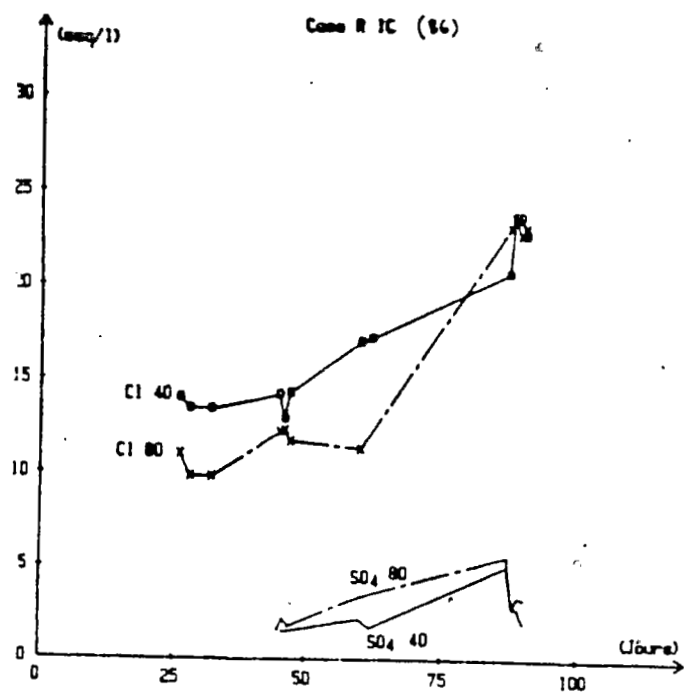


Fig11.19 EVOLUTION DES CONCENTRATIONS DES ANIONS



FigII. 20 EVOLUTION DES CONCENTRATIONS DES ANIONS

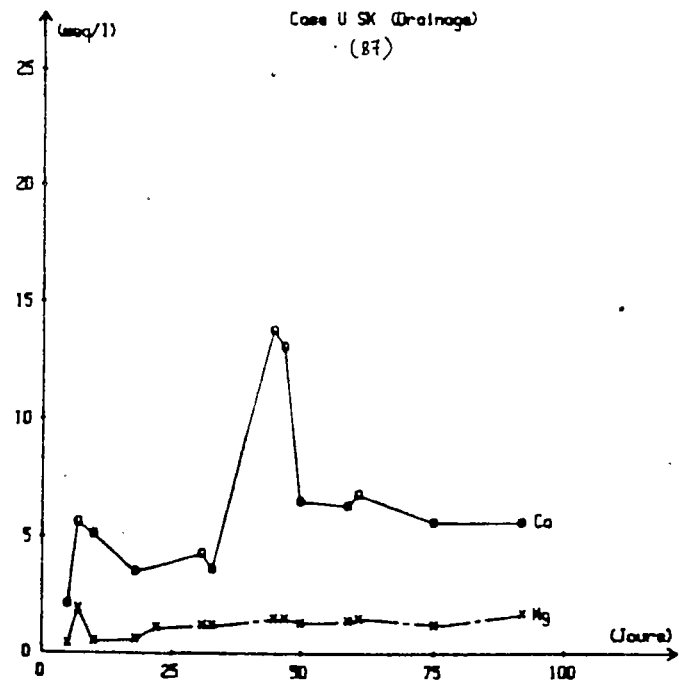
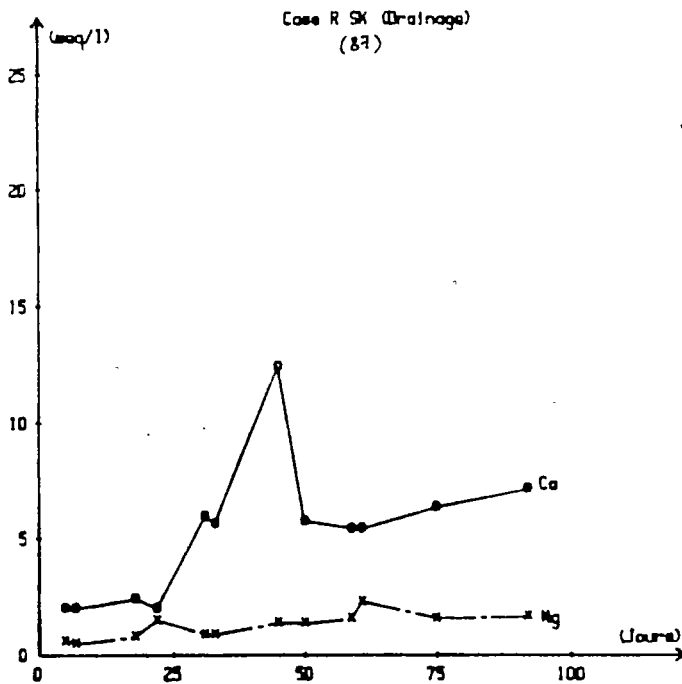
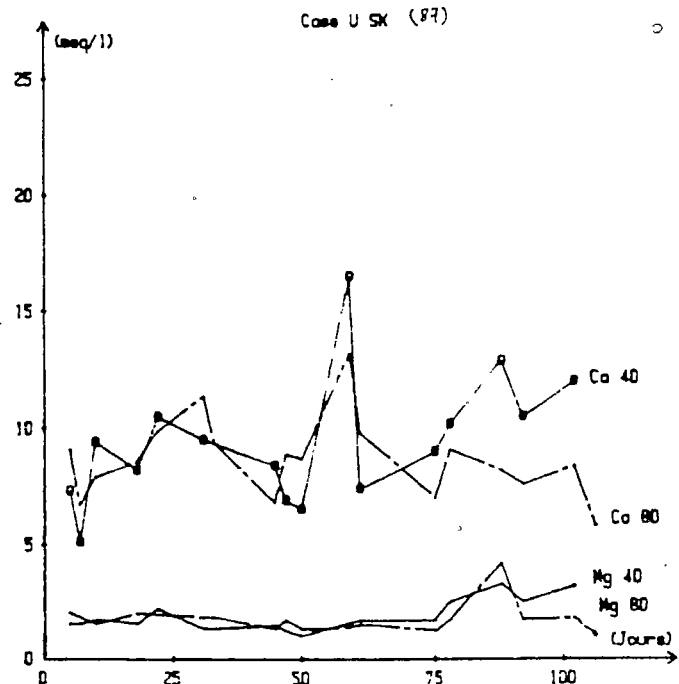
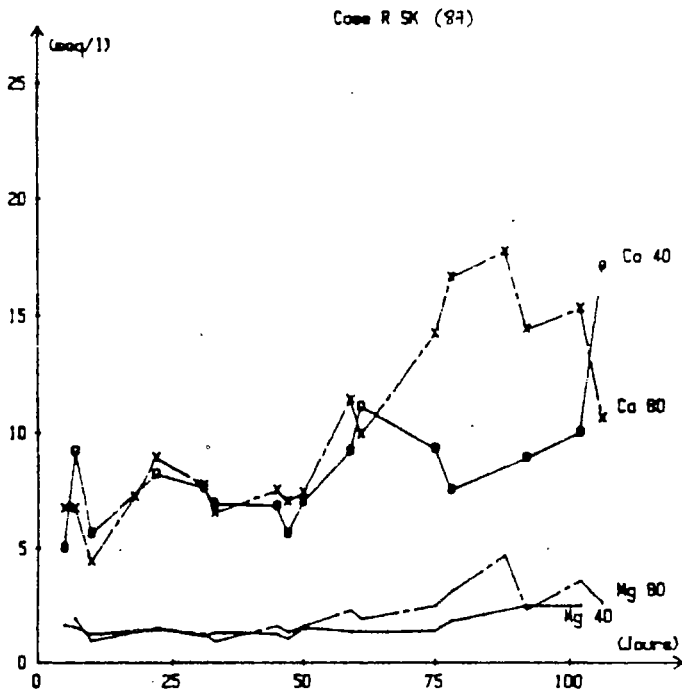
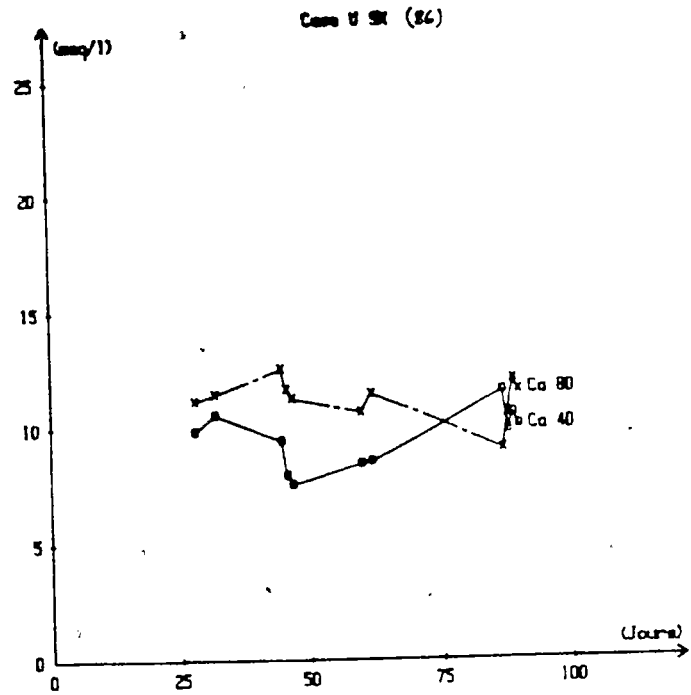
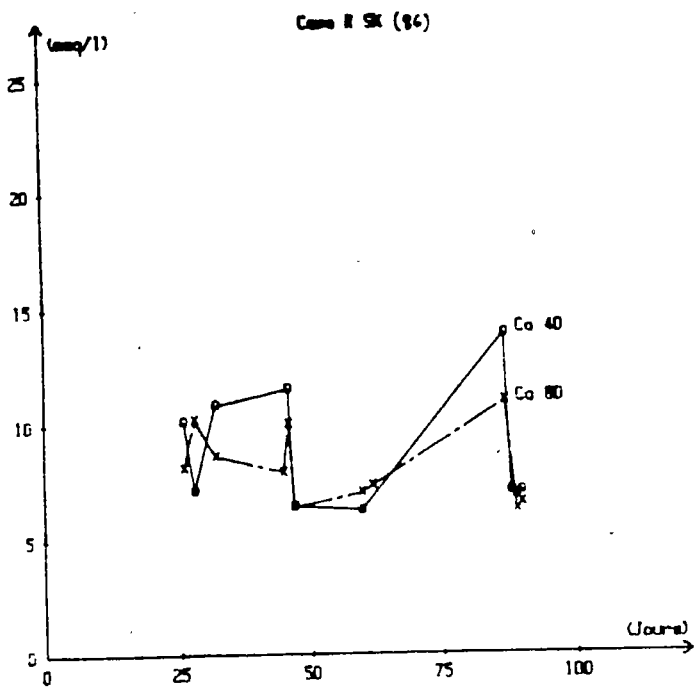
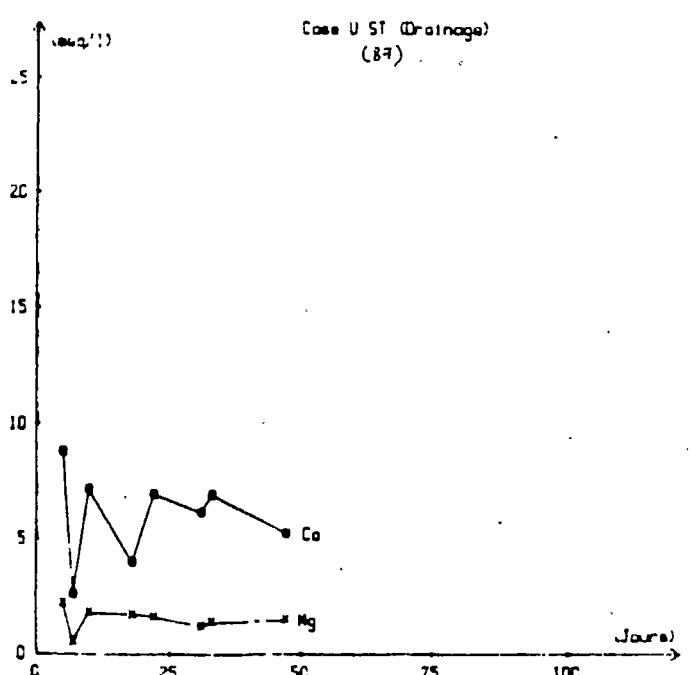
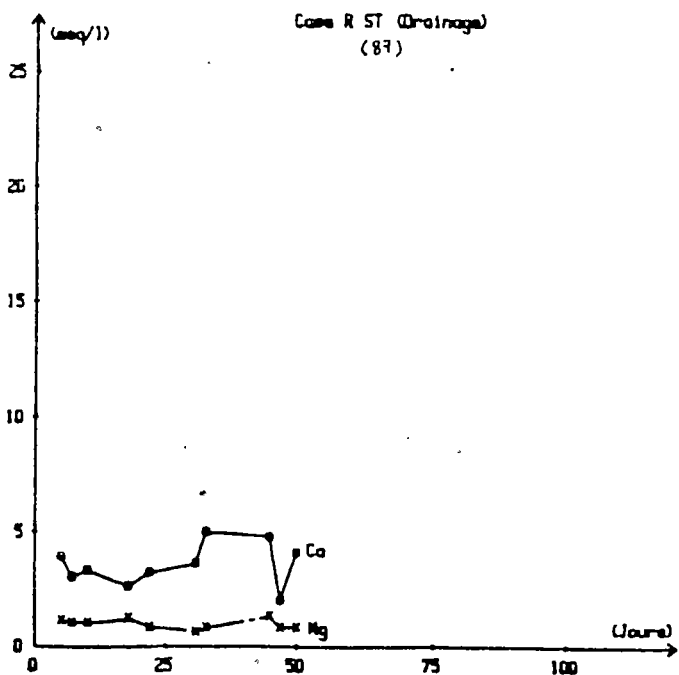
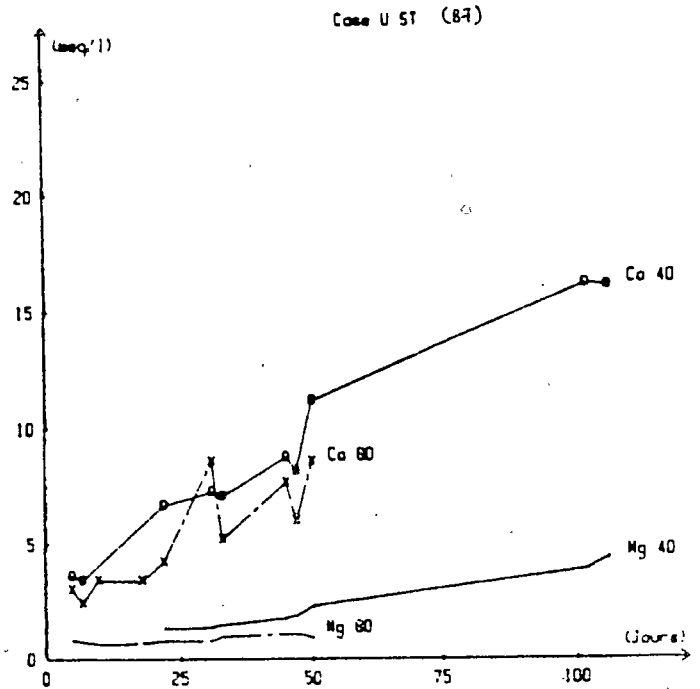
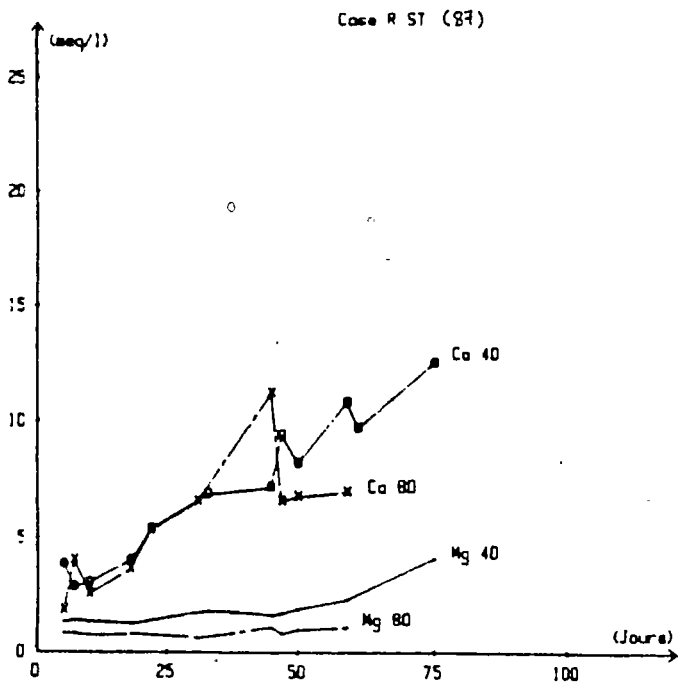
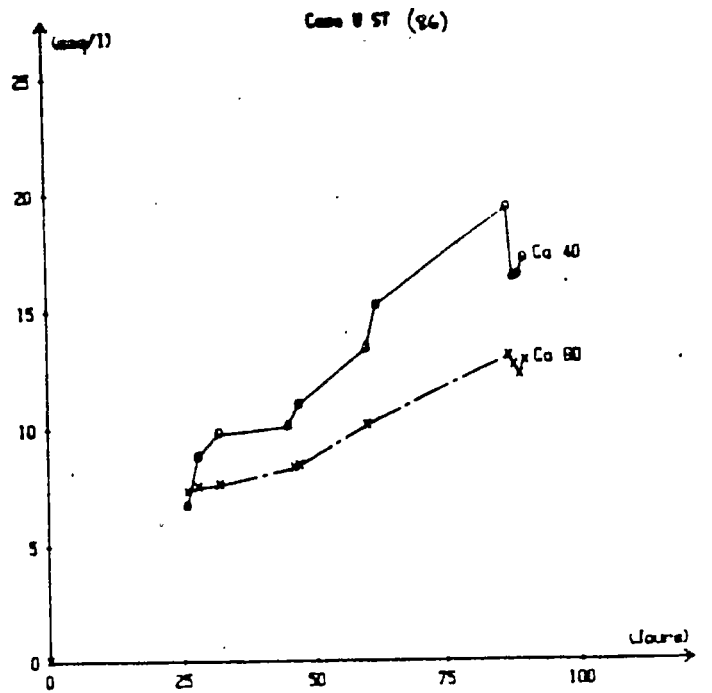
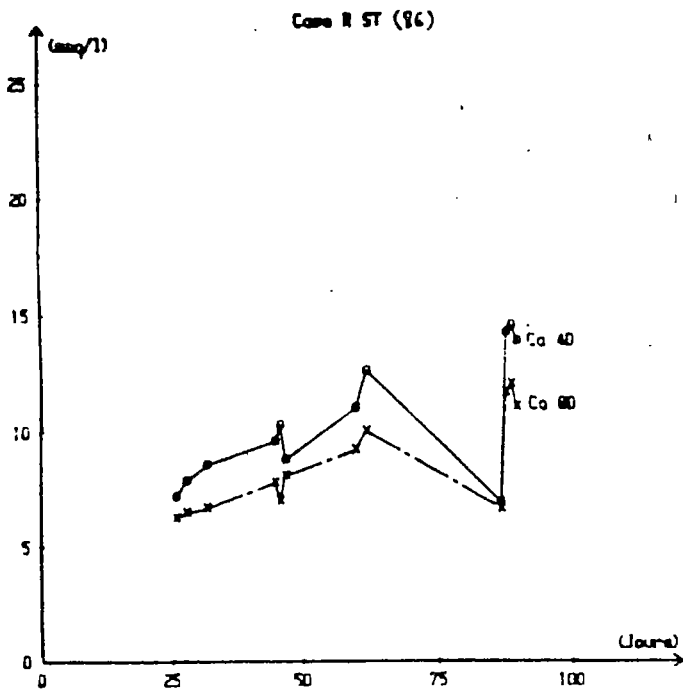
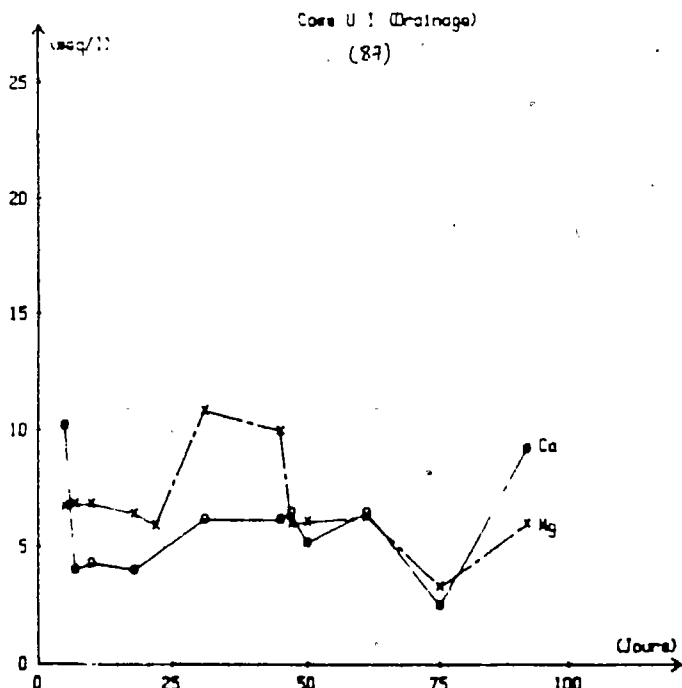
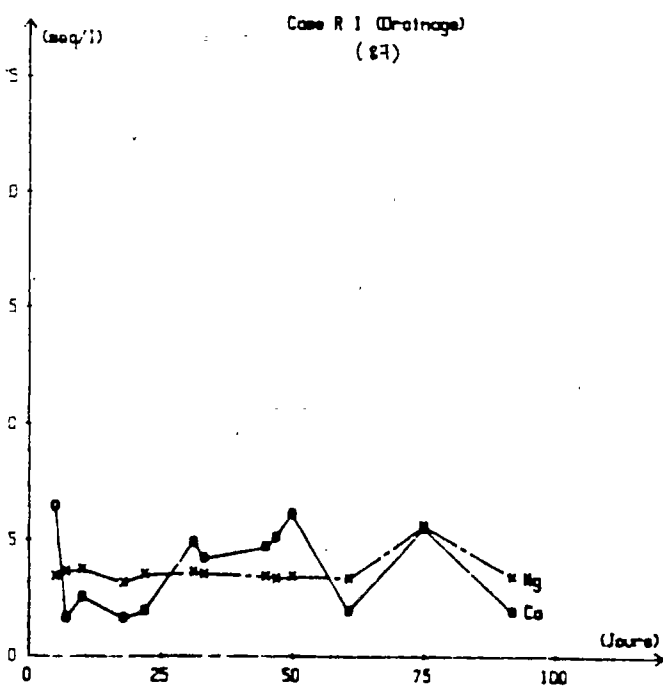
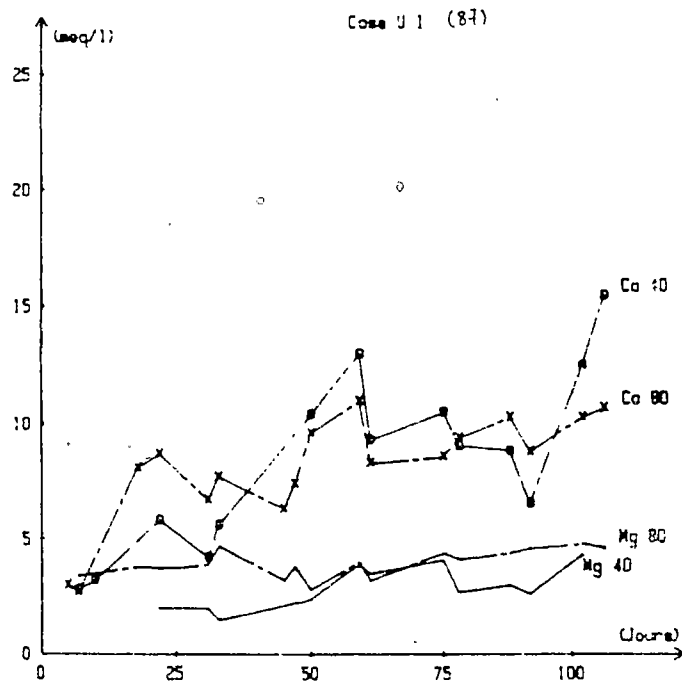
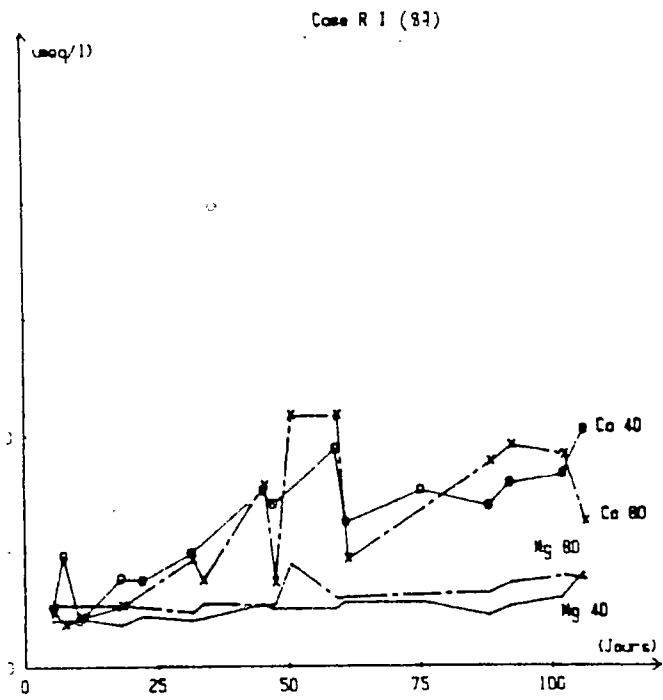
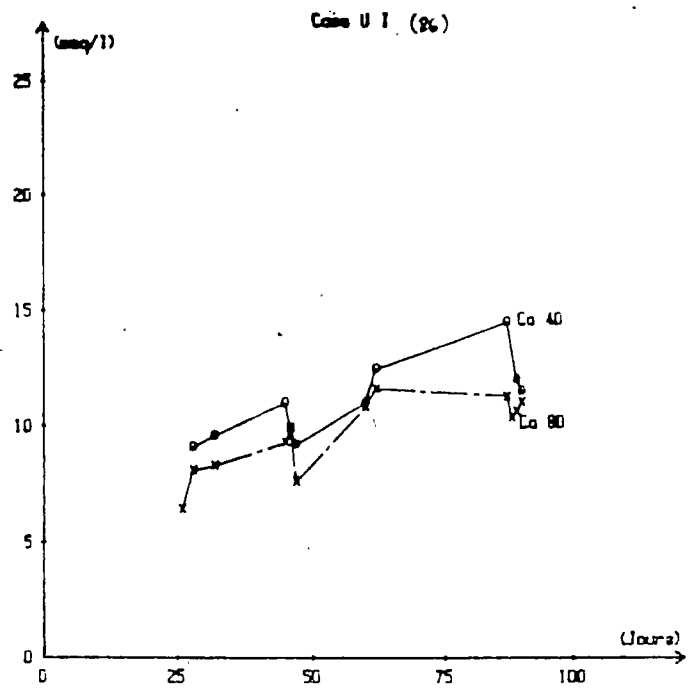
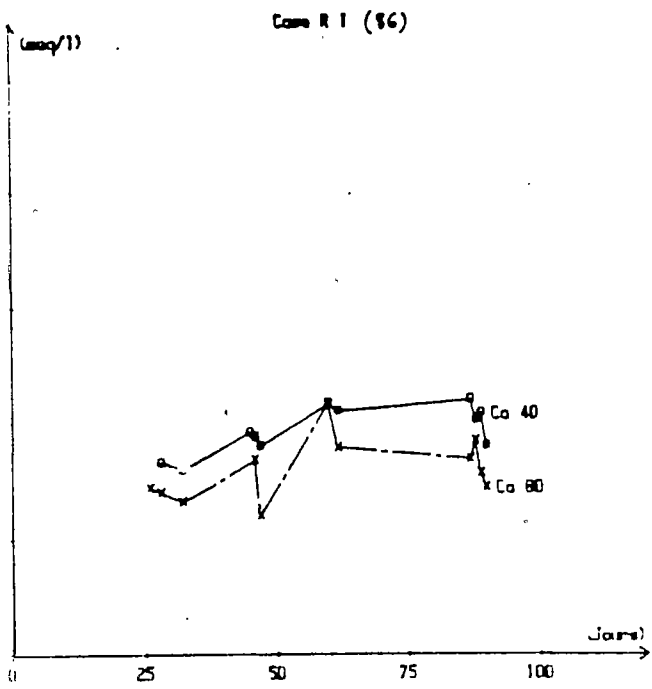


Fig11.21 EVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN CALCIUM ET MAGNESIUM



FigII. 22 EVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN CALCIUM ET MAGNESIUM



FigII.23 EVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN CALCIUM ET MAGNESIUM

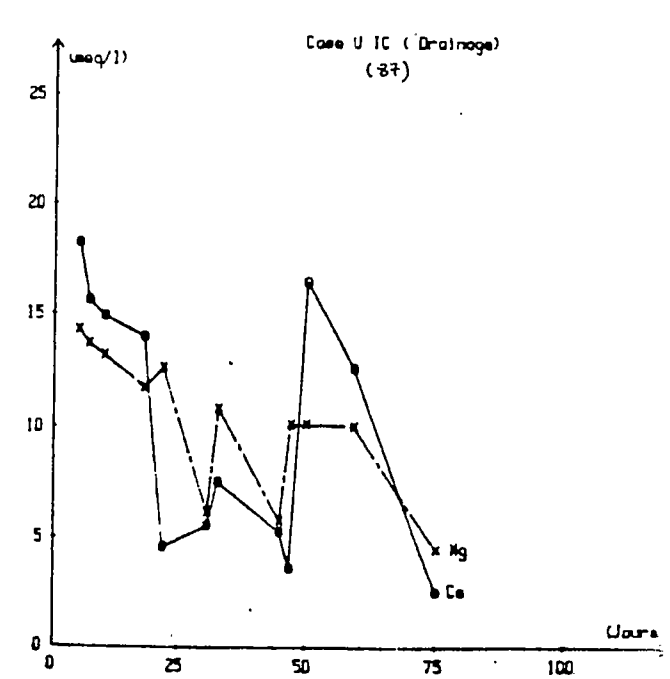
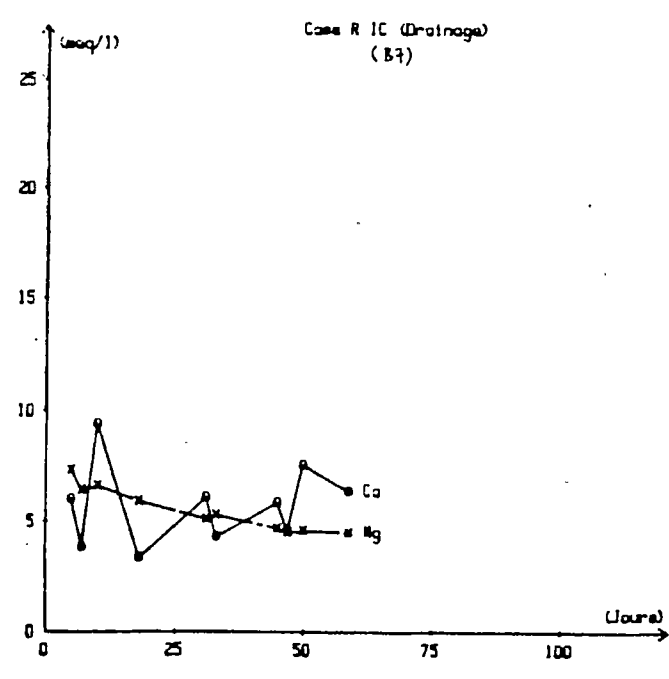
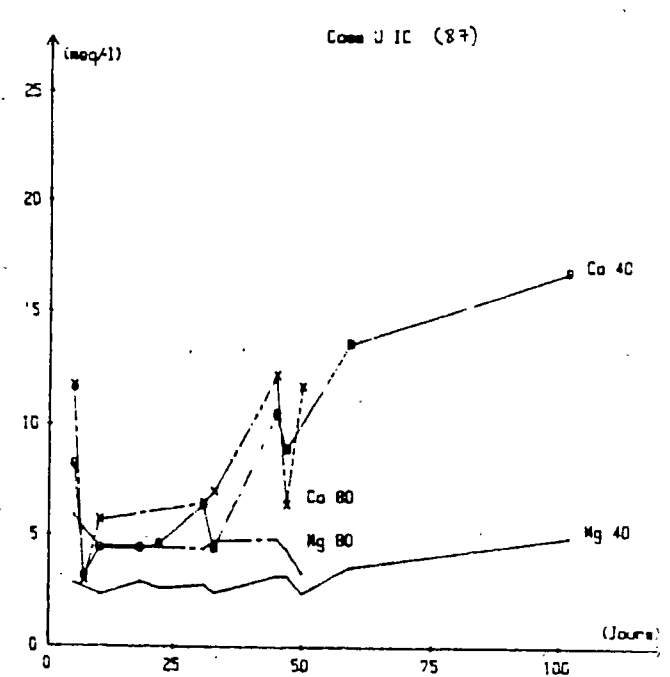
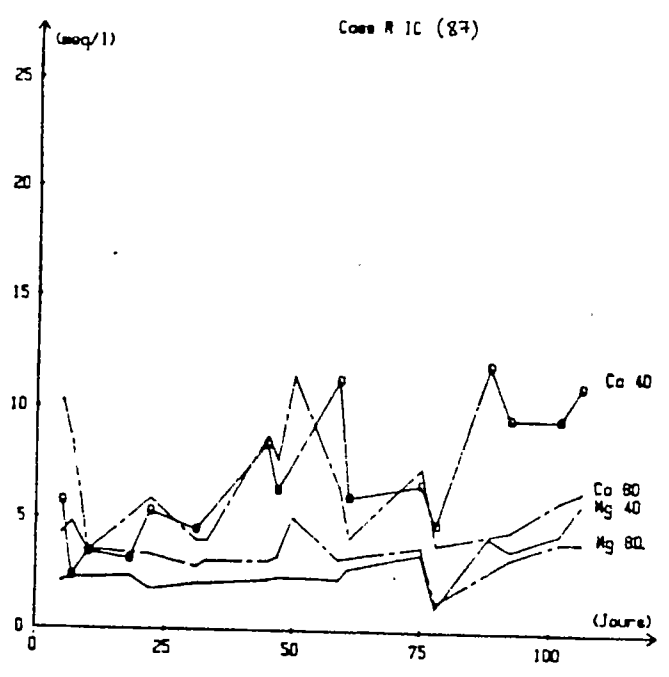
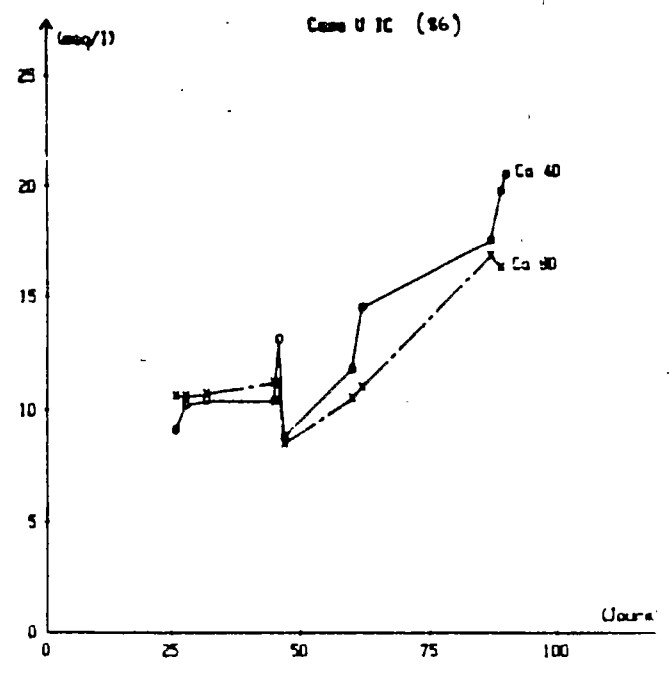
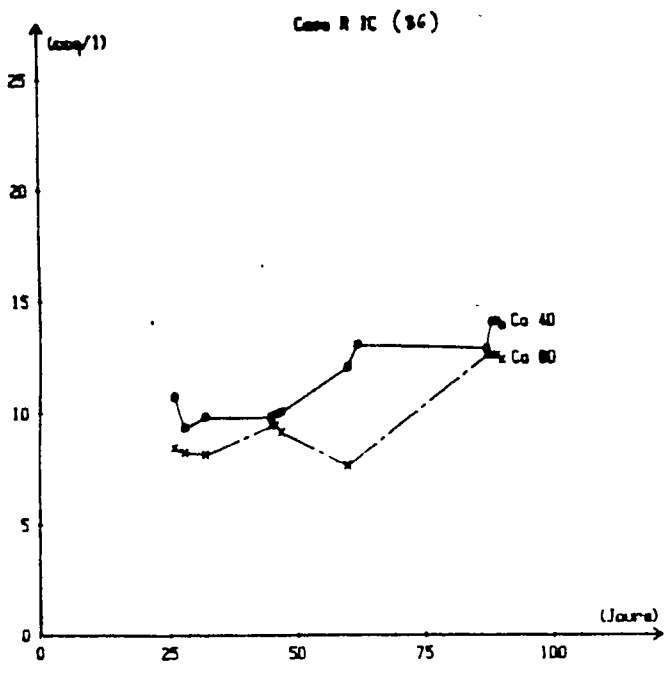


Fig11.24 EVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN CALCIUM ET MAGNESIUM

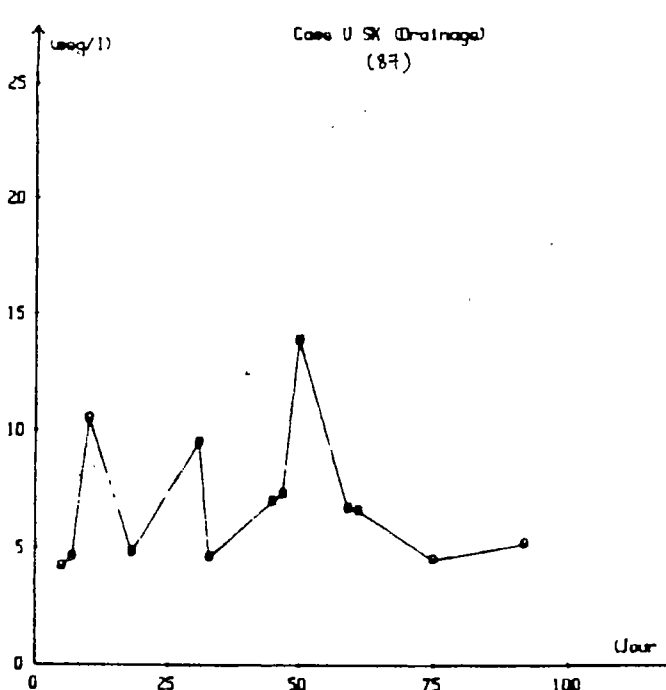
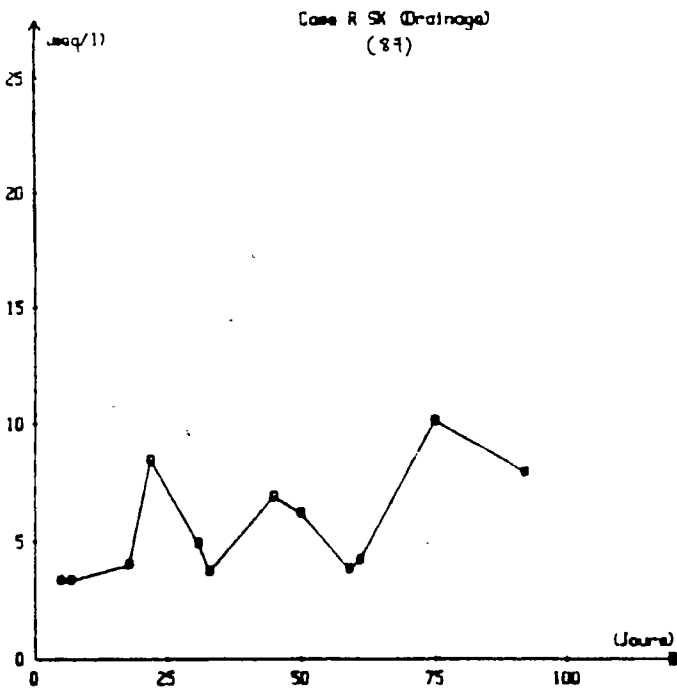
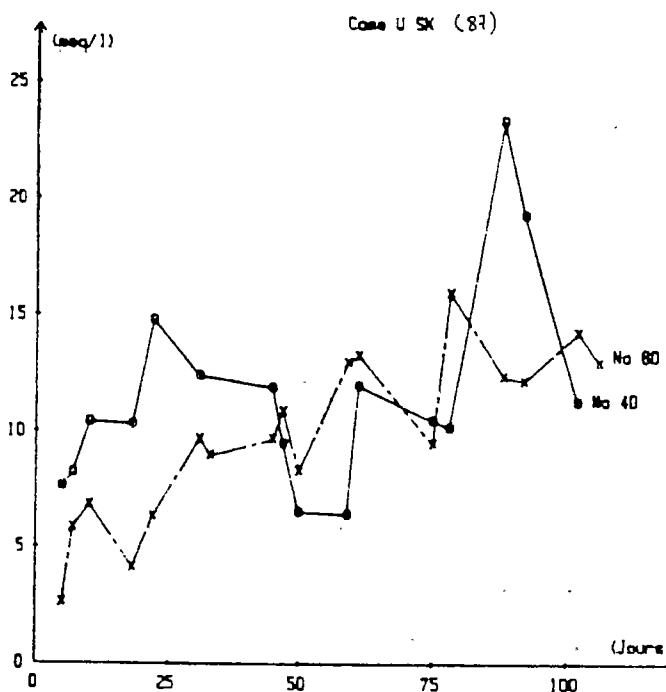
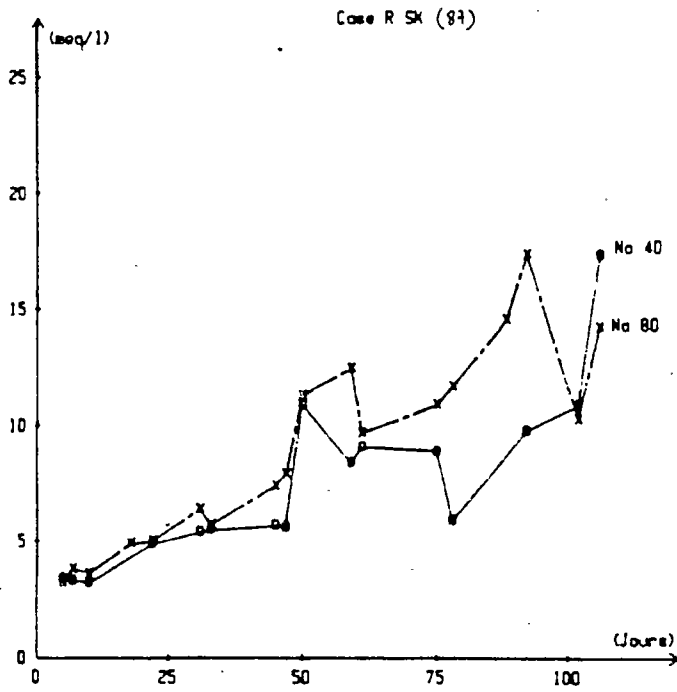
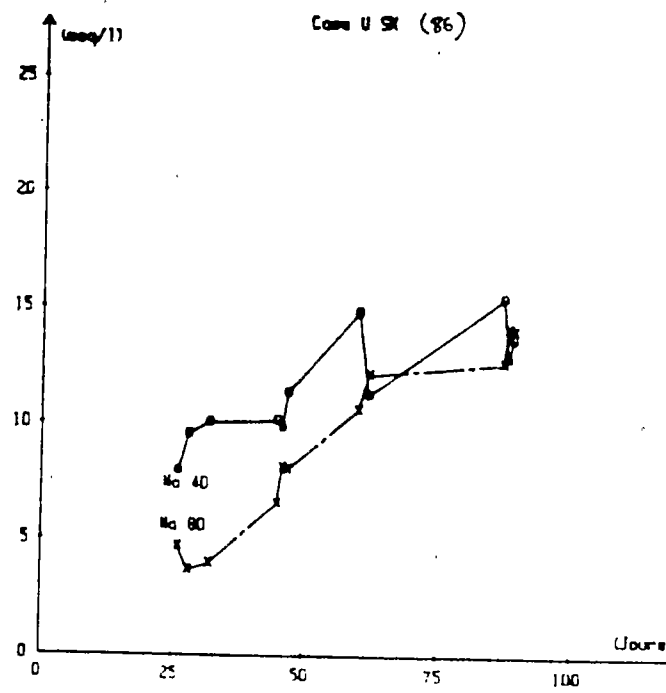
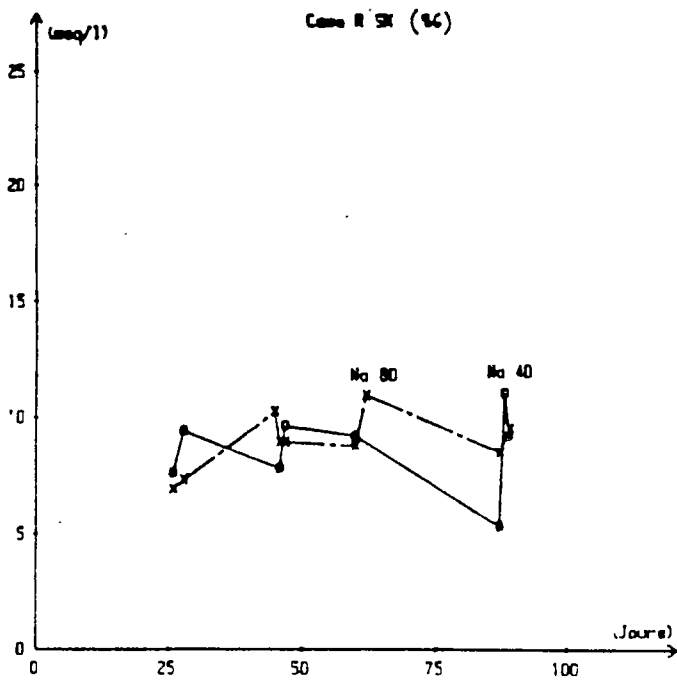


Fig11.25 EVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN SODIUM

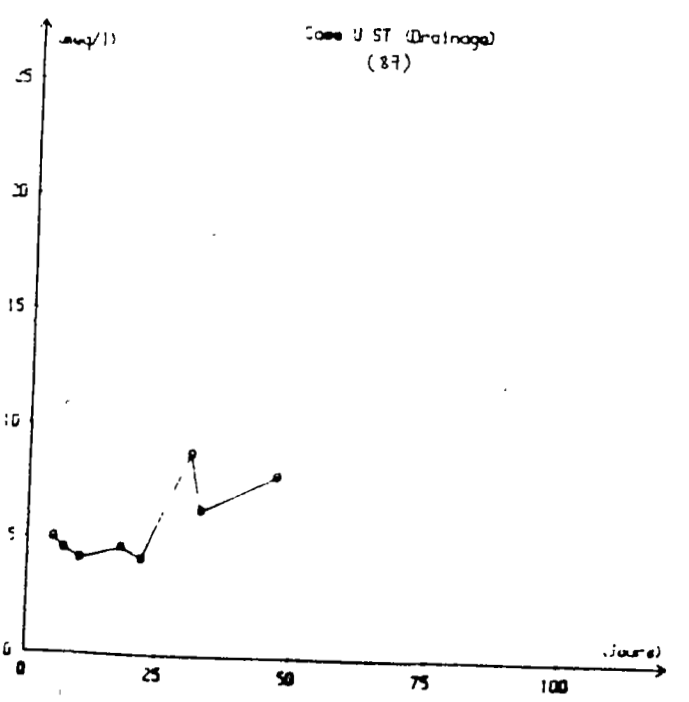
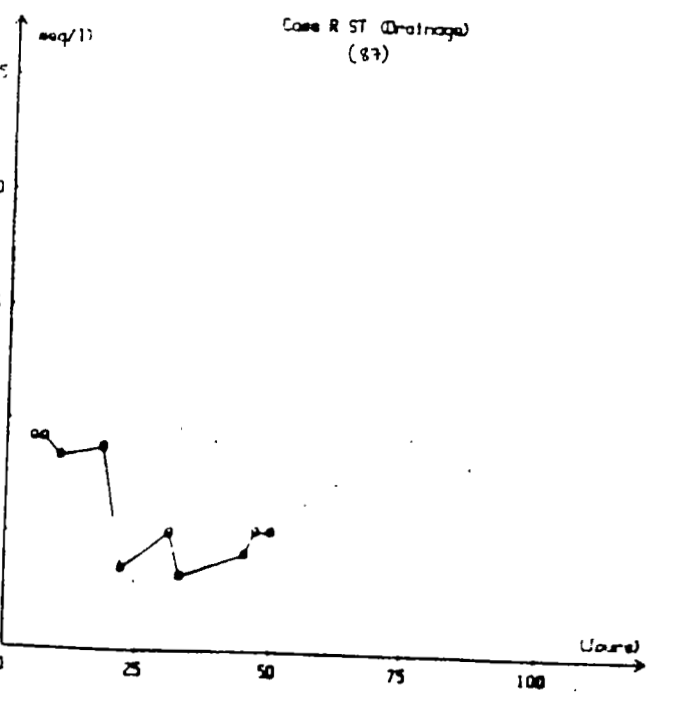
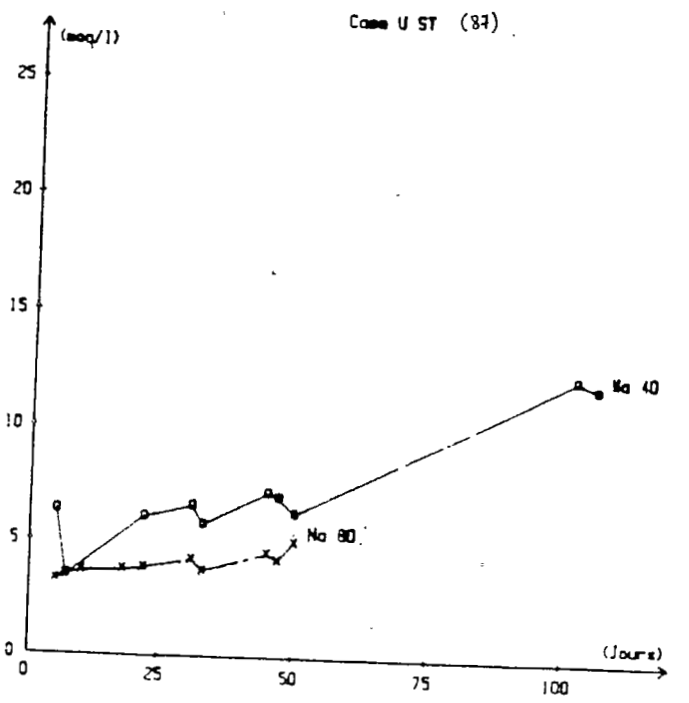
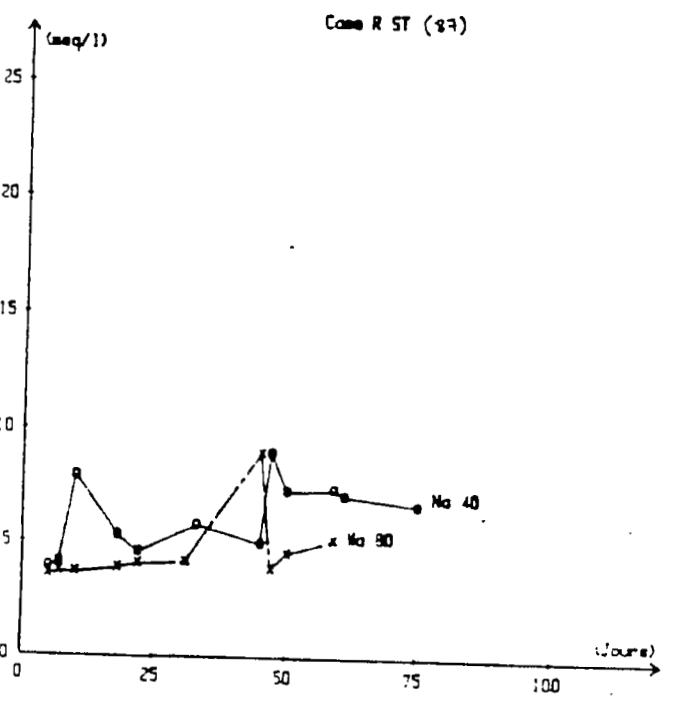
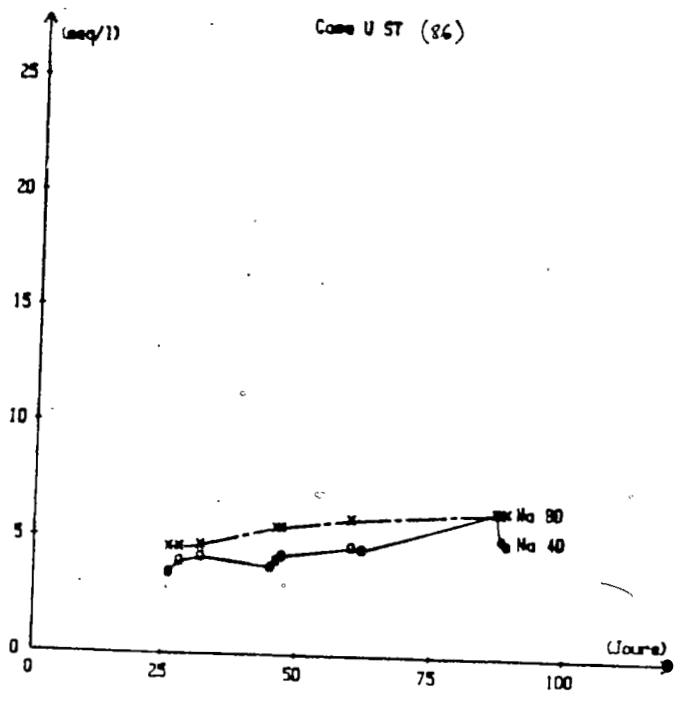
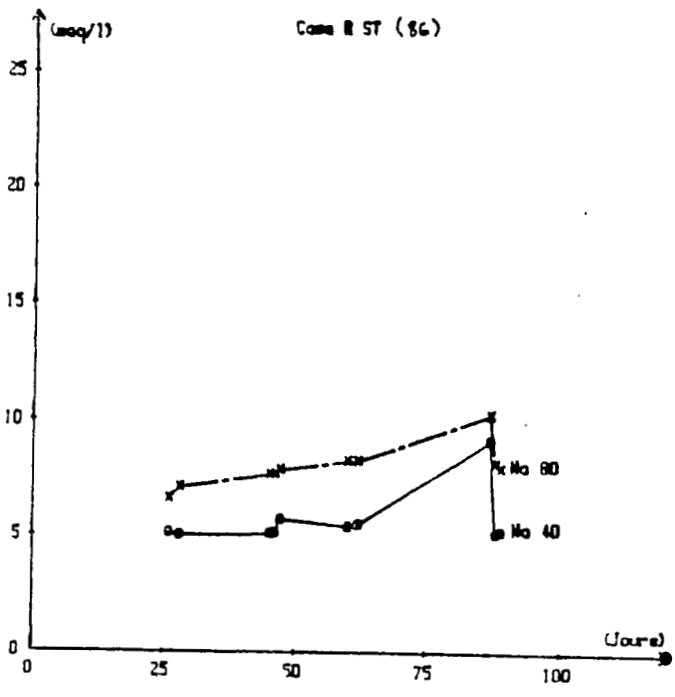


Fig 11.26 EVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN SODIUM

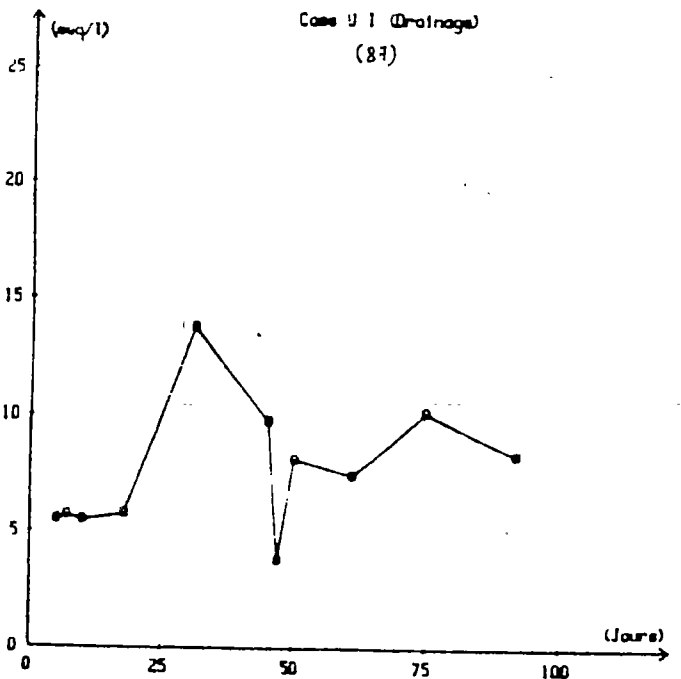
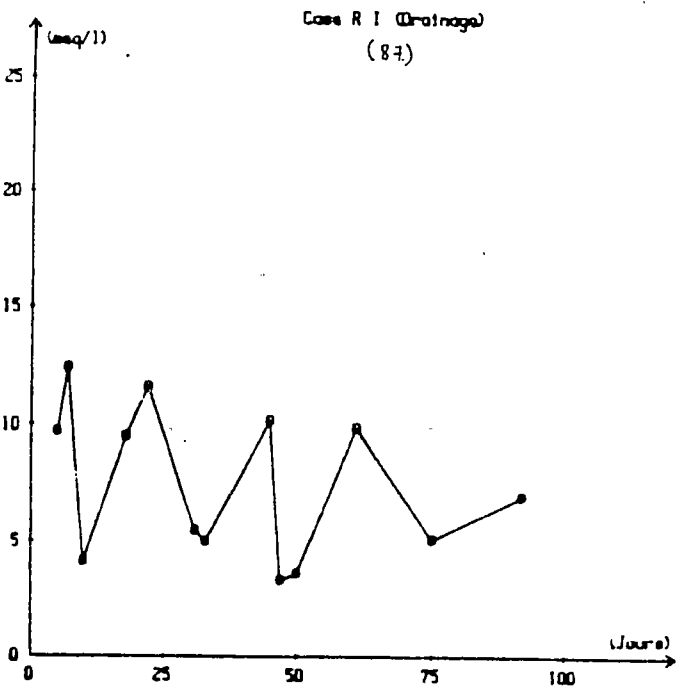
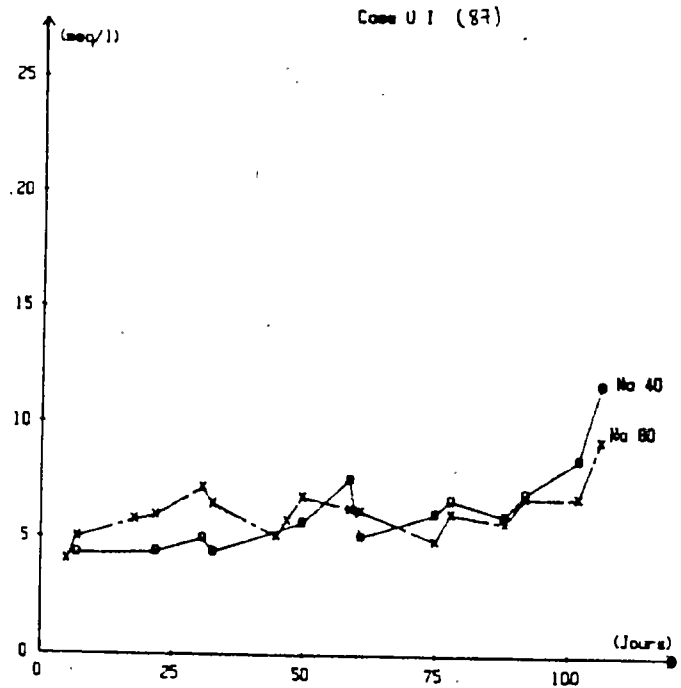
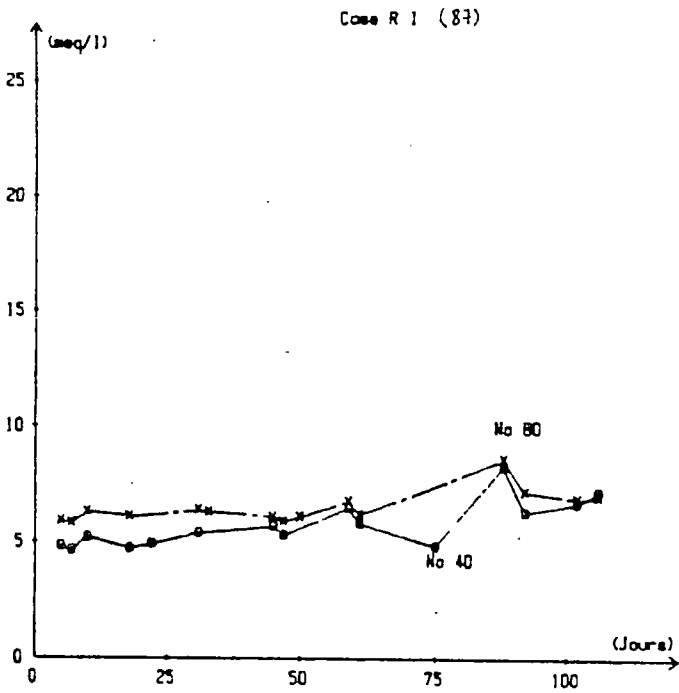
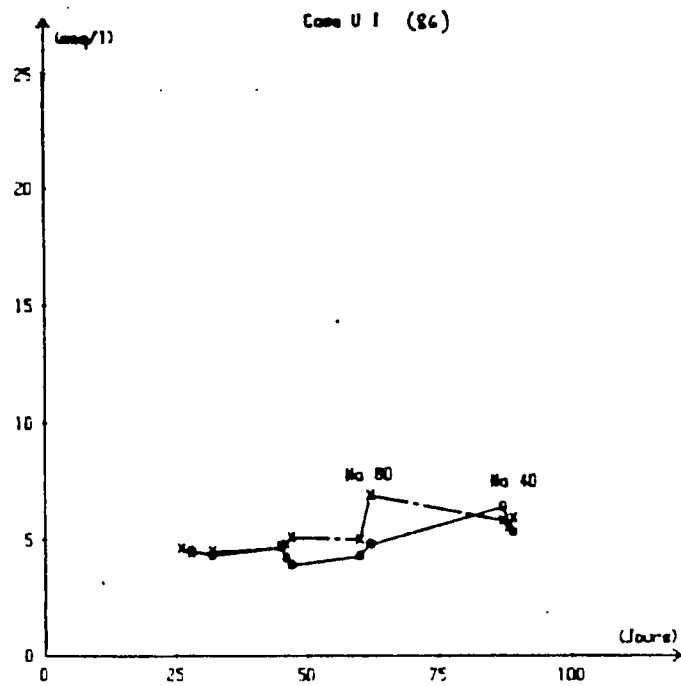
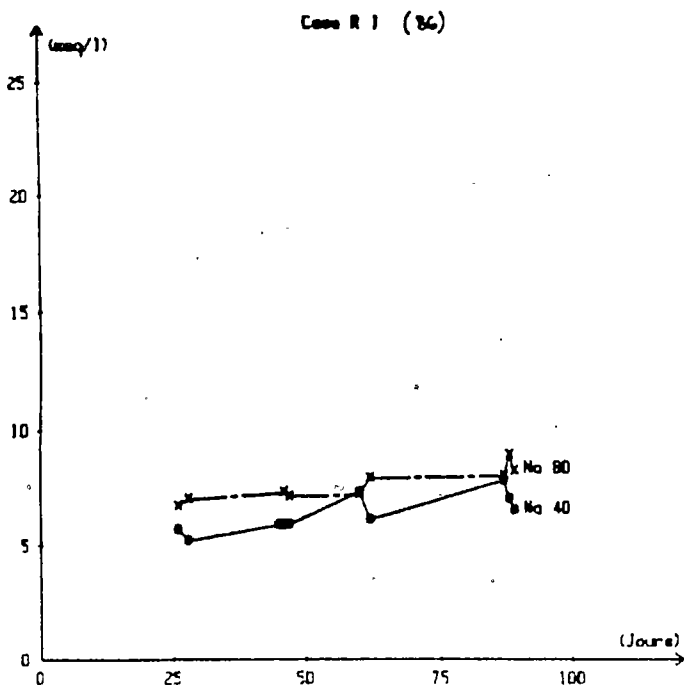
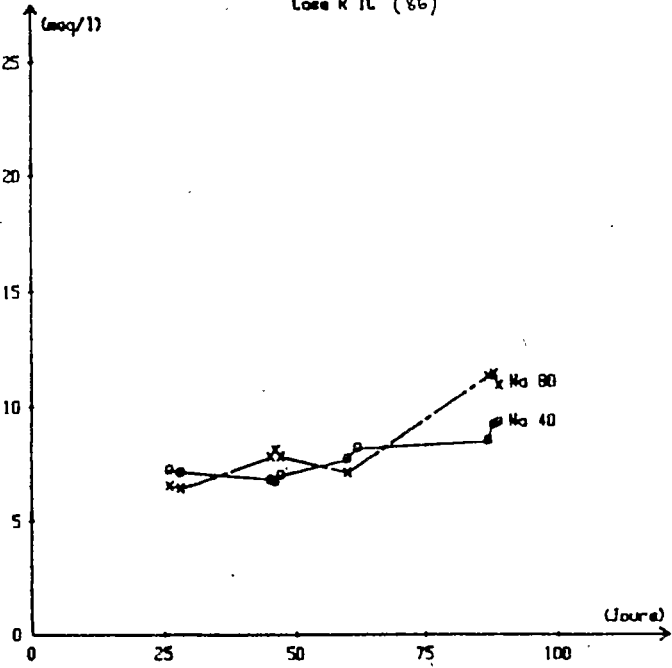
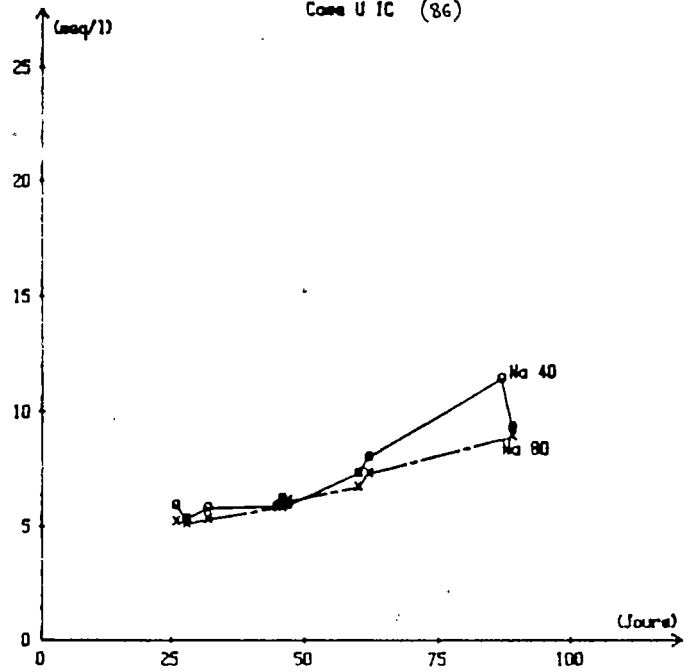


Fig11.27 EVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN SODIUM

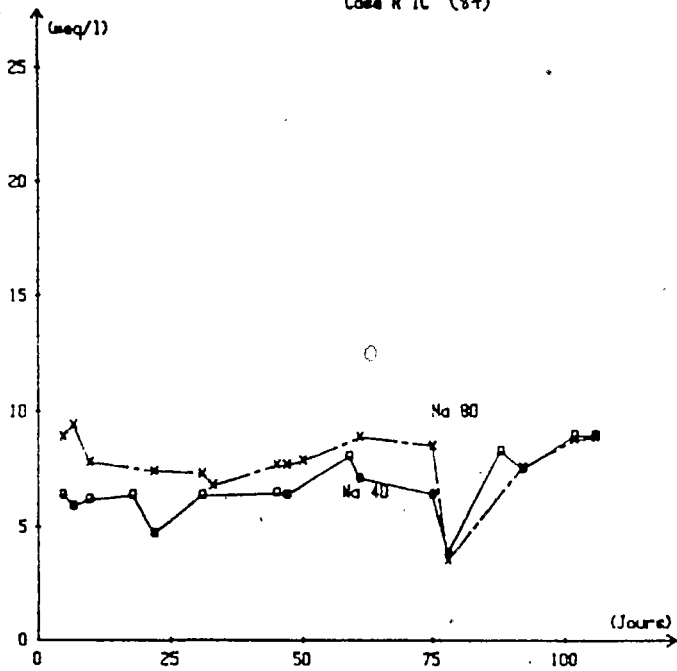
Case R IC (86)



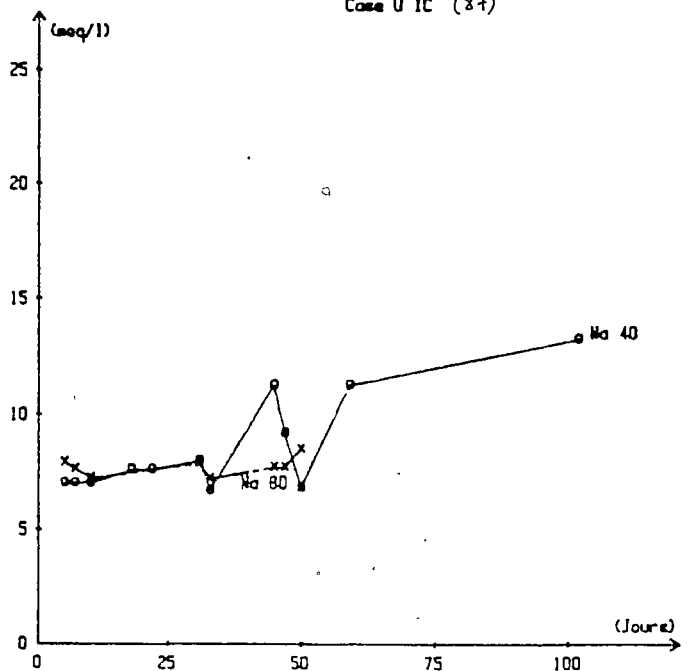
Case U IC (86)



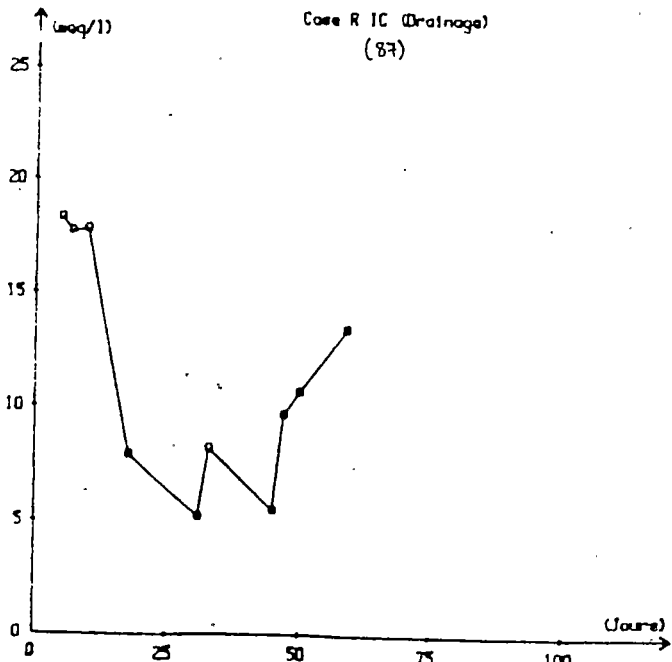
Case R IC (87)



Case U IC (87)



Case R IC (Drainage) (87)



Case U IC (Drainage) (87)

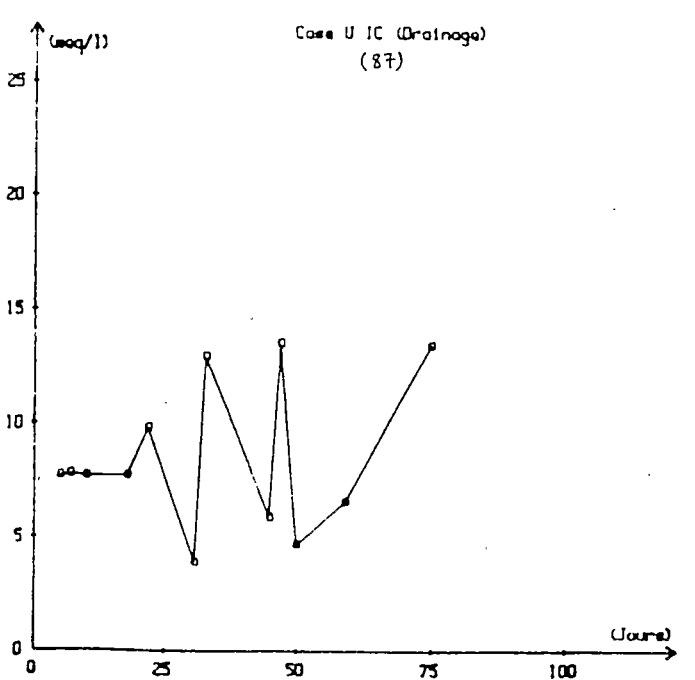
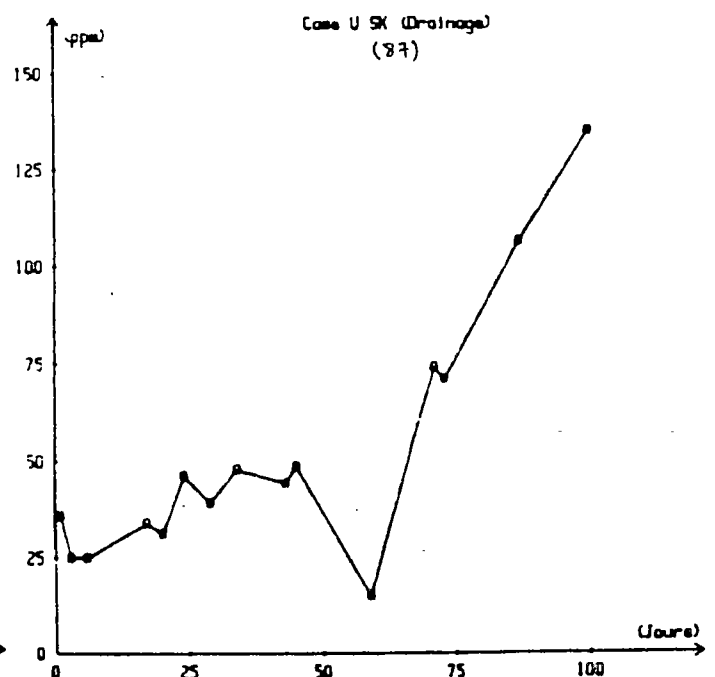
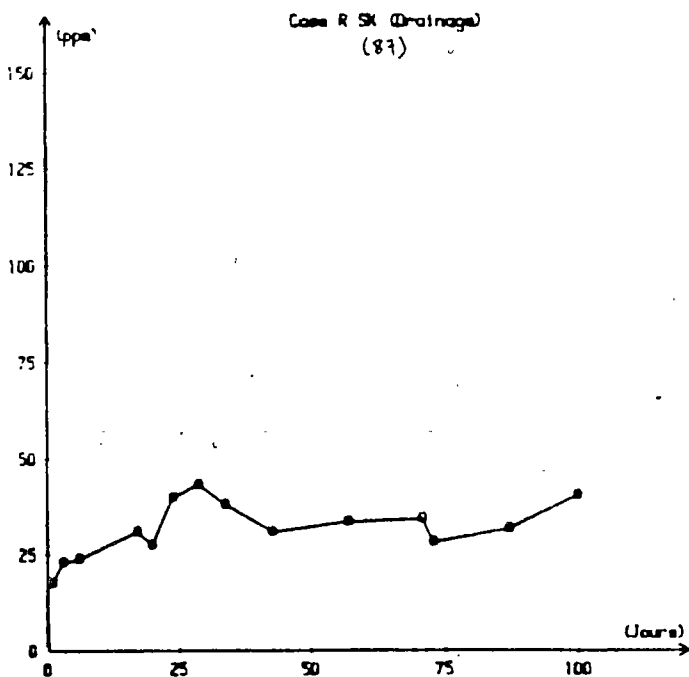
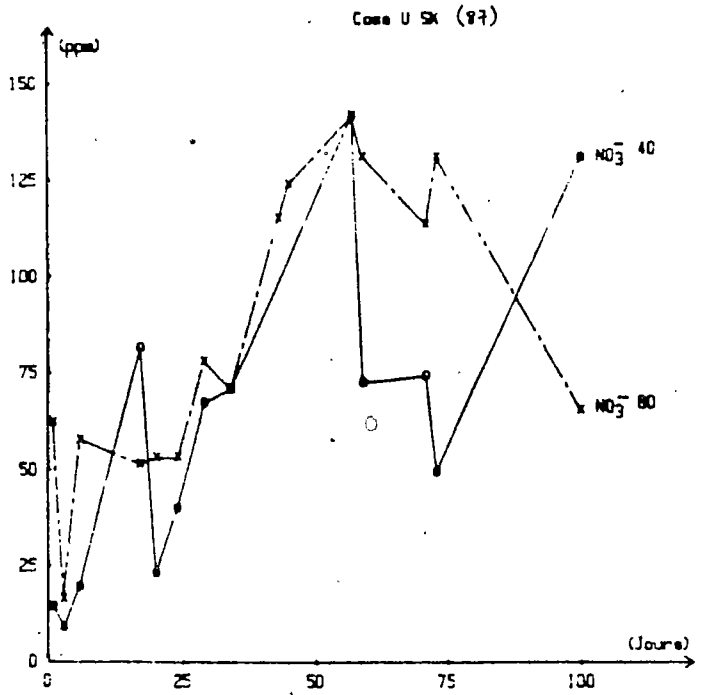
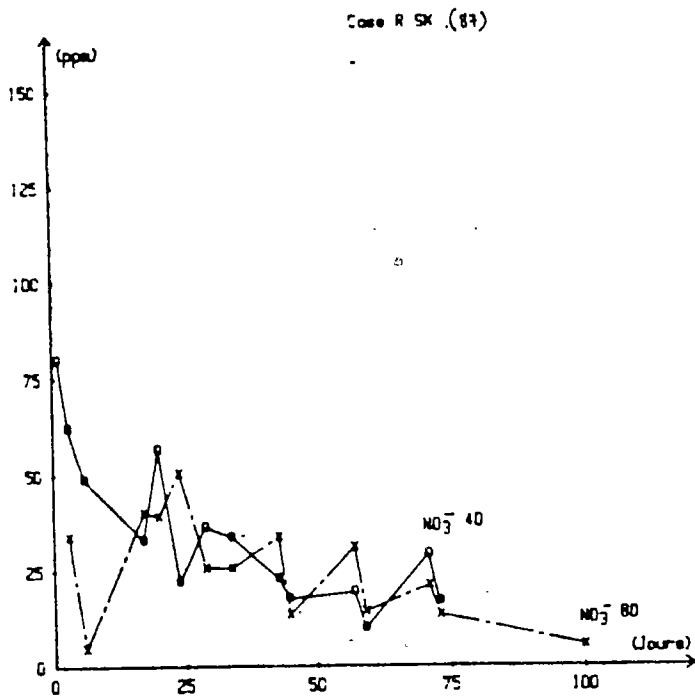
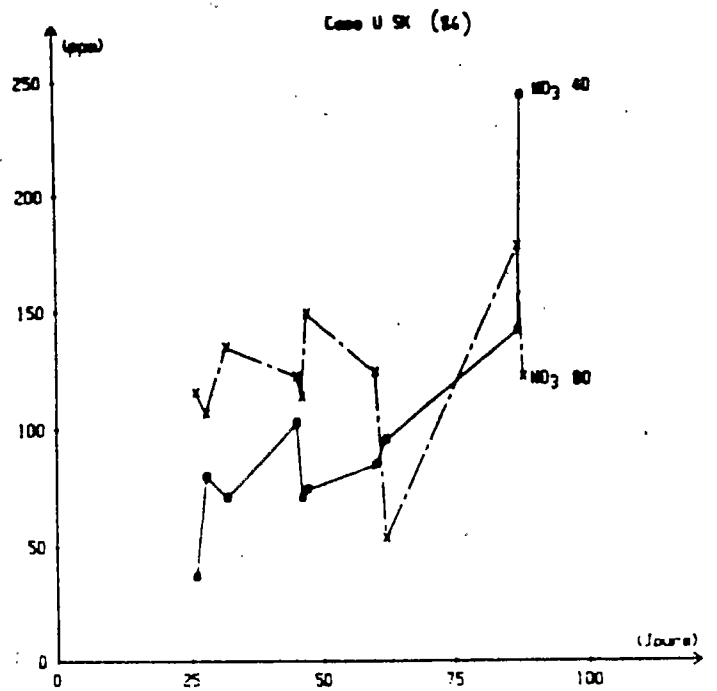
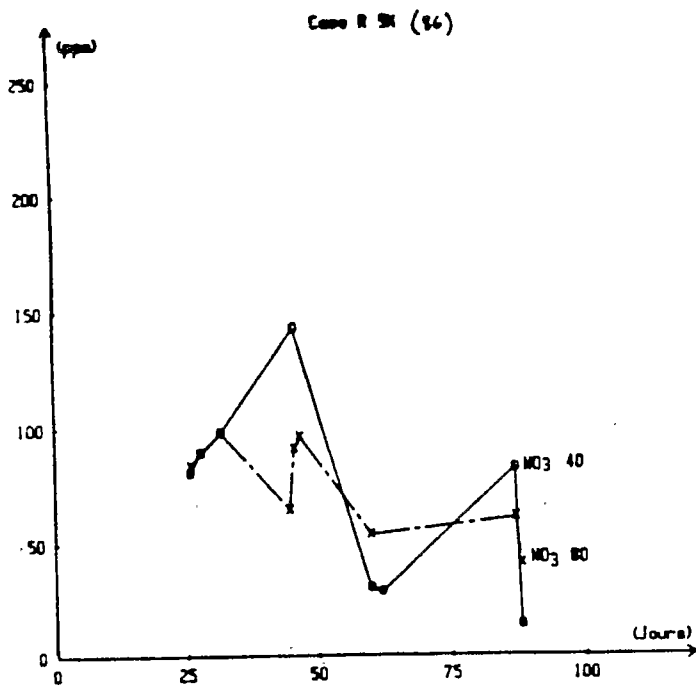


Fig 28 EVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN SORTIE



FigII.29 EVOLUTION DES NITRATES

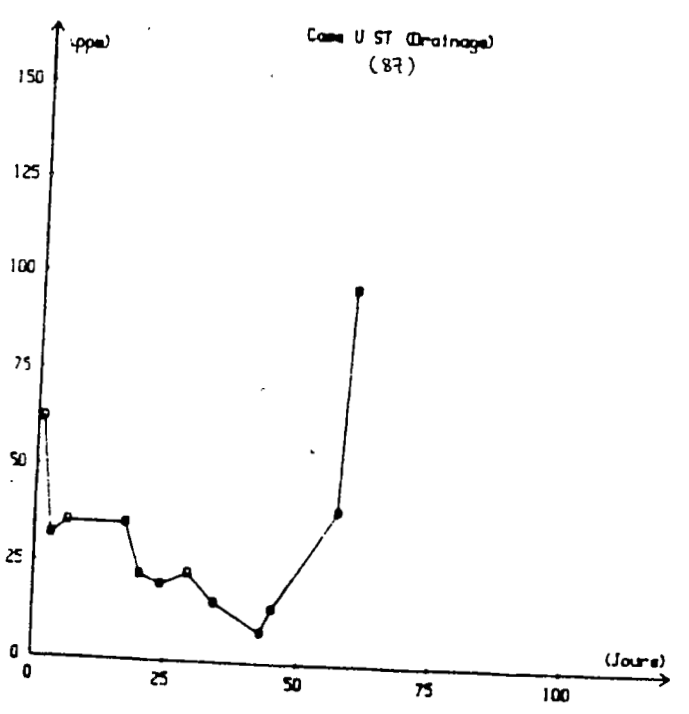
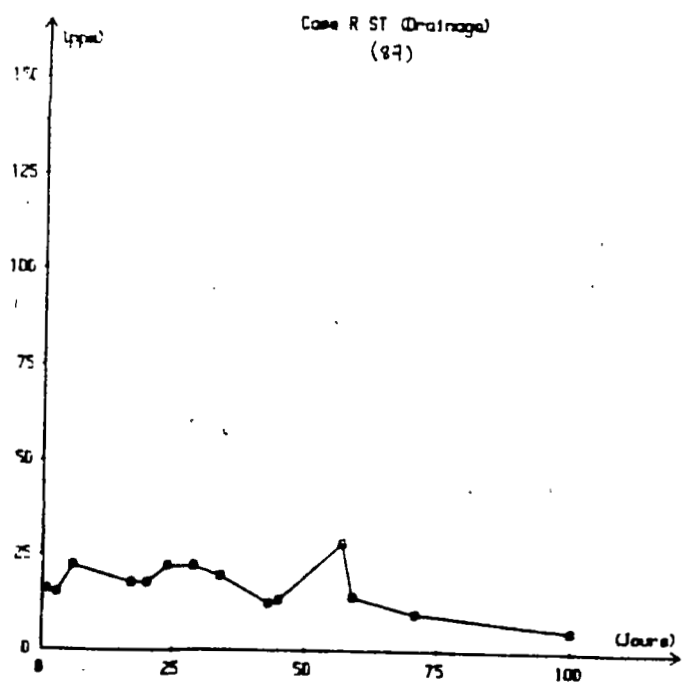
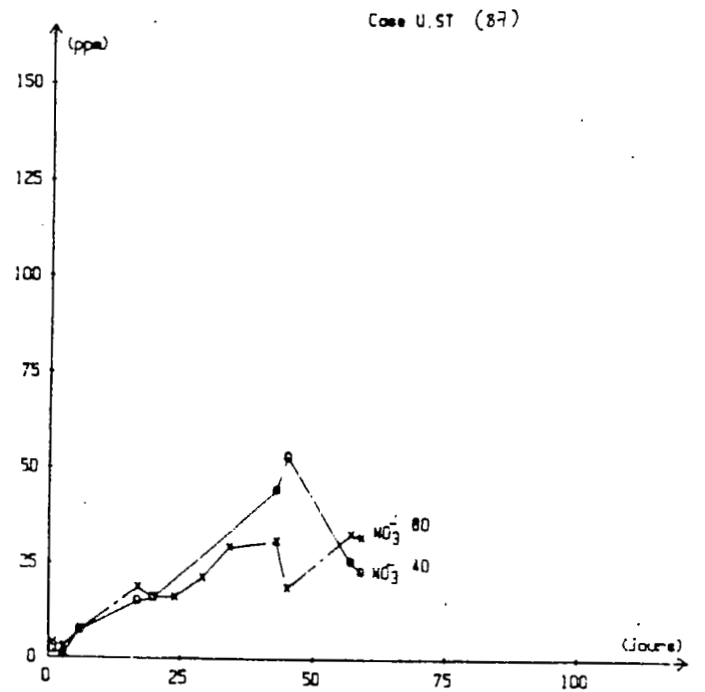
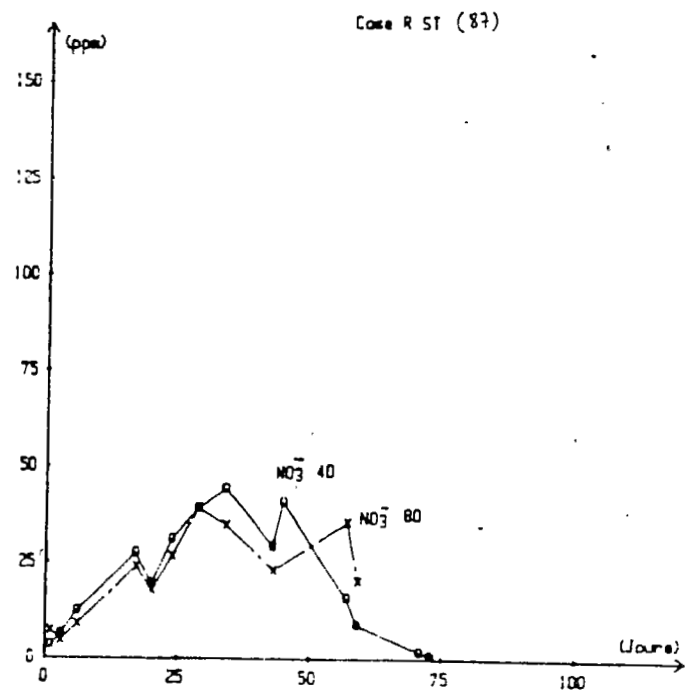
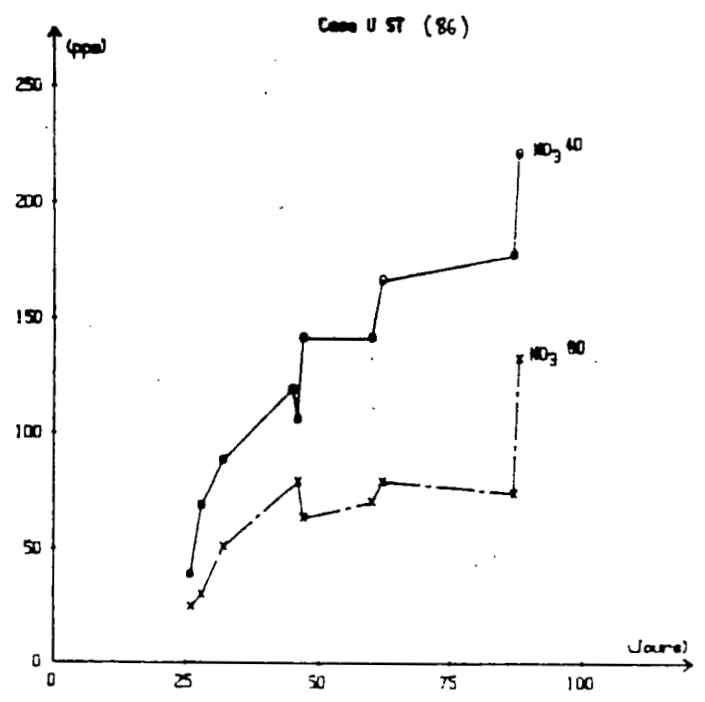
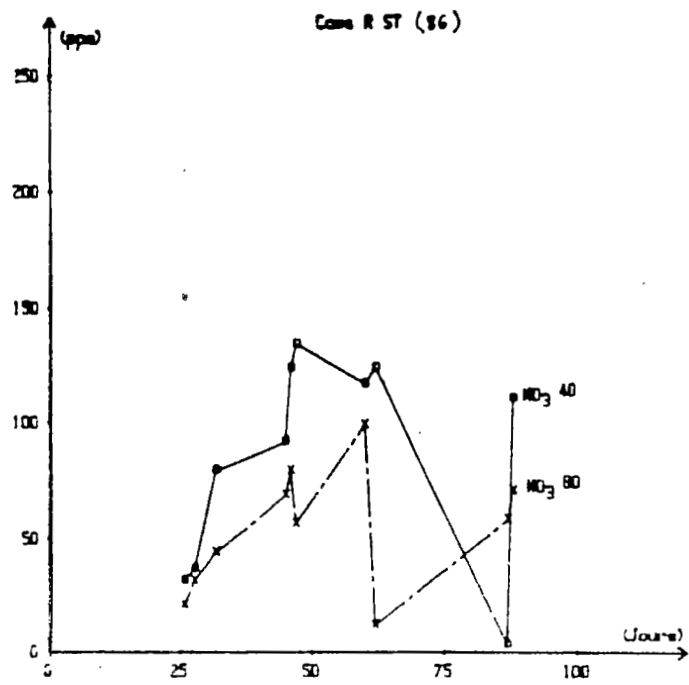
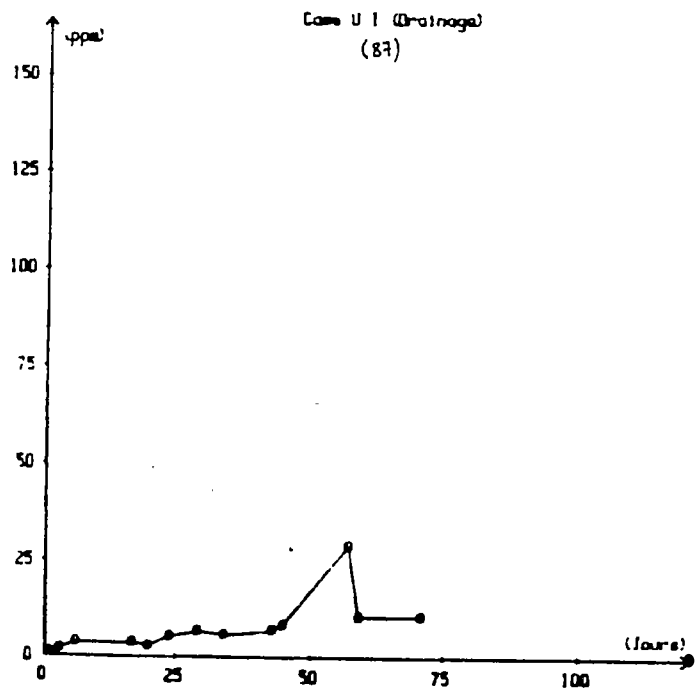
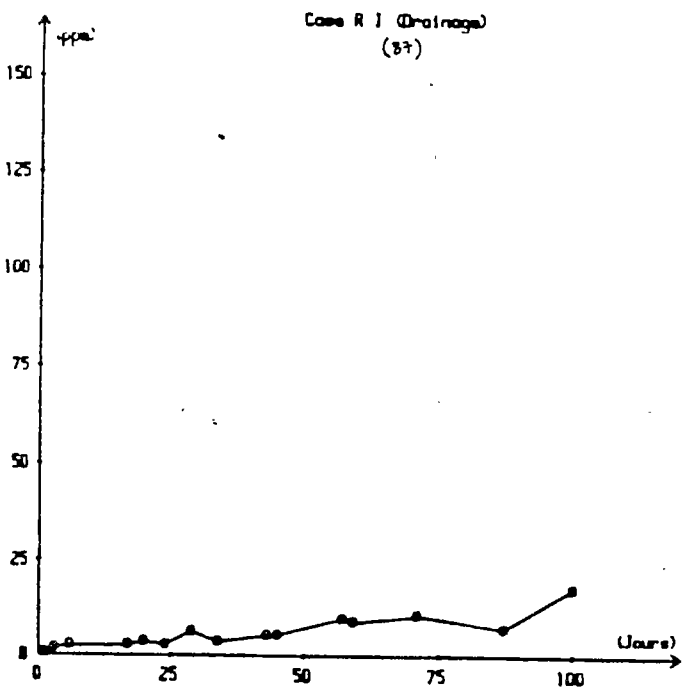
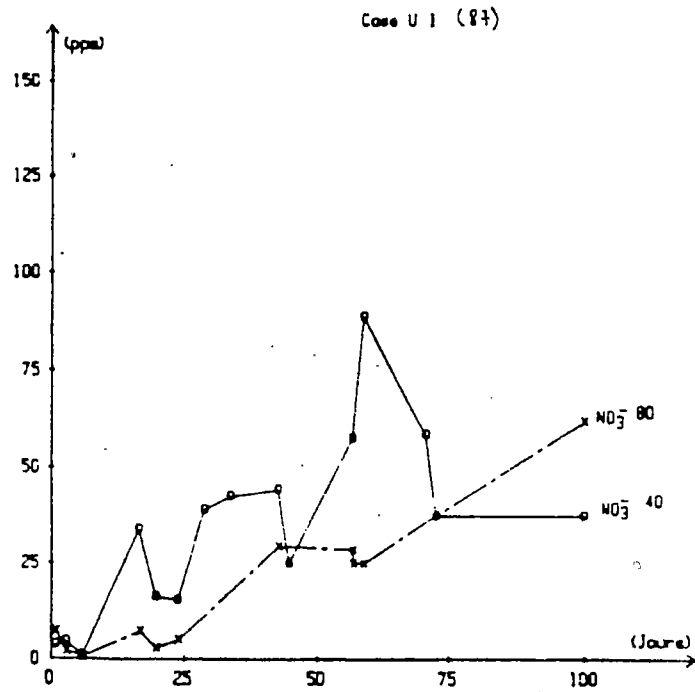
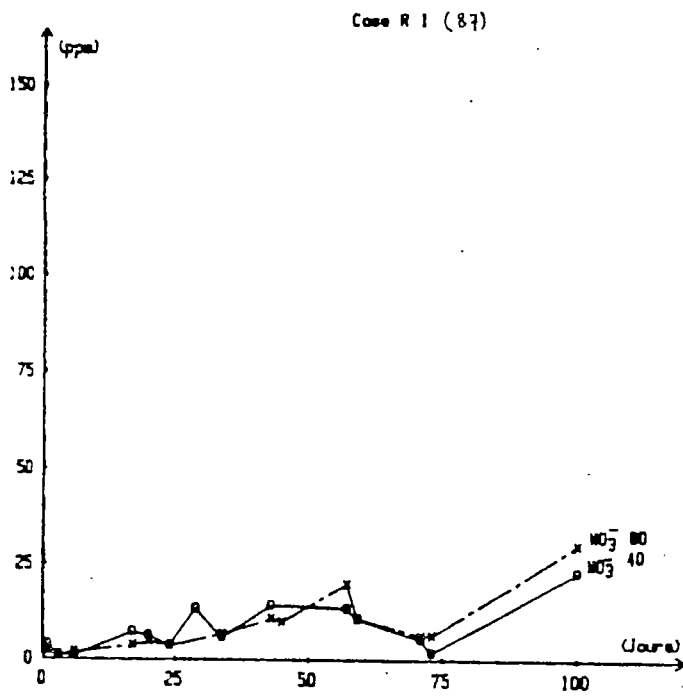
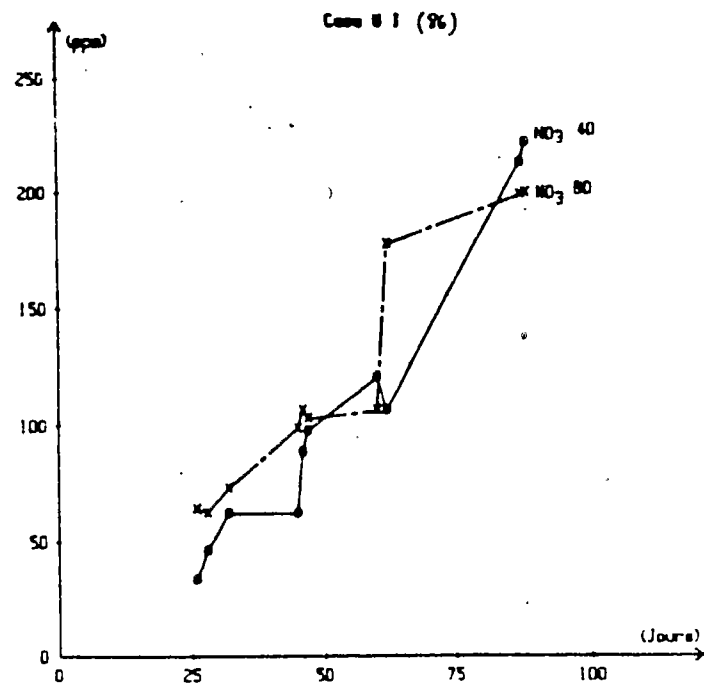
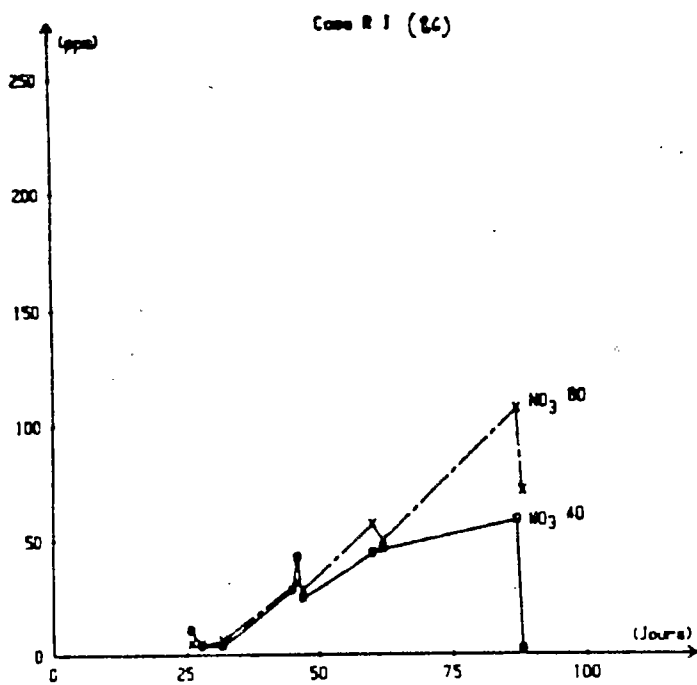
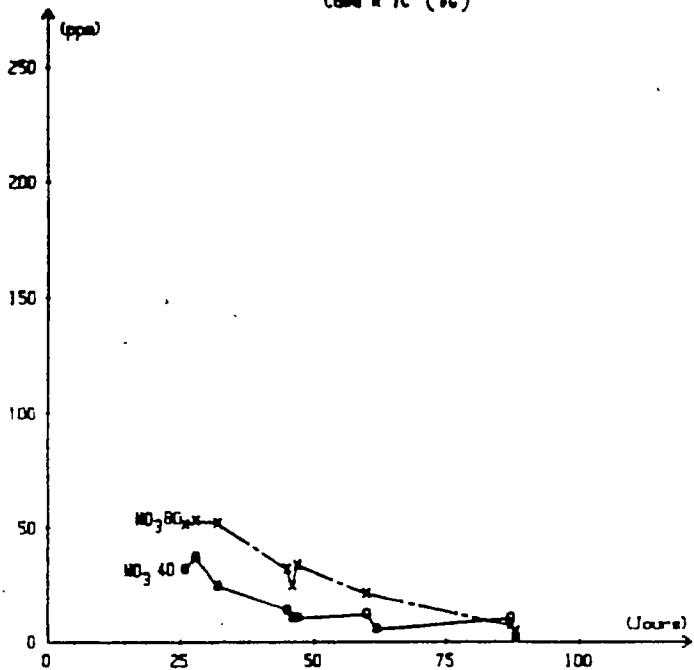


Fig11.30 EVOLUTION DES NITRATES

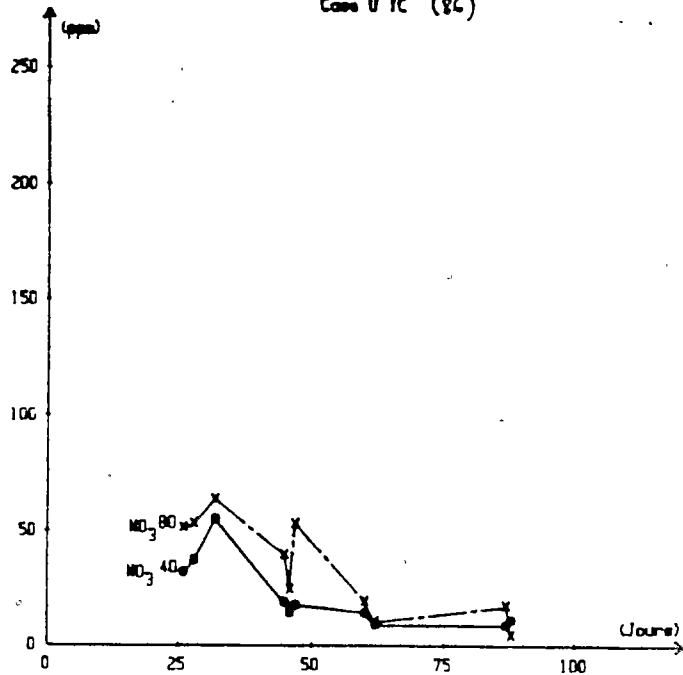


FigII.31 EVOLUTION DES NITRATES

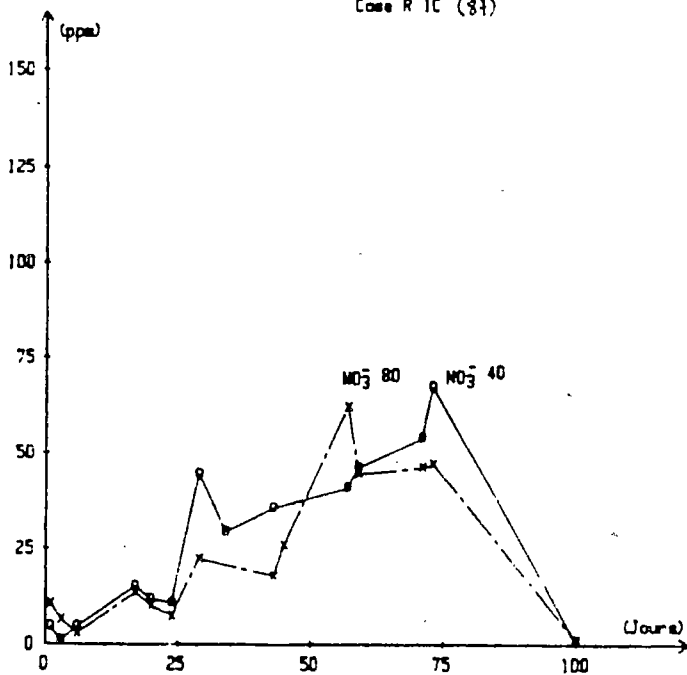
Case R IC (86)



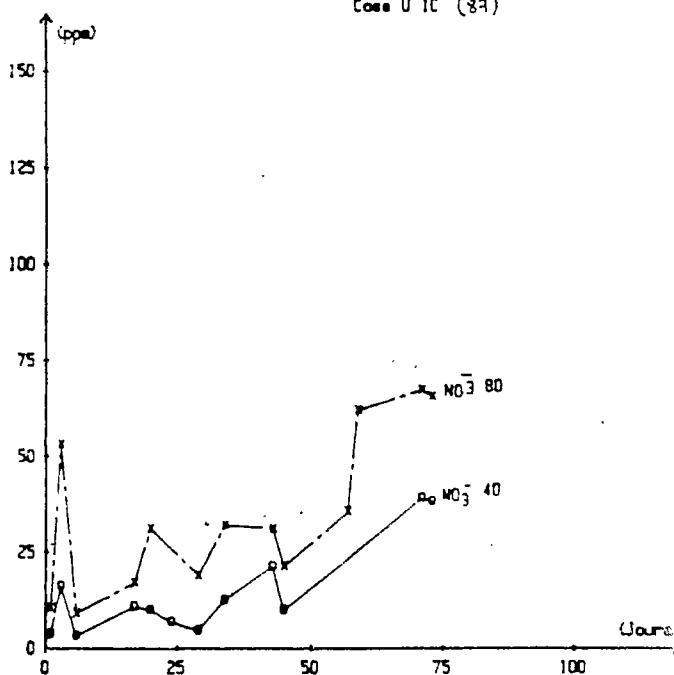
Case U IC (86)



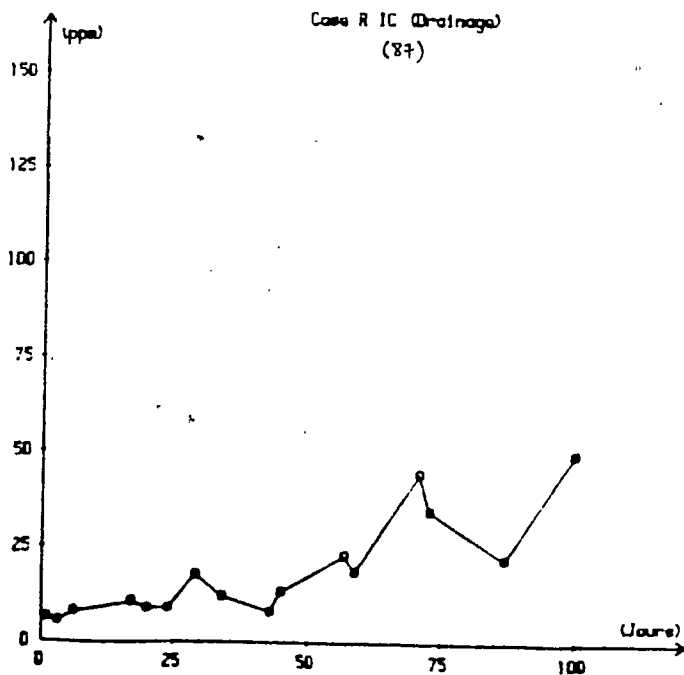
Case R IC (87)



Case U IC (87)



Case R IC (Drainage) (87)



Case U IC (Drainage) (87)

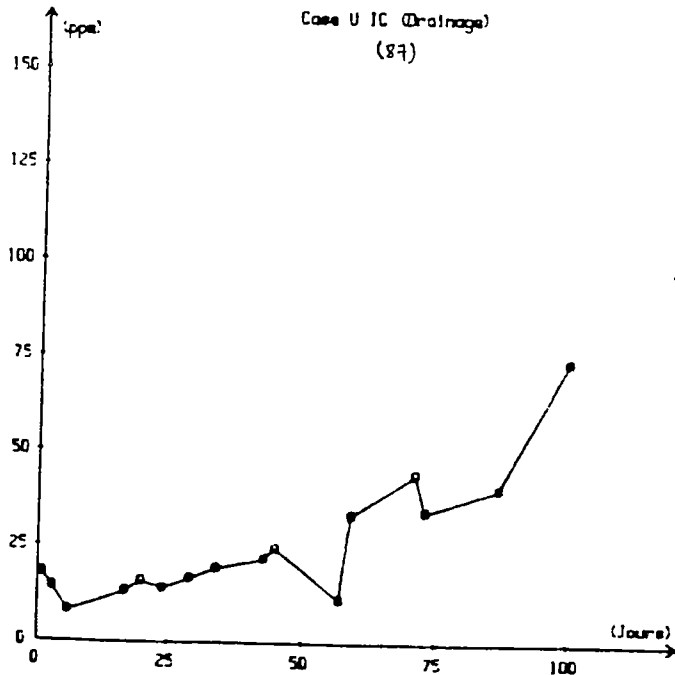


Fig11.32 EVOLUTION DES NITRATES