



ONAGRI
TUNISIE

MICROFICHE N°

10972

REPUBLIQUE TUNISIENNE
MINISTERE DE L'AGRICULTURE

الجمهورية التونسية
وزارة الفلاحة

Observatoire National de l'Agriculture
30, Rue Alain Savary - 1002 Tunis

المركز الوطني للفلاحة
30. شارع السافاري - 1002 تونس

F 1

**RESULTATS DES CAMPAGNES DE SUIVI DE L'EVOLUTION
DE LA SALINITE DES SOLS DANS LE PERIMETRE IRRIGUE
DE CEBALA-BORJ TOUIL**

**(BASSE VALLEE DE LA MEDJERDA)
PERIODE 1999 - 2002**

Par : H. Ben HASSINE et K. JELASSI (Novembre 2002)

E-S 321

REPUBLIQUE TUNISIENNE
MINISTERE DE L'AGRICULTURE, DE L'ENVIRONNEMENT
ET DES RESSOURCES HYDRAULIQUES

DIRECTION GENERALE DE L'AMENAGEMENT ET DE LA
CONSERVATION DES TERRES AGRICOLES

Résultats des campagnes de suivi de l'évolution
de la salinité des sols dans le périmètre irrigué
de Cébala-Borj Touil (basse vallée de la Mejerda).
Période 1999-2002.

ES 321

Par

Ben Hassine H. et Jelassi K., Direction des Sols

Novembre, 2002

Liste des abréviations

CEM : Conductivité électromagnétique

CEH : Conductivité électromagnétique en mode horizontal

CEV : Conductivité électrique en mode vertical

CEHcorr. : Conductivité électromagnétique en mode horizontal corrigée à une humidité de 20 % par la formule : $CEH_{corr.} = CEH + 5,4 \cdot (20 - H_{smoy})$

CEe : Conductivité électrique de l'extrait de saturation de la pâte

CE1/5 : Conductivité électrique d'un extrait sol/eau = 1/5

CEemoy. : Conductivité électrique moyenne du sol d'un point de prélèvement
 $= [2 \cdot CE_{e0-20} + CE_{e20-40} + (CE_{e40-60} + CE_{e60-80} + CE_{e80-100} + CE_{e100-120})/4]/4$

CE_{e0-20} : Conductivité électrique de l'horizon 0-20 cm

CE_{e0-40} : Conductivité électrique de l'horizon 0-40 cm = $(2 \cdot CE_{e0-20} + CE_{e20-40})/3$

CE_{e20-40} : Conductivité électrique de l'horizon 20-40 cm

CE_{e40-60} : Conductivité électrique de l'horizon 40-60 cm

CE_{e60-80} : Conductivité électrique de l'horizon 60-80 cm

CE_{e80-100} : Conductivité électrique de l'horizon 80-100 cm

CE_{e100-120} : Conductivité électrique de l'horizon 100-120 cm

Hsmoy : Humidité pondérale moyenne du sol du point de prélèvement

SOMMAIRE

1- Introduction	1
2- Matériel et méthodes	1
2-1- Les sols du périmètre	1
2-2- Les eaux d'irrigation	6
2-3- Méthodologie	6
2-3-1- La surveillance de la nappe	6
2-3-2- Le contrôle de la salinité des sols	6
3- Résultats et discussions	9
3-1- Les campagnes de suivi de 1999	9
3-1-1- La campagne d'avril 1999	9
3-1-1-1- Le contrôle de la nappe	9
3-1-1-2- La salinité des sols	9
3-1-1-3- Les corrélations entre les divers paramètres	15
3-1-2- La campagne d'octobre 1999	16
3-1-2-1- La profondeur et la salinité de la nappe	16
3-1-2-2- La salinité des sols	16
3-1-2-3- Les corrélations entre les divers paramètres	22
3-1-3- Conclusions	22
3-2- Les contrôles de l'année 2000	23
3-2-1- La profondeur et la salinité de la nappe	23
3-2-2- La salinité des sols	23
3-2-3- Les corrélations entre les divers paramètres	23
3-2-4- Conclusions	27
3-3- Les contrôles de l'année 2001	27
3-3-1- Le contrôle de mars 2001	27
3-3-2- Le contrôle de septembre-octobre 2001	29
3-3-2-1- La profondeur et la salinité de la nappe	29
3-3-2-2- La salinité des sols	29
3-3-2-3- Les corrélations entre les divers paramètres	33
3-3-2-4- Conclusions	36
3-4- Les contrôles de l'année 2002	36
3-4-1- Le contrôle de mars-avril 2002	36
3-4-1-1- La profondeur et la salinité de la nappe	36
3-4-1-2- La salinité des sols	39
3-4-1-3- Conclusions	39
3-4-2- Le contrôle de septembre-octobre 2002	39
4- Conclusions et recommandations	41
Bibliographie	43

1 – Introduction

Le périmètre irrigué de Cébala-Borj-Touil fait partie de la basse vallée de la Mejerda mais il est alimenté en eaux usées traitées. Sa situation dans l'extrémité orientale de la basse vallée lui confère une position géomorphologique basse et la présence d'une nappe phréatique salée à faible profondeur. Les eaux d'irrigation sont moyennement chargées en sels solubles ; leur conductivité électrique est voisine de 4 mS/cm (Hachicha et *al.*, 1992). Il y a par conséquent un double risque de salinisation : remontée possible du niveau du plan d'eau souterrain en cas de défaillance de fonctionnement du réseau de drainage et salinisation des sols à partir des eaux d'irrigation à cause surtout de la texture lourde des formations pédologiques répandues dans la région et surtout dans le périmètre.

Un programme semestriel de contrôle de l'évolution de la salinité des sols avec celle de la nappe phréatique et sa profondeur est réalisé par l'équipe spécialisée de la Direction des Sols. Les données disponibles sont relatives à la période 1999-2002. L'interprétation de ces données sera abordée par voie cartographique et statistique afin de pouvoir analyser la distribution spatiale de la salinité des sols, identifier l'impact de l'évolution du niveau de la nappe phréatique sur cette salinité et évaluer l'état de salinisation des sols après de nombreuses années d'irrigation et plusieurs campagnes de contrôle.

2 – Matériel et méthodes

2-1- Les sols du périmètre

Une étude récente (Dérrouiche et *al.*, 2001) réalisée sur le périmètre a procédé à sa cartographie détaillée et a abouti au fait que des changements ont concerné ses sols après les aménagements qui y ont été effectués pour mise en irrigation et rabattement du niveau de la nappe phréatique. Les sols salés auraient disparu ainsi qu'une partie des sols peu évolués à caractère de salure dont la surface est devenue, par conséquent, plus rétrécie.

La couverture pédologique actuelle est formée de :

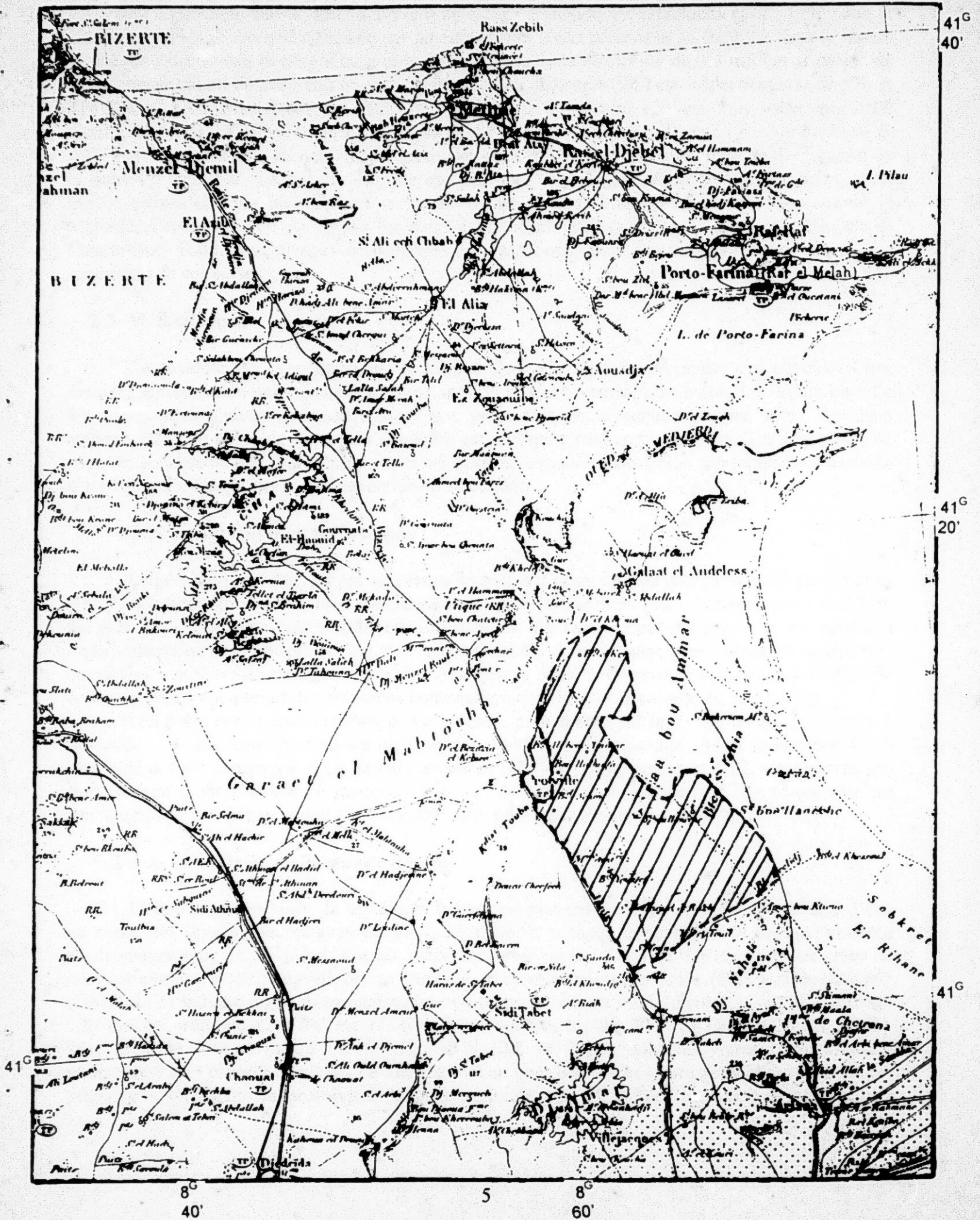
- Sols peu évolués d'apport occupant la majeure partie du périmètre ; leur texture est souvent fine en surface et tend à devenir plus légère en profondeur. Des caractères vertiques et de salure peuvent apparaître dans ces sols. La salure est provoquée par la présence d'une nappe phréatique salée à faible profondeur (1 à 3 m).
- Sols calcimagnésiques bruns calcaires se cantonnant dans l'extrême nord-est du périmètre et se caractérisant par leur richesse en carbonates de calcium qui s'accumulent en des formes secondaires, souvent discontinues, dans les horizons inférieurs du profil. Leur surface est relativement faible par rapport à celle des sols peu évolués. Leur texture est argilo-limoneuse en surface.
- Sols salés à alcali pénétrant en deux endroits dans le périmètre sur la bordure orientale et occupant une surface réduite. Leur texture est argileuse. Cependant, la salinité peut se manifester dans les horizons inférieurs des sols qui sont en contact permanent avec la nappe phréatique salée. Ces types de sols sont classés comme sols peu évolués à caractère de salure ; à l'origine, et avant le rabattement du niveau de la nappe par le réseau de drainage, ils étaient considérés comme sols salés.

Les sols du périmètre sont donc des sols de plaines, d'apport alluvial surtout ; leur texture est le plus souvent argileuse et la salinité est largement répandue surtout dans les horizons profonds. La nappe phréatique n'est pas profonde et son niveau est rabattu par le réseau de drainage aménagé.

Les facteurs causant la salinité des sols existent dans ce périmètre. Ce sont le faible niveau de la nappe phréatique et la texture fine des sols auxquels s'ajoute la qualité moyenne à médiocre de l'eau d'irrigation.

Fig. 1- Plan de situation du périmètre irrigué de Cébala-Borj Touil

Echelle : 1/200 000



2-2- Les eaux d'irrigation

Ce sont les eaux usées traitées de la station d'épuration de l'ONAS à Soukra (Sidi Salah). Elles sont légèrement salées, soit 4 mS/cm ou 2,5 g/l de résidu sec (Hachicha et al., 1992 ; Job et Hachicha, 1990). L'analyse effectuée sur un échantillon d'eau prélevé le 18/09/2002 dans le réseau d'irrigation desservant le périmètre a donné une conductivité électrique de 3,3 mS/cm et un pH de 8. La concentration de cette eau en sodium (Na^+) et en chlorures (Cl^-) est respectivement de 530 et 816,5 mg/l (Arrondissement des Sols de l'Ariana, 2002). Cette eau est plus salée que celle distribuée par la SONEDE ; elle doit se concentrer en sels après son utilisation par les ménages et aussi par une éventuelle alimentation à partir des eaux souterraines dans les bacs de décantation de la station d'épuration. La salinité de cette eau peut être considérée comme à risque de salinisation moyen puisqu'elle n'a pas dépassé les 4 mS/cm et sa concentration est proche de celle de la Mejerda. Cependant, son utilisation sur des sols à texture argileuse comme ceux du périmètre de Cébala-Borj Touil, peut générer de possibles accumulations de sels notamment dans les horizons supérieurs de ces sols.

2-3- Méthodologie

Le contrôle de l'évolution de la salinité des sols dans ce périmètre est effectué d'une manière semestrielle : une fois au printemps après la saison hivernale plus humide et durant laquelle les agriculteurs s'abstiennent d'irriguer ; une autre fois en septembre-octobre après la saison estivale sèche au cours de laquelle l'irrigation est pratiquée par les agriculteurs. Les opérations de contrôle concernent à la fois la nappe et le sol et visent à étudier l'évolution des paramètres mesurés d'une part et à déterminer leurs interactions d'autre part.

2-3-1- La surveillance de la nappe

Le périmètre est couvert par un réseau de points d'observations comprenant 50 piézomètres (fig. 2). Ces instruments sont implantés dans le sol jusqu'à une profondeur variant entre 2 et 2,5 m. Ce sont des tubes métalliques crépinés verticalement sur leur moitié inférieure, ce qui permet à l'eau souterraine de pénétrer et d'indiquer le niveau statique de la nappe. Les opérations de contrôle consistent à mesurer d'abord le niveau de l'eau dans le piézomètre puis prélever un échantillon de cette eau pour l'analyser et déterminer sa composition chimique et sa salinité au laboratoire.

Les piézomètres sont installés d'une manière permanente sur le terrain ce qui les expose à des actions d'arrachage ou d'endommagement volontaire et involontaire. Ainsi le nombre de 50 observations par campagne n'est jamais atteint et il n'y a pratiquement que 22 piézomètres qui fonctionnent d'une manière permanente (Tab.1). Ces problèmes n'ont pas pu être résolus malgré des opérations de remplacement et de sensibilisation des agriculteurs de la région.

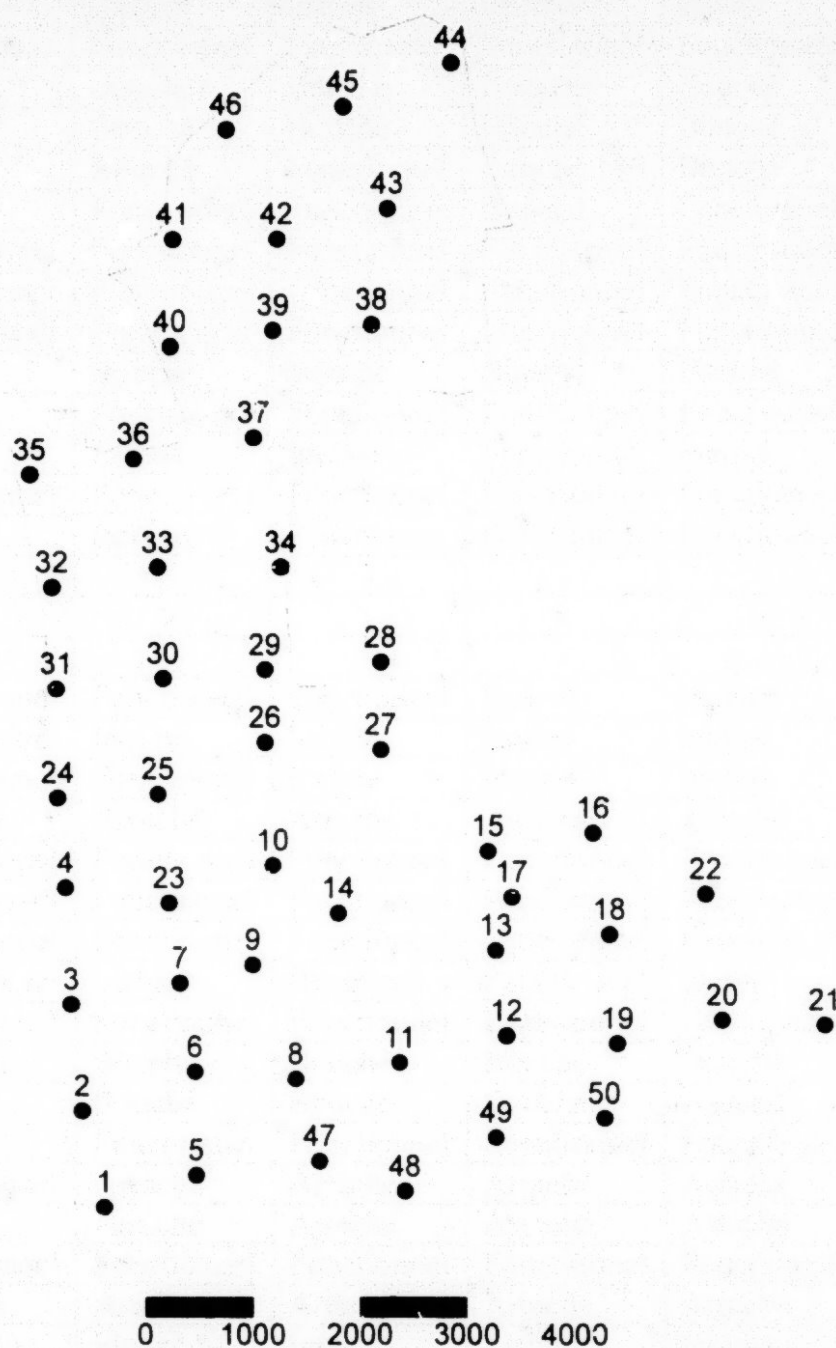
2-3-2- Le contrôle de la salinité des sols

Le nombre de mesures de la salinité des sols est plus élevé et plus constant que celui de l'eau au cours des diverses campagnes de suivi. La méthode utilisée est celle de la conductivimétrie électromagnétique (CEM) qui fournit deux mesures notées CEV et CEH, obtenues avec le conductivimètre électromagnétique en position, respectivement, verticale (CEV) et horizontale (CEH). CEH indique une mesure intégrée proportionnelle à la salinité du sol et à son humidité sur 120 cm de profondeur ; CEV est relative à une profondeur de 200 cm (Job et Maraï, 1991). L'appareil de mesure utilisé est le GEONICS EM 38 DLM, dont les spires (inductrices et réceptrices) sont espacées de 1 m. La mesure choisie pour estimer la salure globale du sol est CEH puisqu'elle représente la profondeur la plus exploitée par les racines des espèces cultivées en

irrigué. Job (1993) signale que le choix de CEH est dicté par le fait qu'une nappe est présente souvent au-delà de 120 cm.

Les valeurs de CEH mesurées sur le terrain (CEHcorr.) sont rapportées à une valeur de 20 % d'humidité pondérale, selon la formule : $CEH_{corr.} = CEH + 5,4 \cdot (20 - H_{moy})$ (Hachicha et al. in Ben Hassine et Jelassi, 2001), où H_{moy} est l'humidité moyenne du sol.

Fig. 2- Localisation des piézomètres (points de contrôle) dans le périmètre irrigué de Cébala-Borj Touil



L'humidité est mesurée sur les échantillons de sols prélevés sur les 18 points de contrôle situés à proximité des piézomètres suivants : 2, 3, 8, 10, 13, 17, 19, 25, 26, 27, 28, 29, 33, 35, 37, 42, 47, 49. Le périmètre est partagé en huit plages texturales homogènes conformément à la répartition figurant sur la carte des sols du périmètre (Déroutiche et al., 2001). Chaque unité est représentée par un ou plusieurs points de contrôle :

- Unité 1 : 47, 49
- Unité 2 : 2

Tab. 1- Evolution de l'état des piézomètres au cours des campagnes de suivi à Cébala-Borj Touil

N ^{os} Piézo.	Campagnes de suivi						
	04/1999	10-11/1999	05/2000	03/2001	09-10/2001	04/2002	09-10/2002
1	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel
2	Fonctionnel	Tordu	Tordu	Autoroute	Autoroute	Autoroute	Autoroute
3	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel
4	Fonctionnel	Tordu	Incliné	Incliné	Incliné	Incliné	Incliné
5	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel
6	-	Bouché	Bouché	Bouché	Bouché	Bouché	Bouché
7	Incliné	Incliné	Incliné	Incliné	Incliné	Incliné	Incliné
8	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel
9	Bouché	Bouché	Bouché	Bouché	Bouché	Bouché	Bouché
10	Bouché	Bouché	Bouché	Bouché	Bouché	Bouché	Bouché
11	Fonctionnel	Bouché	Bouché	Fonctionnel	Bouché 180	Bouché	Bouché
12	Fonctionnel	Bouché	Fonctionnel	Fonctionnel	Bouché	Fonctionnel	Fonctionnel
13	Bouché	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel
14	Bouché	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel
15	Bouché	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel
16	Bouché	Bouché	Bouché	Bouché	Bouché	Bouché	Arraché
17	Fonctionnel	Bouché	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel
18	Incliné	Incliné	Incliné	Incliné	Fonctionnel	Incliné	Incliné
19	-	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel
20	-	Bouché	Bouché	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel
21	Fonctionnel	-	-	-	-	-	-
22	Fonctionnel	-	-	-	-	-	-
23	Fonctionnel	-	-	-	-	-	-
24	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Incliné	Incliné	Incliné
25	Fonctionnel	Fonctionnel	Incliné	Incliné	Incliné	Incliné	Incliné
26	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Incliné	Incliné	Incliné	Incliné
27	Fonctionnel	Arraché	Arraché	Arraché	Arraché	Arraché	Arraché
28	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel
29	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Bouché
30	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel
31	Incliné	Fonctionnel	Incliné	Remplacé	Fonctionnel	Incliné	Incliné
32	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel
33	Fonctionnel	Bouché	Bouché	Bouché	Bouché	Bouché	Arraché
34	Bouché	Bouché	Bouché	Bouché	Bouché	Bouché	Bouché
35	Fonctionnel	Bouché	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel
36	Fonctionnel	Fonctionnel	Arraché	Arraché	Arraché	Arraché	Arraché
37	Fonctionnel	-	Arraché	Arraché	Arraché	Arraché	Arraché
38	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel
39	Arraché	Arraché	Arraché	Arraché	Arraché	Arraché	Arraché
40	Incliné	Incliné	Incliné	Incliné	Incliné	Incliné	Incliné
41	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel
42	Incliné	Incliné	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel
43	-	Arraché	Arraché	Arraché	Arraché	Arraché	Arraché
44	-	Arraché	Arraché	Arraché	Arraché	Arraché	Arraché
45	-	Arraché	Arraché	Arraché	Arraché	Arraché	Arraché
46	-	Arraché	Arraché	Arraché	Arraché	Arraché	Arraché
47	Fonctionnel	Arraché	Arraché	Arraché	Arraché	Arraché	Arraché
48	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	-	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel
49	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel
50	-	Bouché	Fonctionnel	Bouché	Fonctionnel	Fonctionnel	Fonctionnel

- Unité 3	:	8
- Unité 4	:	3, 13, 17, 19
- Unité 5	:	10
- Unité 6	:	27, 28
- Unité 7	:	25, 26, 29, 33, 35
- Unité 8	:	37, 42

L'humidité est calculée, dans le cas où deux ou plusieurs points représentent l'unité texturale, par une moyenne de l'humidité (Hsmoy) des divers points de prélèvement. Par exemple, pour l'unité 8, l'humidité est obtenue par la somme des humidités moyennes des points 37 et 42 (relatives aux diverses profondeurs du sol) divisée par deux. Le résultat obtenu permet de corriger les valeurs de CEH pour les points 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45 et 46.

Les valeurs de CEHcorr. n'expriment pas directement la salinité globale du sol mais en sont proportionnelles. Une corrélation entre les valeurs de CEHcorr. et la salinité moyenne du sol (CEe moy.) est nécessaire. CEe moyenne est obtenue par la formule modifiée suivante (UNESCO/UNDP, 1970) : $CEe_{moy.} = [2 \cdot CEe_{0-20} + CEe_{20-40} + CEe_{40-60} + (CEe_{60-80} + CEe_{80-100} + CEe_{100-120})/3]/4$.

La mesure de CE1/5 permet de déterminer l'équation de corrélation entre ce paramètre et CEe. Dans le cas où seul le paramètre CE1/5 existe, l'approche est faite en utilisant les équations de corrélation obtenues lors des campagnes de suivi précédant la campagne concernée. La période de suivi s'étend entre 1999 et 2002. Les mesures ne sont pas disponibles d'une manière régulière. Les prélèvements d'échantillons de sols sont parfois manquants faute de crédits.

3- Résultats et discussions

3-1- Les campagnes de 1999

3-1-1- La campagne d'avril 1999

3-1-1-1- Le contrôle de la nappe

La carte de répartition spatiale du niveau de la nappe au cours de cette période indique le fort espace occupé par l'intervalle de valeurs compris entre 0,8 et 1,2 m (fig. 3). La nappe a tendance à remonter au-delà de 1,2 m sur presque toute la bordure ouest du périmètre longeant la route de Tunis à Bizerte et sur une partie de sa bordure orientale. C'est, par conséquent, dans la partie centrale du périmètre que le niveau de la nappe est le plus élevé au cours de cette période.

La carte de la distribution spatiale de la salinité de la nappe (fig. 4) montre une concentration de cette dernière au milieu du périmètre, avec une salinité comprise entre 12 et 15 mS/cm. Elle a tendance à diminuer vers les bordures du périmètre, sans descendre en dessous de 6 mS/cm. Une telle nappe salée peut communiquer ses sels à la zone racinaire lorsque son niveau remonte au-delà de 1,2 m (Mami et Hamdane, 1977 ; Ben Hassine et al., 1981).

3-1-1- La salinité des sols

- La salinité moyenne, CEe moyenne (mS/cm), calculée sur 120 cm de profondeur (UNESCO/UNDP, 1970) est plus faible dans la moitié nord du périmètre (fig. 5). Elle reste aussi modérée sur les bordures orientale et occidentale avec des valeurs voisines de 2 mS/cm. Elle ne s'accroît pour atteindre les 6 mS/cm que près de la bordure méridionale du périmètre. De telles valeurs sont élevées et reflètent un processus de salinisation qui pourrait être dû soit à une remontée du niveau de la nappe, ce qui n'est pas démontré par la carte de la figure 3, soit à une intense activité d'irrigation sur des sols de texture fine, d'où l'accumulation des sels.

- La conductivité électromagnétique corrigée par rapport à une humidité de 20 % (CEHcorr.) atteint une valeur maximale de 180 près de la bordure centrale ouest (fig. 6). Le chiffre le plus bas est 70

Fig. 3- Carte de la profondeur (m) du plan d'eau dans le périmètre irrigué de Cébala-Borj Touil. Avril, 1999.

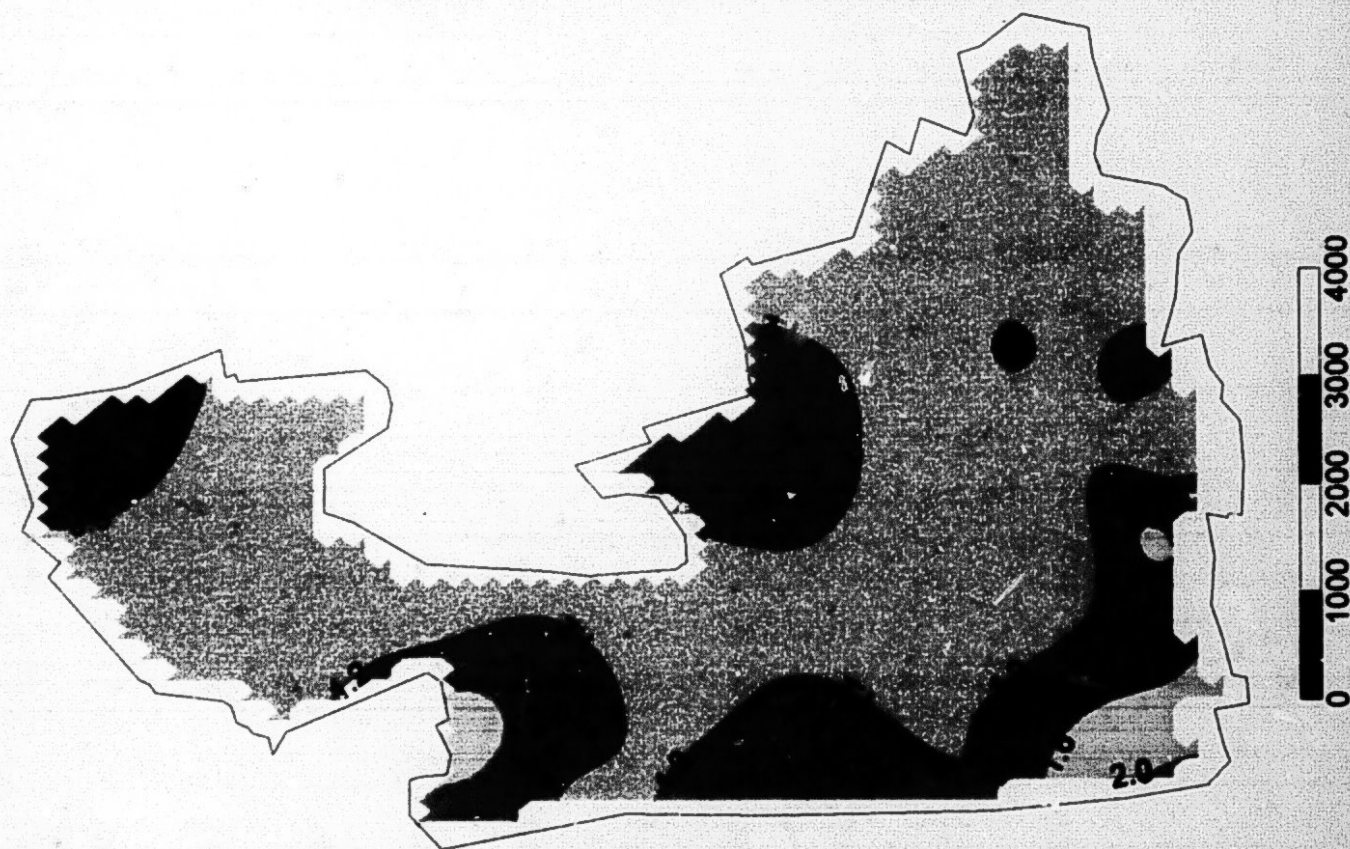
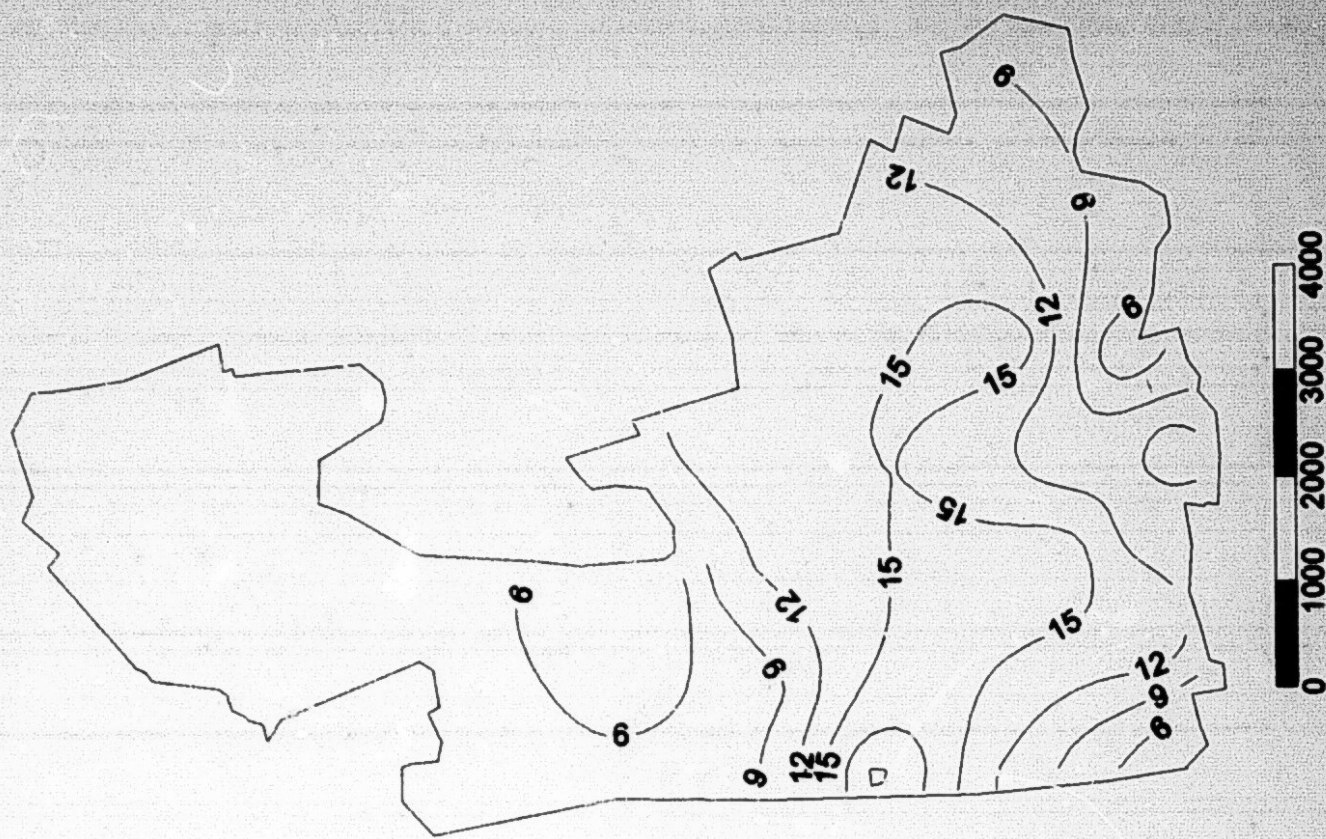


Fig. 4- Carte de la salinité (mS/cm) du plan d'eau dans le périmètre irrigué de Cébala-Borj Touil. Avril, 1999.



3-2- Le contrôle de l'année 2000

Une seule campagne a été réalisée au cours de cette année. Elle a été effectuée en mai 2000. La campagne de septembre-octobre a été sautée du fait de la réalisation d'une opération d'implantation de pézomètres à Kalad Lamloul.

3-2-1- La profondeur et la salinité de la nappe

La carte de distribution des isovaleurs du niveau du plan d'eau (fig. 29) signale que la nappe est plus proche de la surface du sol dans la moitié est du périmètre, avec une remontée plus nette dans la moitié sud. En effet, une plage de quelques centaines d'hectares est envahie par l'eau de la nappe à une profondeur inférieure à 1,2 m. Ce niveau chute à une profondeur comprise entre 1,2 et 1,6 m dans le reste de la bordure orientale du périmètre. Toute la bordure occidentale affiche un niveau du plan d'eau supérieur à 1,6 m. Une telle distribution spatiale est proche de la réalité puisque le niveau du terrain naturel est plus bas vers l'est et aussi les sols salés font leur apparition dans cette partie du périmètre (Derouiche et al., 2001). Le niveau de la nappe assez proche de la surface du sol, peut avoir un impact négatif sur la productivité de ce dernier en lui communiquant les sels dissous qui accroissent la concentration de ses sol-solés.

La concentration en sels des eaux de la nappe, estimée par la conductivité électrique de cette dernière (fig. 30), est plus élevée dans la moitié sud avec des valeurs comprises entre 9 et 12 mS/cm. Dans la moitié nord, c'est une courbe de 6 mS/cm qui apparaît. La nappe est, par conséquent, plus concentrée dans la moitié sud, ce qui est déjà observé au cours des campagnes précédentes. La nappe serait plus diluée près du lit de la Mjerda qui devrait alimenter latéralement les eaux de cette nappe constamment drainée dans le périmètre à travers le réseau de drainage artificiel aménagé.

3-2-2- La salinité des sols

Elle est évaluée par la conductivité électromagnétique rapportée à 20 % d'humidité (CEH₂₀). Les courbes d'isovaleurs de CEH₂₀ sont plus élevées dans la moitié sud du périmètre et surtout du côté de la bordure orientale (fig. 31). Elles augmentent aussi, sur une plus faible surface, à l'extrémité nord-ouest du périmètre. Les plus fortes valeurs atteignent 150 en formant des noyaux circulaires situés aux milieux d'anneaux concentriques à valeurs décroissantes vers l'extérieur de CEH₂₀. Les plus faibles valeurs varient entre 40 et 70 et sont observées sur la bordure sud et dans une large part de la moitié nord du périmètre. Ces valeurs devraient être proportionnelles à la salinité des sols (CE_s moyenne). Une équation du second degré lie les deux paramètres (fig. 32). Le coefficient de corrélation n'est pas significatif ($r = 0,455$) mais reste proche de la valeur minimale significative (0,497 avec 14 ddl). La salinité des sols, estimée par CEM et malgré les facteurs perturbant la relation avec CE_s moyenne, est plus élevée dans la moitié sud du périmètre, avec une poussée vers la bordure orientale, plus proche des sols salés identifiés dans la région (Derouiche et al., 2001).

3-2-3- Les corrélations entre les divers paramètres mesurés

- Comme la nappe s'est rapprochée de la surface du sol dans la partie sud-est du périmètre et que la CEM a augmenté dans cette zone, une corrélation négative devrait lier les deux paramètres. C'est ce qui est, en effet, confirmé par le test de corrélation réalisé entre les deux variables (fig. 33). Le coefficient r est significatif au seuil de 0,05 avec une valeur de $-0,5634$. L'équation à plus fort coefficient de détermination (R^2) est du type polynomial. La remontée de la nappe phréatique a eu, probablement, un effet sur la salinité des sols, c'est ce que laissent penser les mesures de conductivimétrie électromagnétique.

- La régression entre la salinité de la nappe et CEH₂₀, n'est pas significative avec un coefficient $r = 0,143$ (fig. 34). Les deux variables ne se distribuent pas d'une manière proportionnelle ou

Fig. 29. Carte de la profondeur (m) du plan d'eau dans le périmètre irrigué de Cébala-Borj Toul Mai 2000

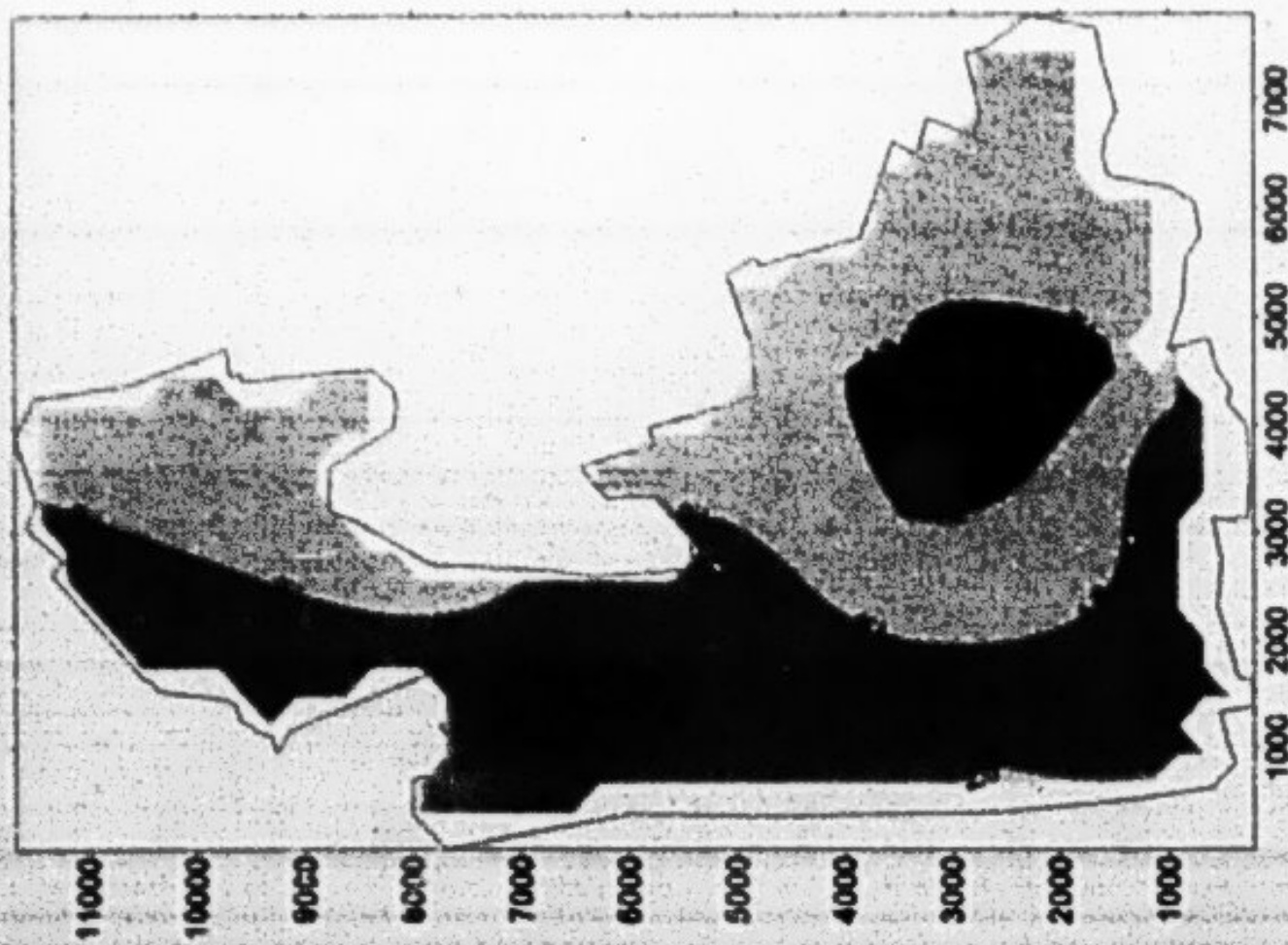


Fig. 30. Carte de la salinité (mS/cm) du plan d'eau dans le périmètre irrigué de Cébala-Borj Toul Mai 2000

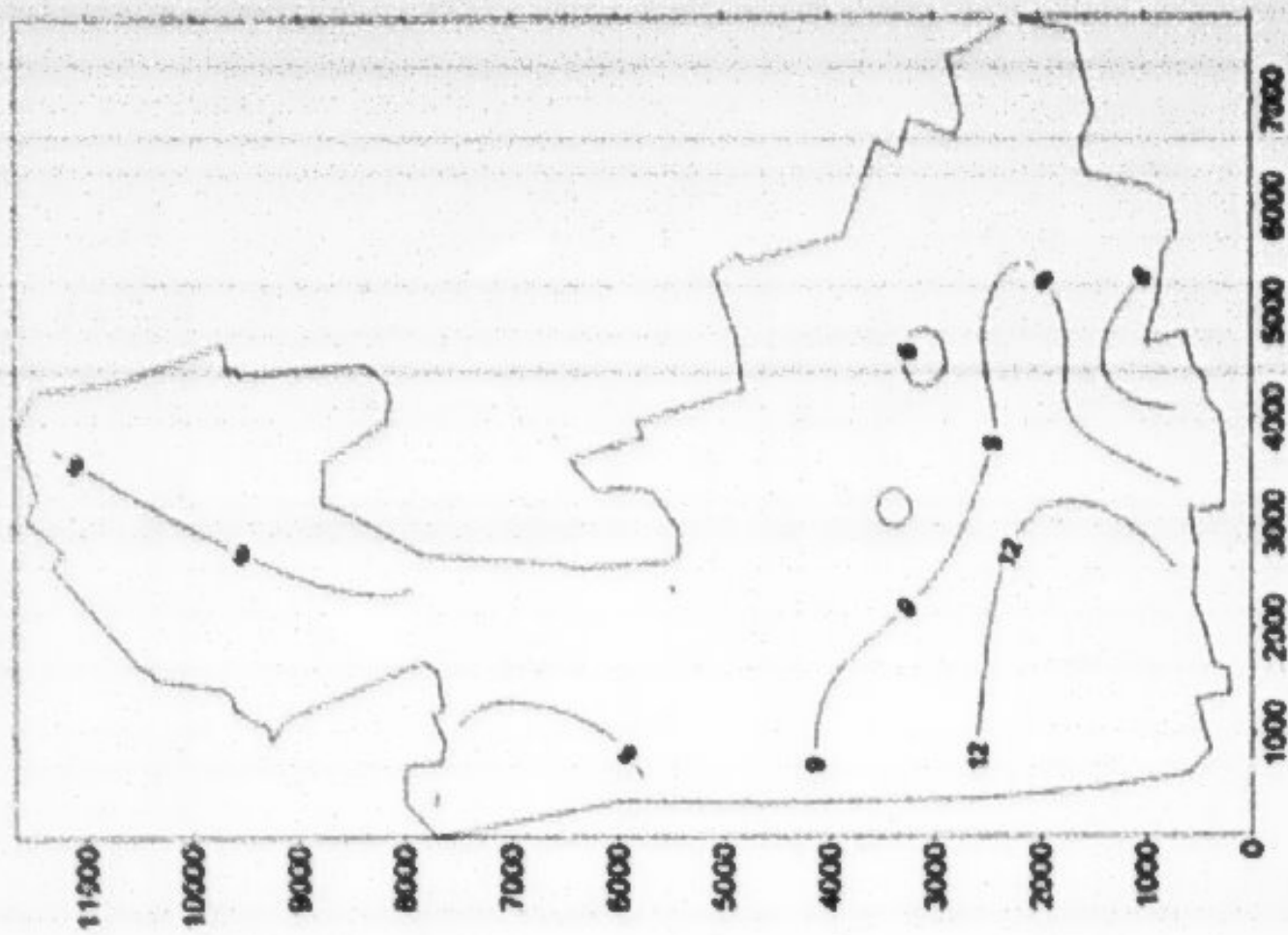


Fig. 31. Carte de la conductivité électromagnétique (CElectr.) des sols du périmètre irrigué de Cébala-Borj Touil. Mai 2000

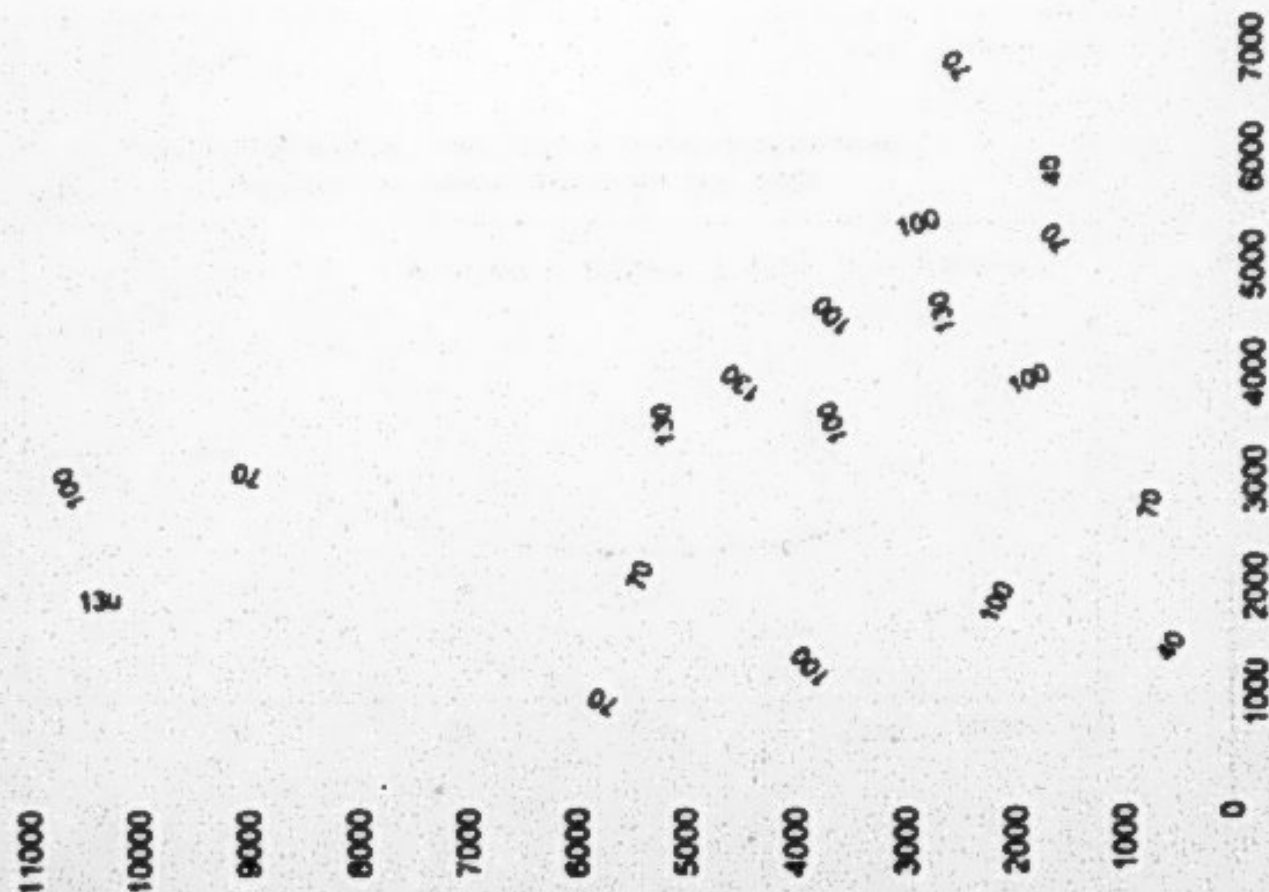


Fig. 32. Régression entre CEs moyennes (mS/cm) et CEs corr.
Périmètre de Cébala-Rorj Toul, Mai, 2000.

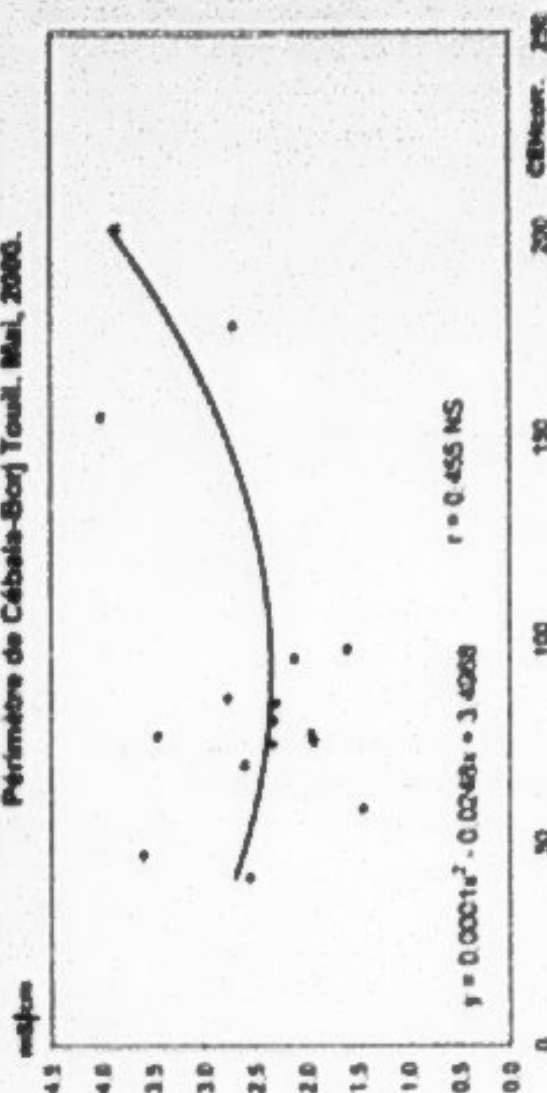


Fig. 13. Régression entre CEMcorr. et niveau de la nappe (m)
Périmètre de Cabala-Borj Toeil, Mai, 2006.

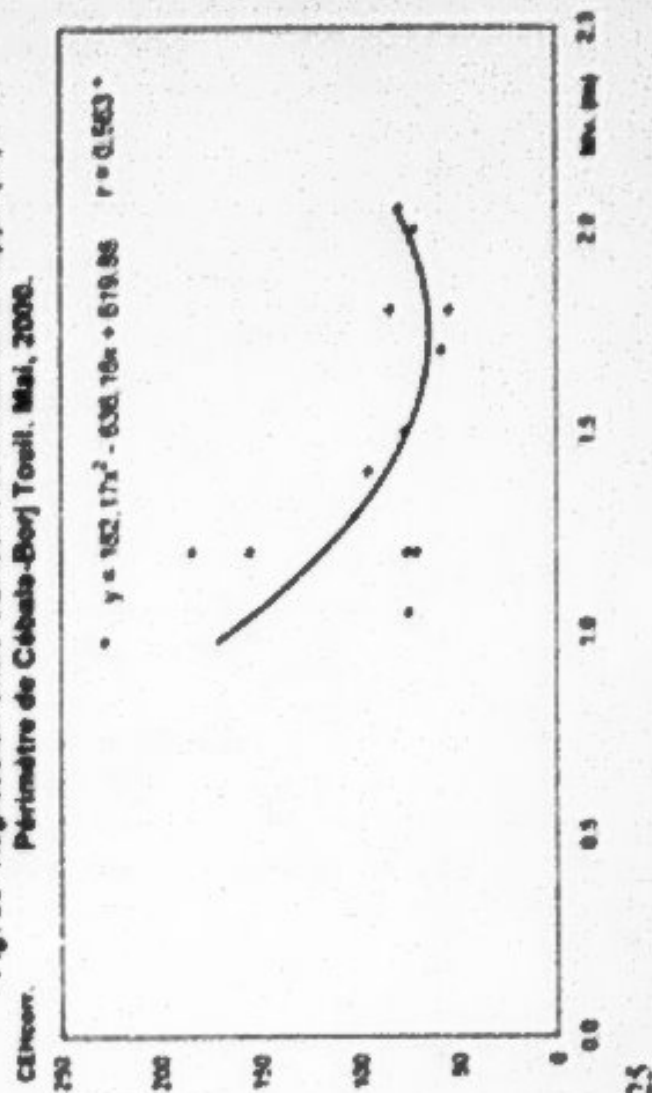


Fig. 34- Regression entre CElcorr. et salinité de la nappe (mS/cm)
 Périmètre de Cébala-Borj Toul. Mai, 2000.

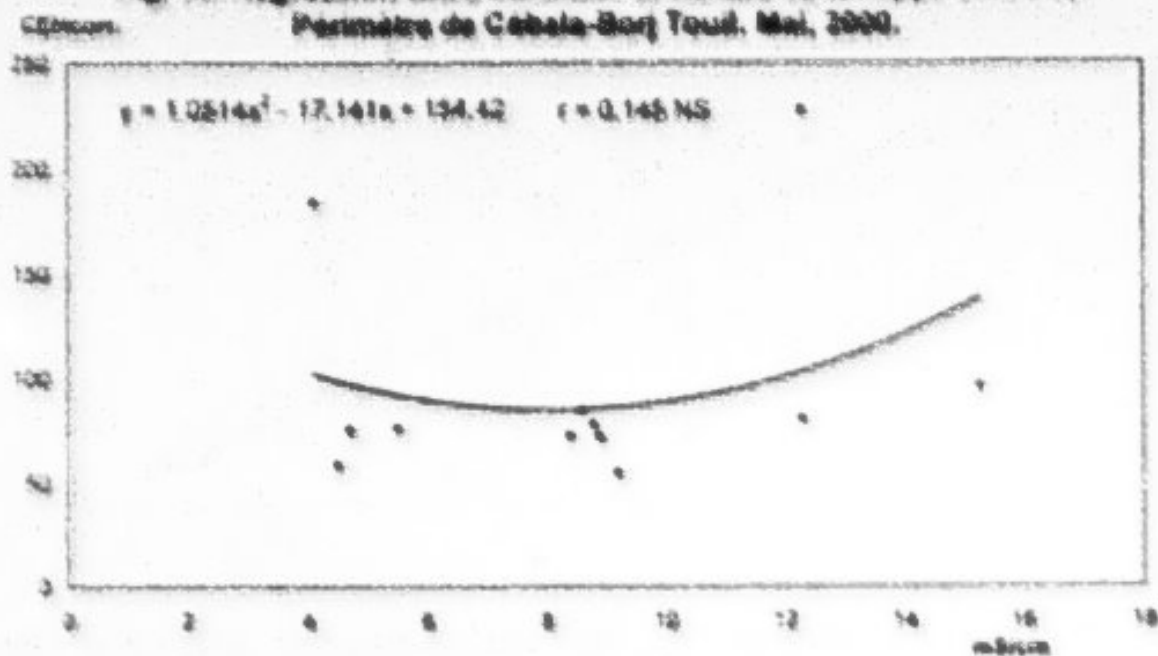


Fig. 35- Regression entre CEs0-40 (mS/cm) et CElcorr.
 Périmètre de Cébala-Borj Toul. Mai, 2000.

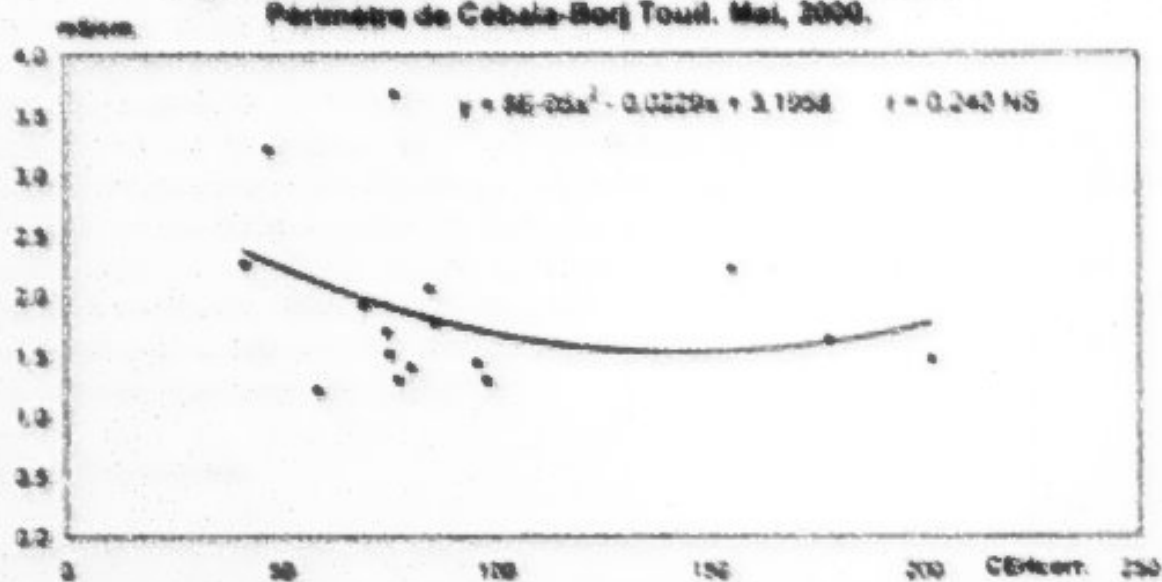


Fig. 36- Regression entre CEs0-20 (mS/cm) et CElcorr.
 Périmètre de Cébala-Borj Toul. Mai, 2000.

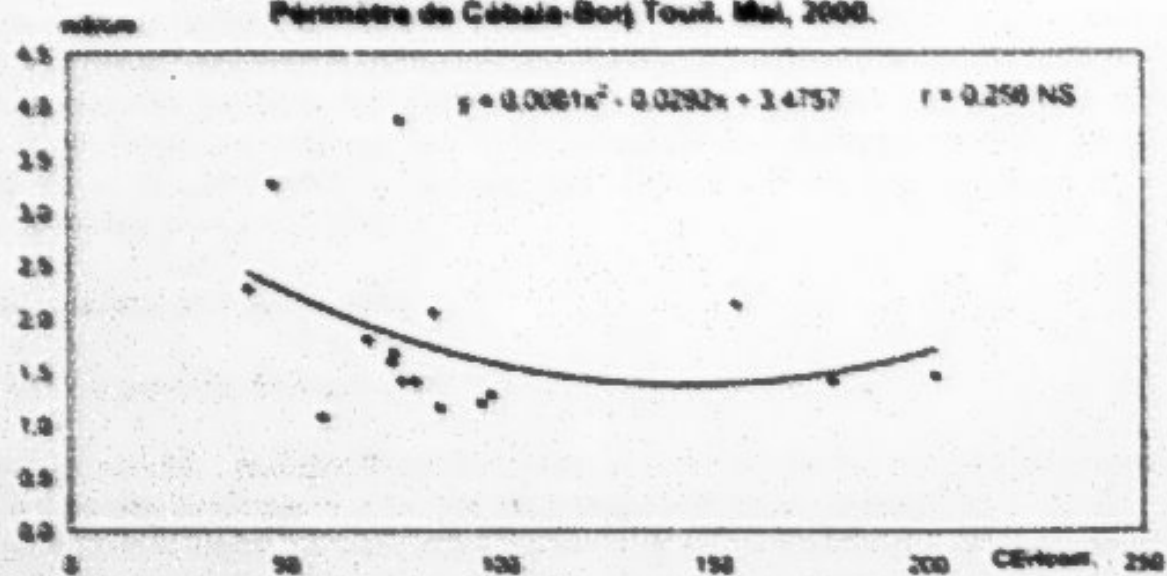
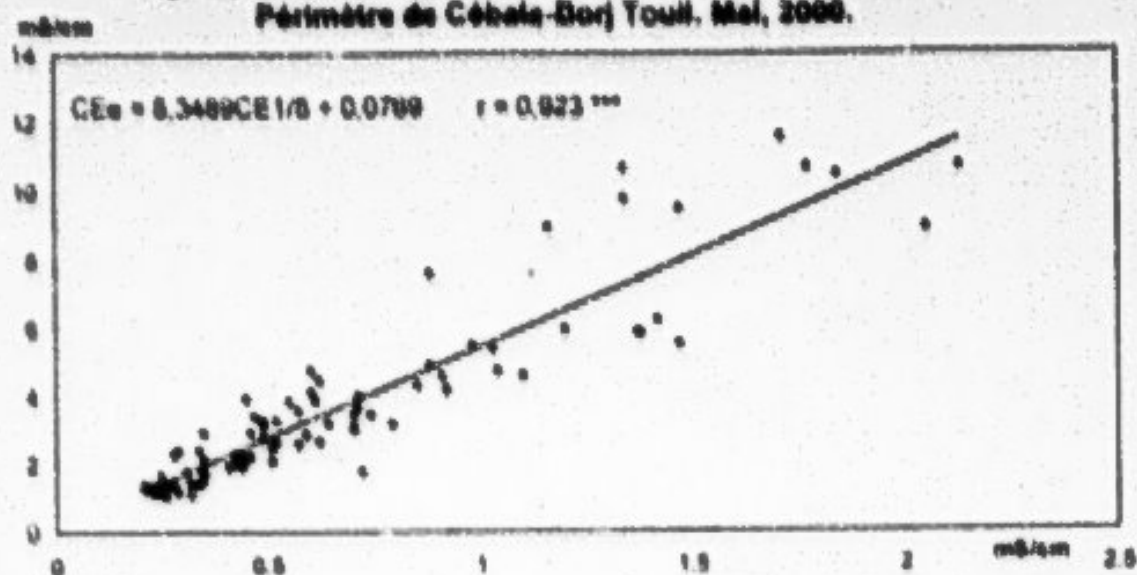


Fig. 37- Droite de régression entre CEE et CE 1/5 (mS/cm).
Périmètre de Cébala-Borj Touil, Mai, 2000.



identique dans le périmètre. La nappe est plus salée vers l'extrémité sud-est (fig. 30) tandis que CEM est plus élevée sur la bordure est sud-est (fig. 31). En conséquence, la salinité de la nappe n'agit pas directement sur CEEcorr. et par conséquent sur la salinité des sols.

- Les corrélations entre les paramètres CEE_{0-10} et CEE_{0-20} , relatifs aux salinités des horizons de surface, d'une part et CEEcorr., d'autre part ne sont pas significatives comme l'attestent les coefficients r obtenus : 0,24 et 0,256 (fig. 35 et 36). La salinité des horizons de surface n'a pas d'implication directe sur les valeurs de CEM qui doivent être beaucoup plus influencées par la salinité des horizons de profondeur. En effet, r augmente pour CEE moyenne qui est évaluée sur 120 cm de profondeur, ce qui indique le rôle des horizons de profondeur sur CEEcorr.

- La corrélation entre CEE et CE1/5 est très hautement significative, avec un coefficient $r = 0,923$. C'est le plus fort coefficient obtenu par rapport aux résultats de suivi de l'année 1999. L'équation est linéaire et peut par conséquent être retenue pour déterminer CEE en fonction de CE1/5, donnée qui peut être obtenue rapidement au laboratoire.

3-2-4- Conclusion

Au cours de cette campagne de contrôle, le niveau de la nappe accuse une remontée évidente dans la partie sud-est du périmètre. Cette remontée est corrélée avec les valeurs de CEM ce qui implique que le niveau de la nappe aurait contaminé les horizons inférieurs du sol. La corrélation entre CEM et CEE moyenne n'est pas significative mais la valeur de r augmente par rapport aux tests réalisés sur les résultats de contrôle de 1999. Les facteurs qui perturbent la relation entre les deux variables doivent rester les mêmes (colloïdes chargés dans le sol), malgré la nette influence de la salinité des horizons profonds sur celle de CEEcorr. CEM est, aussi, influencée par la remontée du niveau de la nappe qui doit agir sur l'enrichissement des horizons profonds du sol en sels solubles. Il est à signaler, enfin, qu'un lien très net existe entre CEE et CE1/5 avec un fort coefficient de corrélation ($r = 0,923$).

3-3- Les contrôles de l'année 2001

3-3-1- Le contrôle de mars 2001

Pour des raisons d'indisponibilité de crédits, le contrôle effectué au cours de la campagne de mars 2001 a concerné le niveau et la salinité de la nappe phréatique uniquement.

Le niveau de la nappe est supérieur à 1,2 m sur la majeure partie du périmètre. Il est compris entre 0,8 et 1,2 m dans la moitié sud du périmètre sur une plage de quelques centaines d'hectares. C'est la zone habituellement concernée par la remontée du niveau de la nappe dont les étendues

Fig. 38- Carte de la profondeur (m) du plan d'eau dans le périmètre irrigué de Cébala-Borj Touil Mars, 2001.

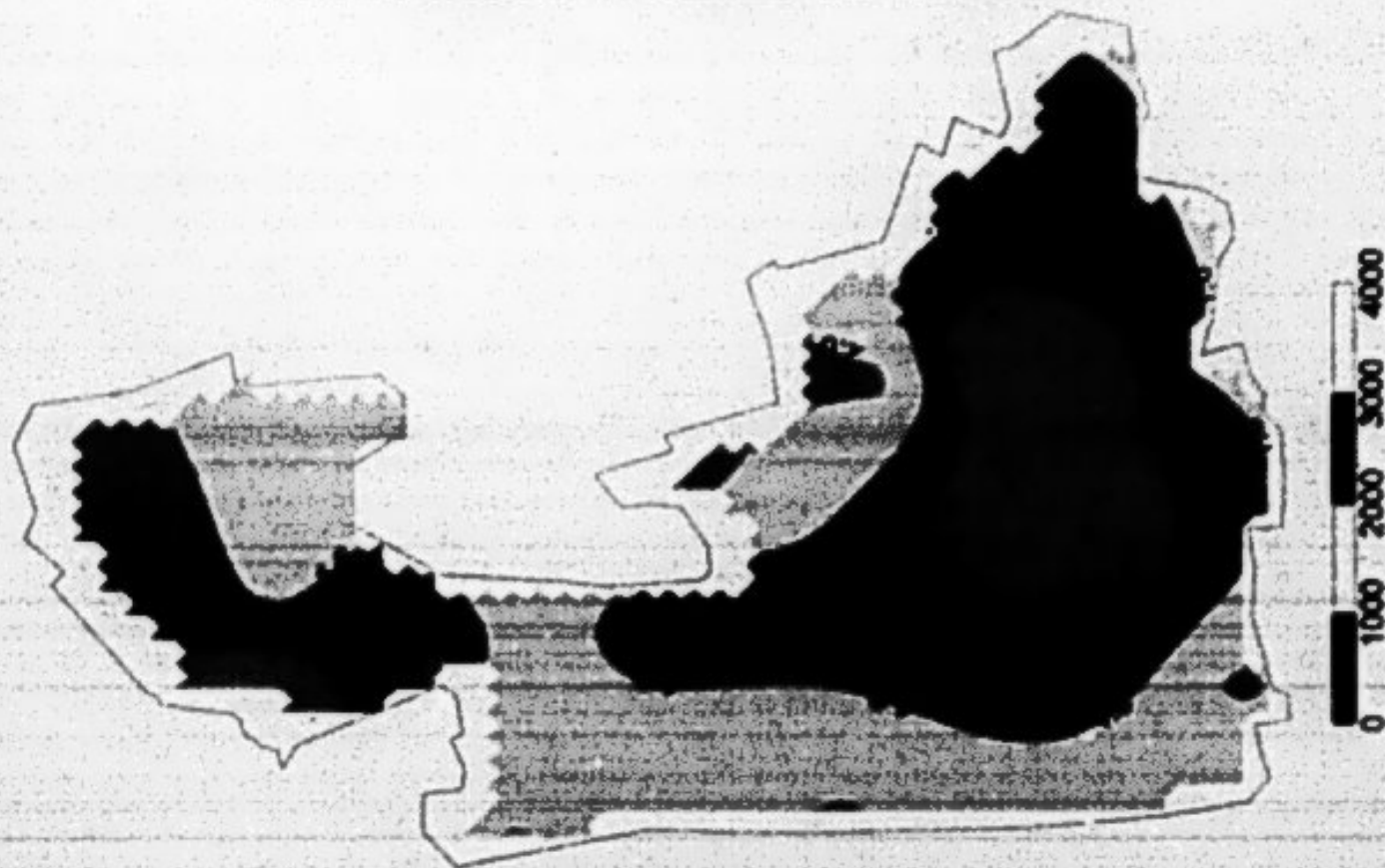
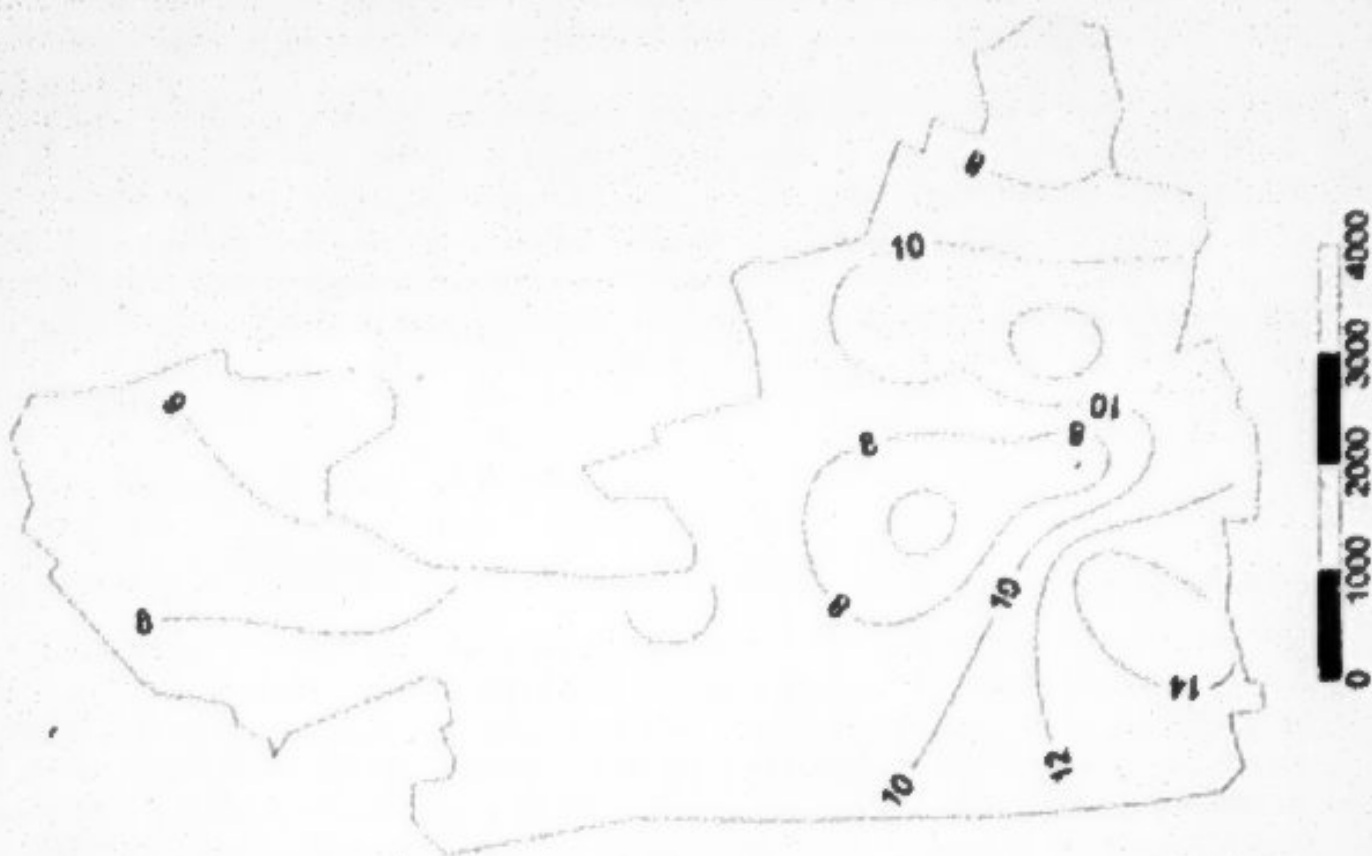


Fig. 39- Carte de la salinité (mS/cm) de plan d'eau dans le périmètre irrigué de Cébala-Borj Touil Mars, 2001.



peuvent varier d'une saison à l'autre. Cette partie du périmètre peut être soumise à un processus de salinisation secondaire à partir de la nappe phréatique, du moins dans les horizons inférieurs du profil. Toutefois, même la zone racinaire est menacée dans ce cas (Marni et Hamdane, 1977 ; Ben Hassane et al., 1981).

La salinité de la nappe (fig. 39) est comprise entre 6 et 14 mS/cm. Elle est la plus salée dans la moitié sud, avec une poussée vers le sud-ouest. Dans la moitié nord, cette nappe est plus diluée en raison, probablement, de la communication de ses eaux avec celle de la Mejerda. Cette salinité est élevée et au cas où le niveau de la nappe remonte, elle peut constituer un danger sur la productivité des sols et sur la pérennité de leur production.

En général, le niveau de la nappe remonte au cours du printemps. La remontée serait due surtout à l'alimentation par les eaux pluviales puisque l'irrigation n'est souvent pas pratiquée au cours de cette saison.

3-3-2- La contrôle de septembre-octobre 2001

3-3-2-1- La profondeur et la salinité de la nappe

Le niveau de la nappe est supérieur à 1,2 m sur plus de 95 % de la surface du périmètre (fig. 40). Il ne remonte au-dessus de ce seuil que dans une plage à surface très réduite, appartenant près de l'extrémité sud-est du périmètre. L'eau de la nappe s'est donc éloignée de la surface du sol enregistrant un rabattement très net illustré par la large domination de l'intervalle de valeurs comprises entre 1,6 et 2,0 m. L'été 2001 a eu ainsi pour conséquence le rabattement généralisé de la nappe phréatique dans le périmètre irrigué de Cébala-Borj-Touil. A cause de ce rabattement, le nombre de piézomètres dans lesquels l'eau de la nappe a été prélevée n'a été que de 11. Un tel nombre est faible pour pouvoir établir une carte de la distribution spatiale de la salinité de la nappe. L'illustration des résultats est donc faite en histogrammes, qui montrent que cette salinité est proche ou supérieure à 10 mS/cm dans huit piézomètres sur onze, soit 73 % (fig. 46). Elle est inférieure à 4 mS/cm dans le piézomètre 38 situé dans la partie nord du périmètre. Ceci confirme l'éventuelle dilution de la nappe par l'infiltration latérale des eaux de la Mejerda. Les activités d'irrigation ne sont pas exclues non plus. La nappe demeure, toutefois, salée notamment dans les piézomètres 8 et 29 et dans ceux de la partie sud-est du périmètre.

Les teneurs en nitrates sont faibles et inférieures à 10 mg/l, sauf dans les piézomètres 32 et 38 situés tous les deux près des bordures du périmètre (fig. 47). La valeur la plus élevée est supérieure à 50 mg/l et est observée dans le piézomètre 38 dont les eaux sont les plus diluées. Une telle coïncidence pourrait être attribuée à l'éventuelle existence d'une irrigation accompagnée d'une fertilisation en nitrates dans les alentours de ce point. On peut aussi supposer qu'un processus de nitrification se produit d'une manière très intense dans cette partie du périmètre.

3-3-2-2- La salinité des sols

- La conductivité électromagnétique (fig. 41) : les plus fortes valeurs de CEH corrigée à 20 % d'humidité apparaissent dans la moitié sud du périmètre et surtout près de l'extrémité sud-est. L'extrémité nord du périmètre est aussi couverte de valeurs supérieures à 120 mais qui ne dépassent pas les 200. La majeure partie du périmètre demeure, toutefois, concernée par les valeurs inférieures à 120 : elles sont même inférieures à 80 et 40 sur toute la bordure sud. Normalement, ces valeurs sont proportionnelles aux taux des sels dans le sol. La corrélation entre CEH corrigée à 20 % d'humidité et la conductivité électrique moyenne (CEe moy.) du sol est, en effet, significative au seuil de 0,01 avec un coefficient $r = 0,670$ (fig. 52). Par conséquent, une salinisation plus forte concerne toujours l'extrémité sud-est du périmètre. Cette salinité apparaît aussi près de la limite nord du périmètre, mais elle est à valeurs plus modérées.

- La salinité globale des sols évaluée par la conductivité électrique moyenne (CEe moy.) est plus élevée dans la partie sud-est du périmètre avec l'apparition de courbes concentriques de 4,5 et

Fig. 40- Carte de la profondeur (m) du plan d'eau dans le périmètre
littoral de Cébala-Bourj Imaï. Septembre, 2001.

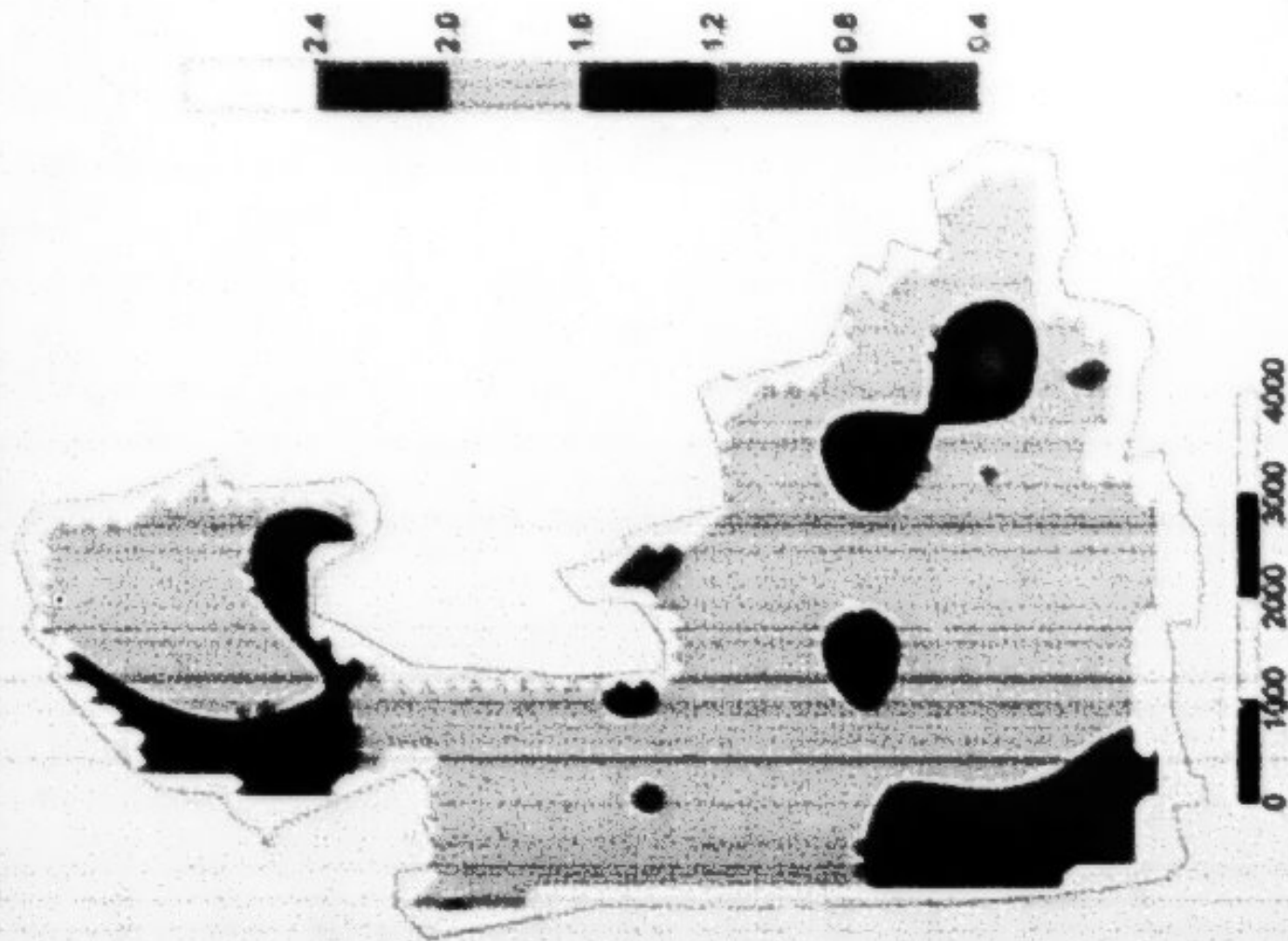


Fig. 41- Distribution spatiale de la conductivité électromagnétique (CEM) dans le périmètre littoral de Cébala-Bourj Imaï. Octobre, 2001.

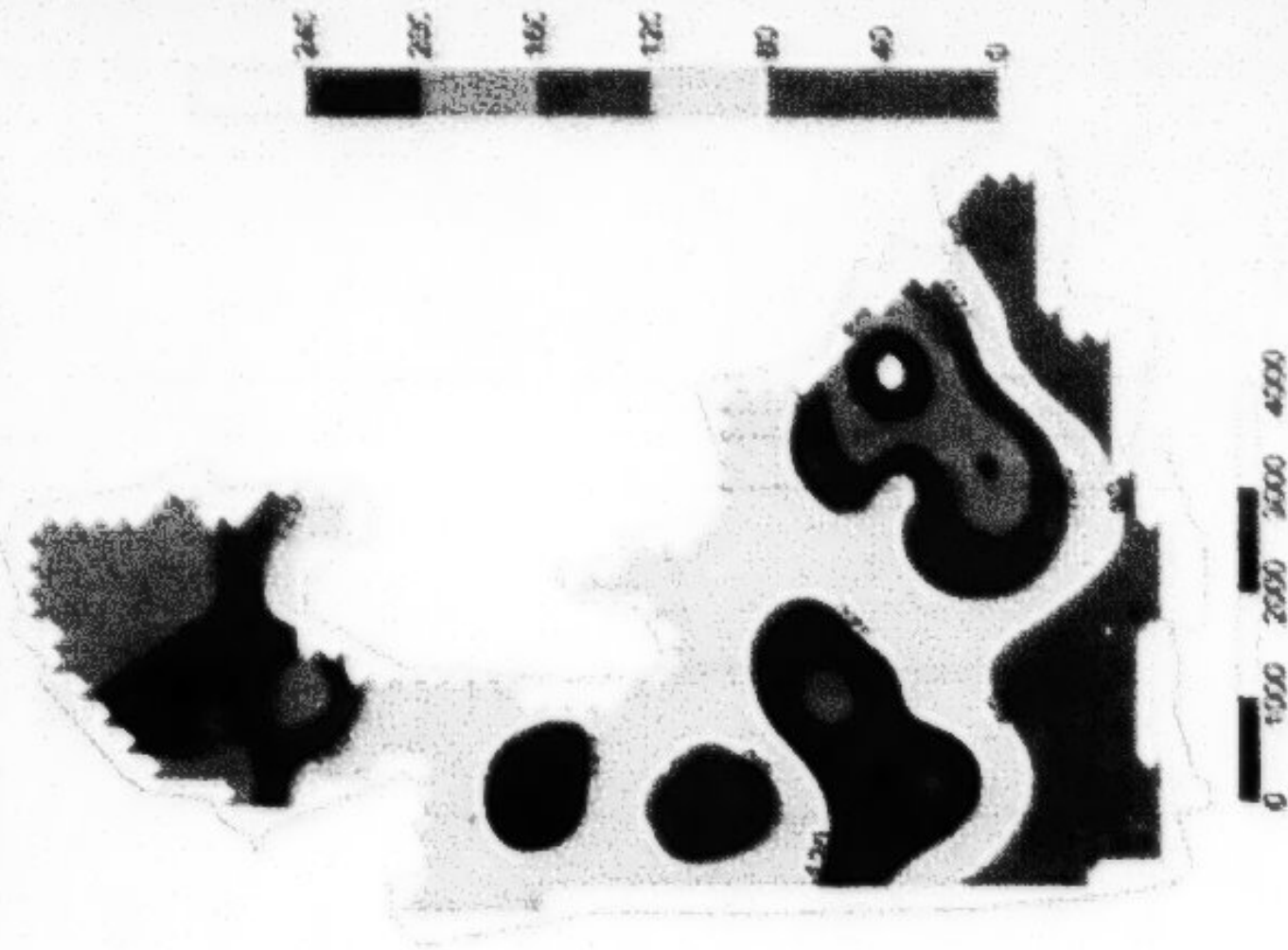


Fig. 42- Distribution spatiale de la conductivité électrique moyenne (CFe moy) Fig. 43- Distribution spatiale de la conductivité électrique de l'horizon de surface (CFe₀₋₂₀) en mS/cm des sols du périmètre irrigué de Cédala-Borj Touil. 10/2001.

11000

10000

9000

8000

7000

6000

5000

4000

3000

2000

1000

0

0

1000

2000

3000

4000

5000

6000

7000

3.0

3.0

4.0

3.0

5.0

4.0

3.0

3.0

2.0

3.0

0

1000

2000

3000

4000

5000

6000

7000

11000

10000

9000

8000

7000

6000

5000

4000

3000

2000

1000

0

0

1000

2000

3000

4000

5000

6000

7000

4.0

4.0

3.0

0.5

3.0

2.0

2.0

0.5

0.4

2.0

3.0

Fig. 44- Distribution spatiale de la salinité de l'horizon 0-40 cm (CE_{0-40}) en mS/cm dans le périmètre de Cébala-Borj Touil. Octobre 2001.

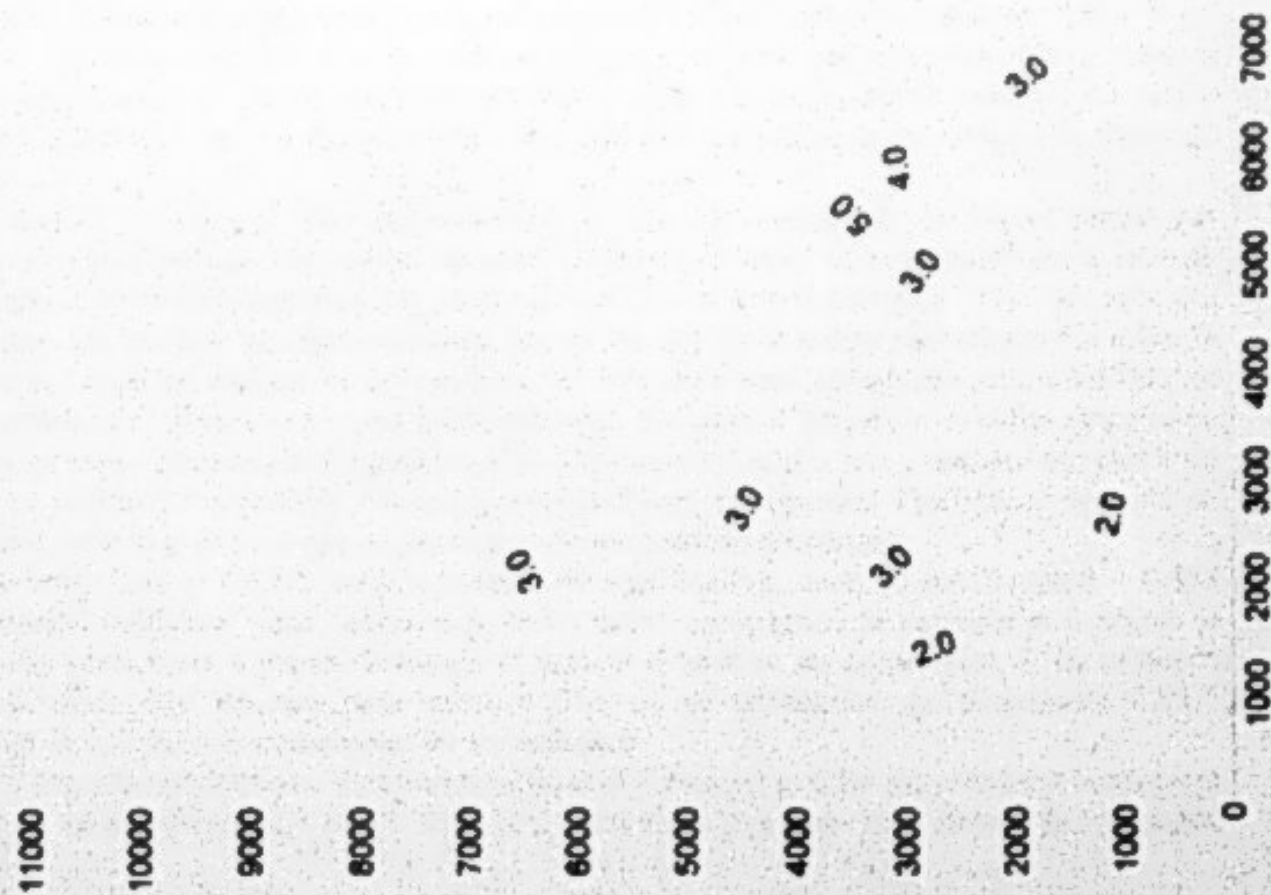
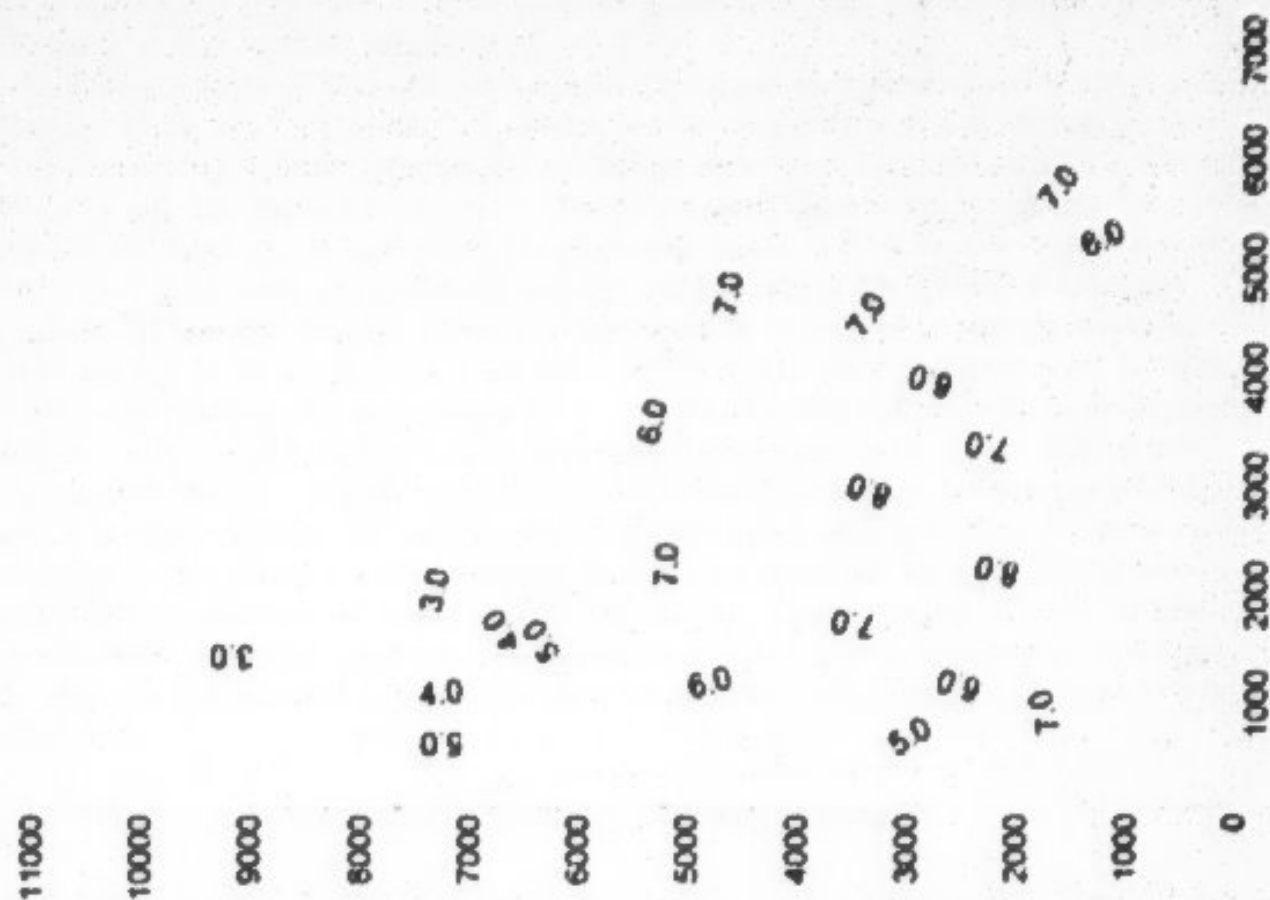


Fig. 45- Distribution spatiale de la salinité de l'horizon 100-120 cm en mS/cm dans le périmètre irrigué de Cébala-Borj Touil. Octobre, 2001



même 6 mS/cm. Dans le reste du périmètre, la salinité est inférieure à 3 mS/cm, notamment le long de toute la bordure ouest (fig. 42). Une telle distribution de la salinité est comparable à celle de CEHcorr., d'où la corrélation significative entre les deux paramètres (fig. 52). La bordure sud-est demeure ainsi la partie la plus salée du périmètre.

- Les salinités des horizons 0-20 et 0-40 cm sont presque identiques, notamment pour la partie sud-est du périmètre (fig. 43 et 44). La courbe de 4 mS/cm se rétrécit par rapport à la salinité globale. Cependant les courbes à 5 et 6 mS/cm apparaissent aux mêmes endroits et occupent presque la même surface pour les trois cas. Les horizons profonds élèveraient donc légèrement la salinité des sols dans cette extrémité sud orientale du périmètre. On peut noter aussi, la plus forte concentration en sels de l'horizon 0-20 cm qui serait probablement due aux accumulations par les eaux d'irrigation.

- Pour l'horizon 100-120 cm (fig. 45), les courbes d'isovaleurs de la salinité se répartissent entre 5 et 9 mS/cm dans les 2/3 de la surface du périmètre. Ce n'est que dans la partie nord qu'elles montrent des valeurs de 3 mS/cm. La nappe salée est par conséquent plus influente sur la salinité de l'horizon profond des sols et l'alimente en sels dans la partie sud du périmètre. L'état dilué de cette nappe près de la Mejerda dans le nord, est aussi illustré par la faible salinité de cet horizon profond. En conséquence, l'horizon profond est une couche d'accumulation des sels dont l'origine est, probablement, la nappe sous-jacente. L'entraînement des sels apportés par les eaux d'irrigation et leur accumulation dans cet horizon ne sont pas aussi exclus. Cette situation n'a pas de grave impact sur la productivité des sols ; toutefois, le rabattement du niveau de la nappe et la lixiviation permanente des sels sont des mesures à poursuivre dans ce périmètre afin d'assurer la durabilité de production de ces sols.

3-3-2-3- Les corrélations entre les divers paramètres mesurés

- Le niveau de la nappe n'a pas d'effet significatif sur les valeurs de CEH corrigée (fig. 48). La corrélation qui les lie est non significative avec un coefficient $r = 0,519$, valeur qui n'est pas très éloignée de celle de la table des valeurs critiques de r , avec 8 ddl et un seuil de 0,05 (0,6319). Le lien pourrait exister entre les deux paramètres et ne concerne probablement que la partie inférieure du sol.

- La corrélation entre CEe moyenne et le niveau de la nappe n'est pas significative, avec un coefficient $r = 0,501$ (fig. 49). Un tel résultat montre que le plan d'eau souterrain n'a pas d'effet sur la salinité des sols et donc sur la productivité de ces derniers. r n'est, cependant, pas très faible et est supérieur à 0,5. On peut supposer que la relation existe, mais très partiellement. Cette relation pourrait exister dans une partie du périmètre et non dans l'autre. La partie la plus soumise à l'action de la nappe est l'extrémité sud-est du périmètre. Elle doit être surveillée et son réseau de drainage recalibré et curé.

- L'horizon 100-120 cm devrait être normalement le plus influencé par la nappe phréatique puisqu'il est situé le plus près de son niveau statique. La corrélation qui lie sa salinité CEe à celle du niveau de la nappe n'est pas significative, avec un coefficient $r = 0,486$ (fig. 50). Les sels qui s'accumulent dans cet horizon ne proviendraient pas en totalité de la nappe phréatique. En effet, là où le niveau de la nappe est éloigné de cet horizon, les sels qui y sont accumulés seraient d'origine résiduelle ou entraînés et piégés après leur lixiviation par les eaux d'irrigation et celles des pluies. Par conséquent, la nappe phréatique n'aurait un effet d'accumulation des sels que dans une partie du périmètre ce qui renforce l'hypothèse évoquée précédemment et signalant l'extrémité sud-est du périmètre comme celle la plus soumise au processus de salinisation secondaire.

- La régression entre CEe et CE1/5 est très hautement significative, avec un coefficient $r = 0,837$ (fig. 51). Ce résultat confirme ceux obtenus pour les autres campagnes de contrôle et souligne la bonne qualité des opérations d'échantillonnage et surtout d'analyse au laboratoire. L'équation de corrélation peut donc être retenue pour estimer CEe en se contentant de déterminer CE1/5 uniquement, lors de prochaines campagnes de surveillance.

- La corrélation entre la conductivité électromagnétique (CEHcorr.) et CEe moyenne est hautement significative avec un coefficient $r = 0,670$ (fig. 52). C'est l'une des rares fois, depuis la campagne

Fig. 46- Représentation en histogrammes de la salinité des eaux (mS/cm) des piézomètres échantillonnés dans le périmètre irrigué de Cébels-Borj Touil. Septembre, 2001

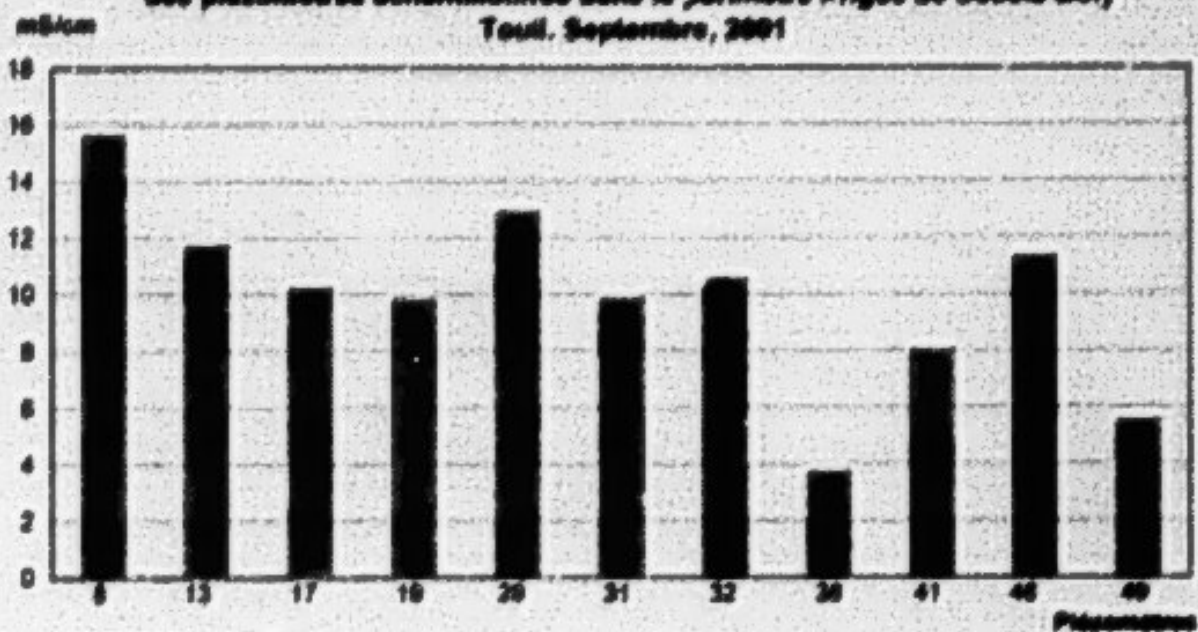


Fig. 47- Représentation en histogrammes des teneurs en nitrates des eaux (mg/l) des piézomètres échantillonnés dans le périmètre irrigué de Cébels-Borj Touil. Septembre, 2001

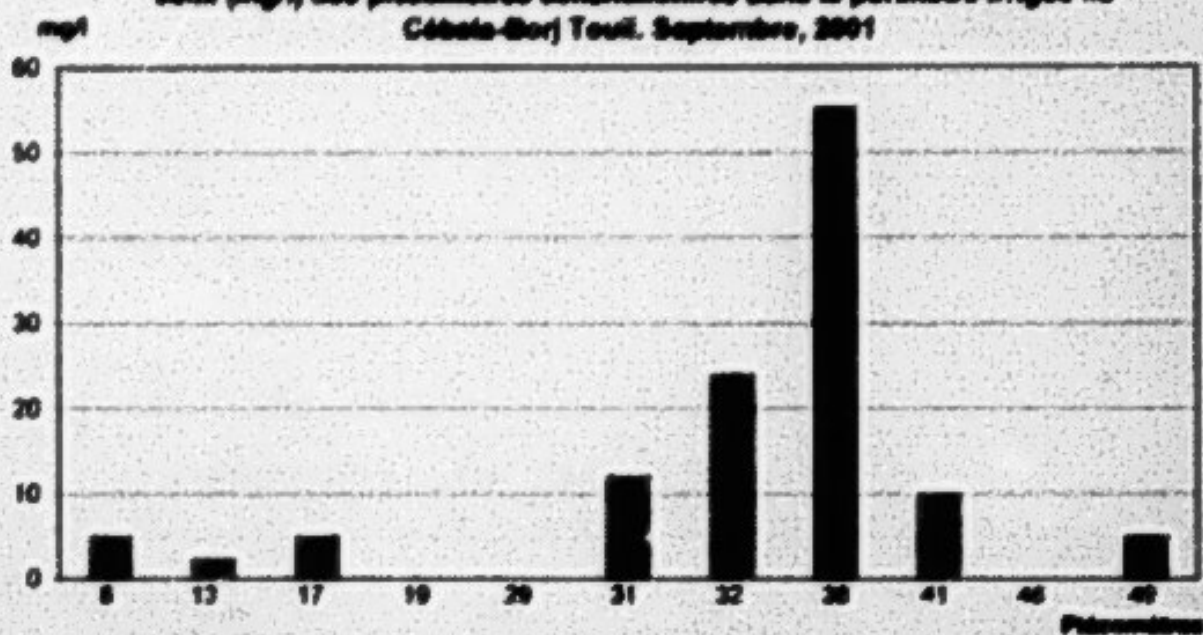


Fig. 48- Régression entre CEHcorr. et le niveau de la nappe (m). Périmètre de Cébels-Borj Touil. Septembre-octobre, 2001.

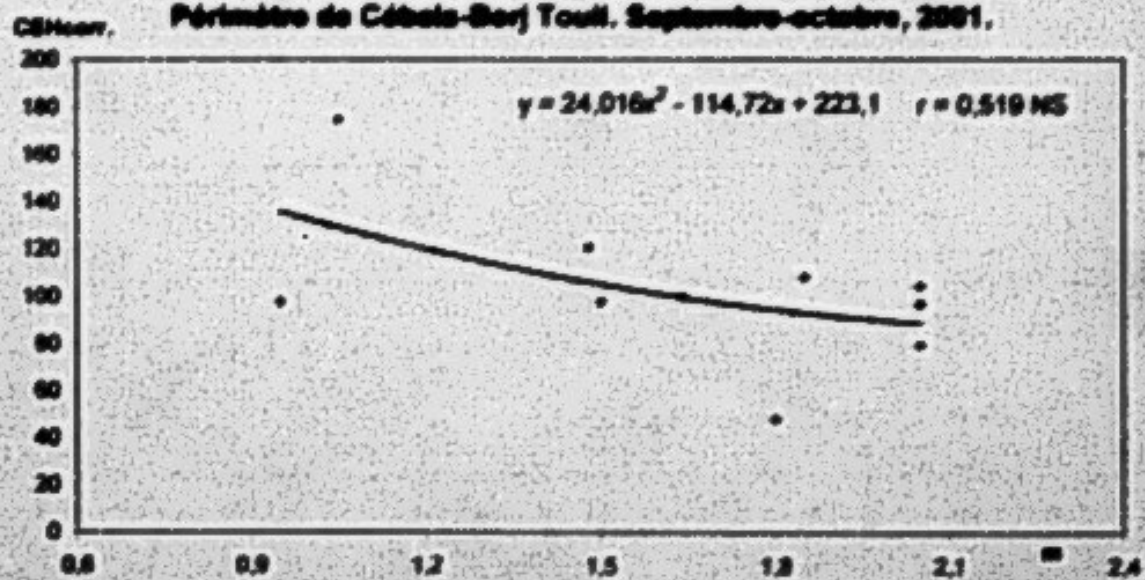


Fig. 49- Régression entre le niveau de la nappe (m) et CEs moyenne (mS/cm), Périmètre de Cébala-Borj Touil, Septembre-octobre, 2001.

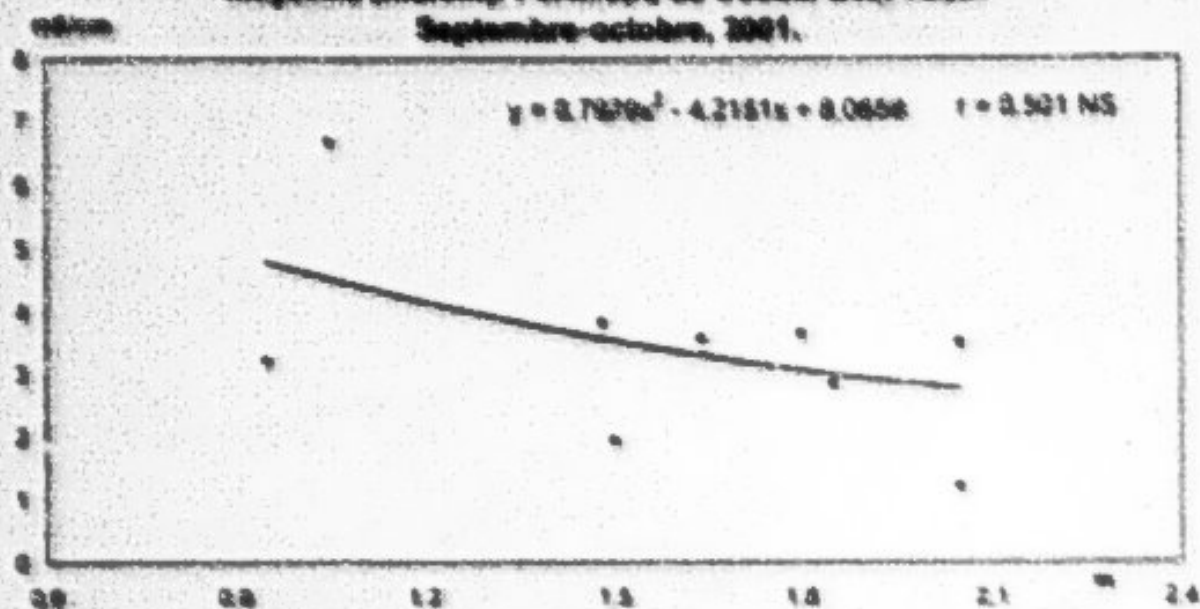


Fig. 50- Régression entre le niveau de la nappe (m) et CEs de l'horizon 100-120 cm (mS/cm), Périmètre de Cébala Borj Touil, Septembre-octobre, 2001.

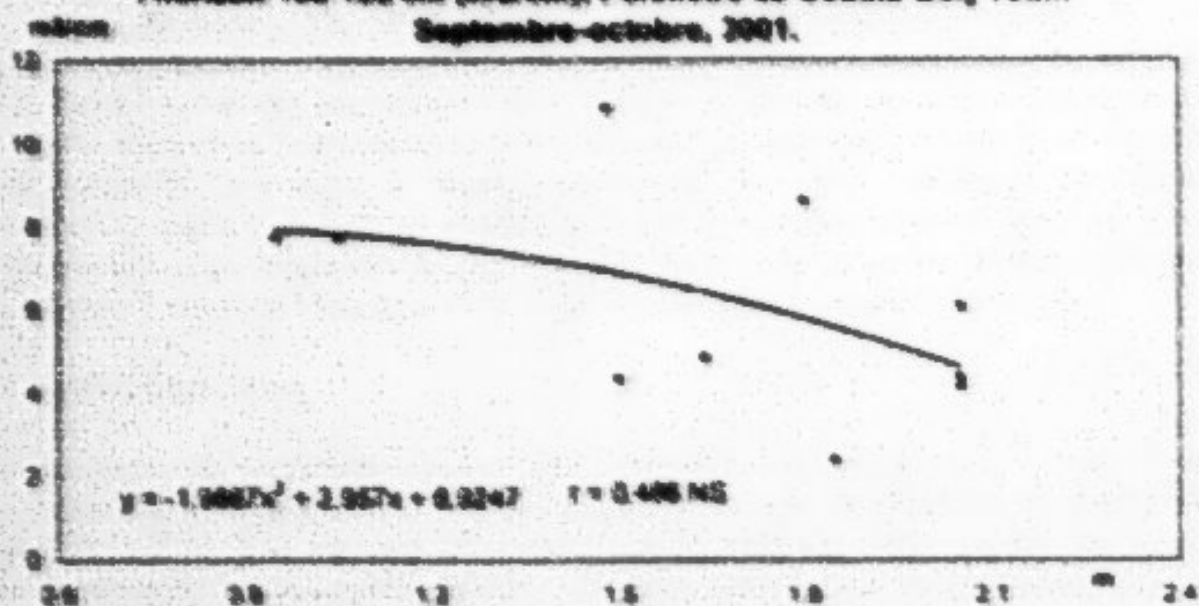


Fig. 51- Droite de régression entre CEs et CE 1/5 (mS/cm) des sols du périmètre irrigué de Cébala-Borj Touil, Octobre, 2001.

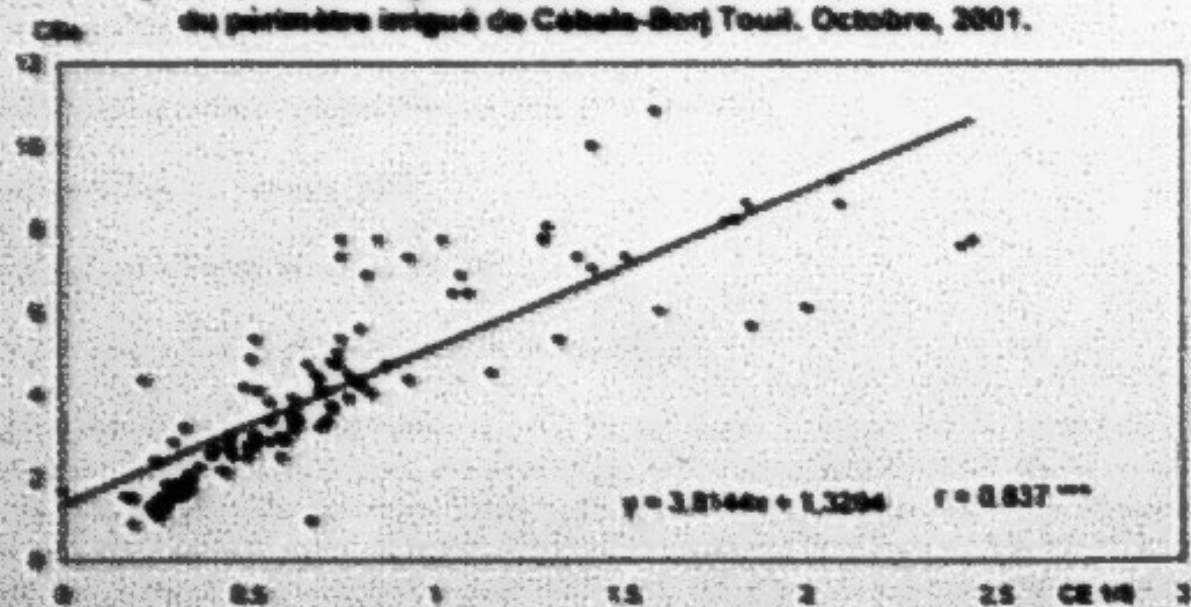
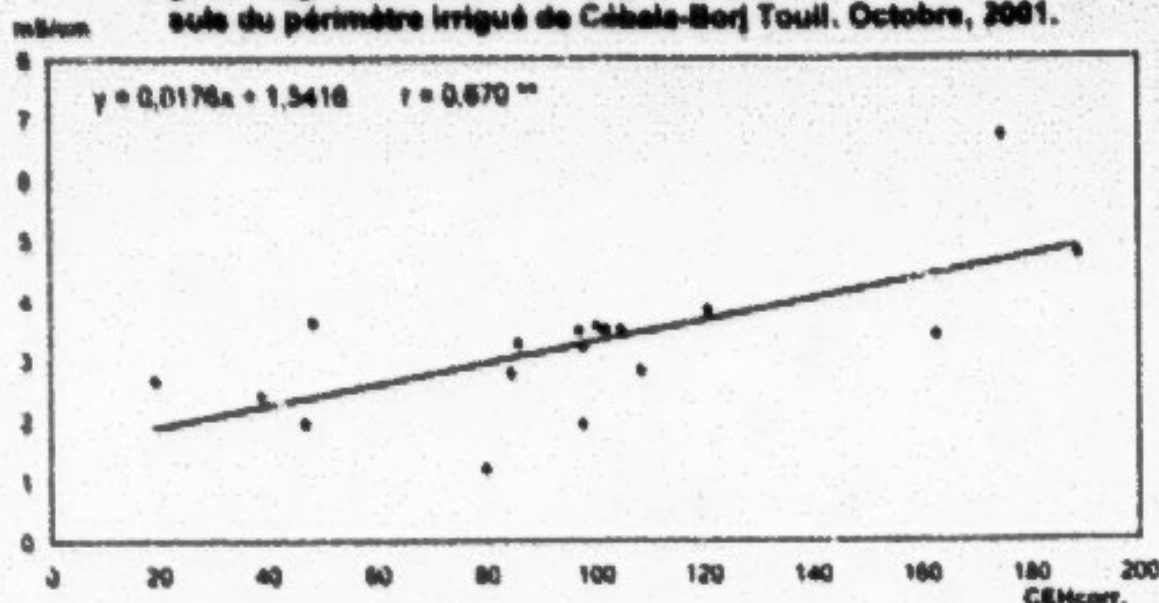


Fig. 53- Régression entre CEE moyenne (mS/cm) et CEHcorr. des sols du périmètre irrigué de Cébala-Borj Touil, Octobre, 2001.



d'avril 1999, qu'un tel résultat est obtenu, bien que le résultat soit significatif au seuil 0,01 et non au seuil 0,001. Normalement, le conductivimètre électromagnétique donne des mesures proportionnelles aux quantités de sels présentes dans les 120 premiers centimètres du sol (CEH). Ce n'est pas le cas au cours des campagnes 1999 et 2000. L'absence de corrélation entre les deux paramètres a été attribuée à la présence en excès de colloïdes argileux pouvant conduire le courant induit dont l'appareil CEM capte le champ magnétique. Pour cette campagne, les sels auraient mieux contribué à conduire le courant induit par le CEM, probablement par des états d'humidité différents permettant une dissolution des sels. On doit noter enfin qu'un tel résultat est important et positif et confirme l'utilité de l'appareil CEM pour les mesures de la salinité des sols.

3.3.2.4 Conclusions

La campagne de septembre-octobre 2001 a permis de constater que le plan d'eau s'est éloigné de la surface du sol, à l'exception de l'extrémité sud-est du périmètre où il peut remonter jusqu'à plus de 1,2 m. Les mesures de salinité par la méthode CEM ou par les analyses de laboratoire confirment les accumulations de sels dans cette partie du périmètre. Les sels s'y accumulent surtout dans l'horizon du surface. La nappe phréatique n'a pas d'effet significatif ni sur le paramètre CEHcorr., ni sur celui de CEE moyenne, ni aussi sur CEE₁₀₀₋₁₂₀. Son effet ne serait que partiel et non généralisé.

La corrélation entre CEE moyenne et CEHcorr. est significative. Elle confirme l'utilité de l'appareil CEM pour mesurer la salinité des sols, sur le terrain.

3.4- Les contrôles de l'année 2002

3.4.1- Le contrôle de mars-avril 2002

3.4.1.2- Le niveau et la salinité de la nappe

Le niveau de la nappe est inférieur à 1,2 m sur toute la façade est du périmètre (fig. 53); dans la moitié sud, le faible niveau piézométrique a tendance à s'éloigner de la pointe sud et occuper une position centrale jusqu'à la limite méridionale du périmètre. Près de la bordure ouest et le long de la route Tunis-Bizerte, la nappe descend jusqu'à plus de 1,6 et même 2,0 m. L'état de la profondeur de la nappe est ainsi très différent de la situation de septembre-octobre 2001. On

Fig. 53- Carte de la profondeur (m) du plan d'eau dans le périmètre irrigué de Cébala-Borj Touil. Mars, 2002.

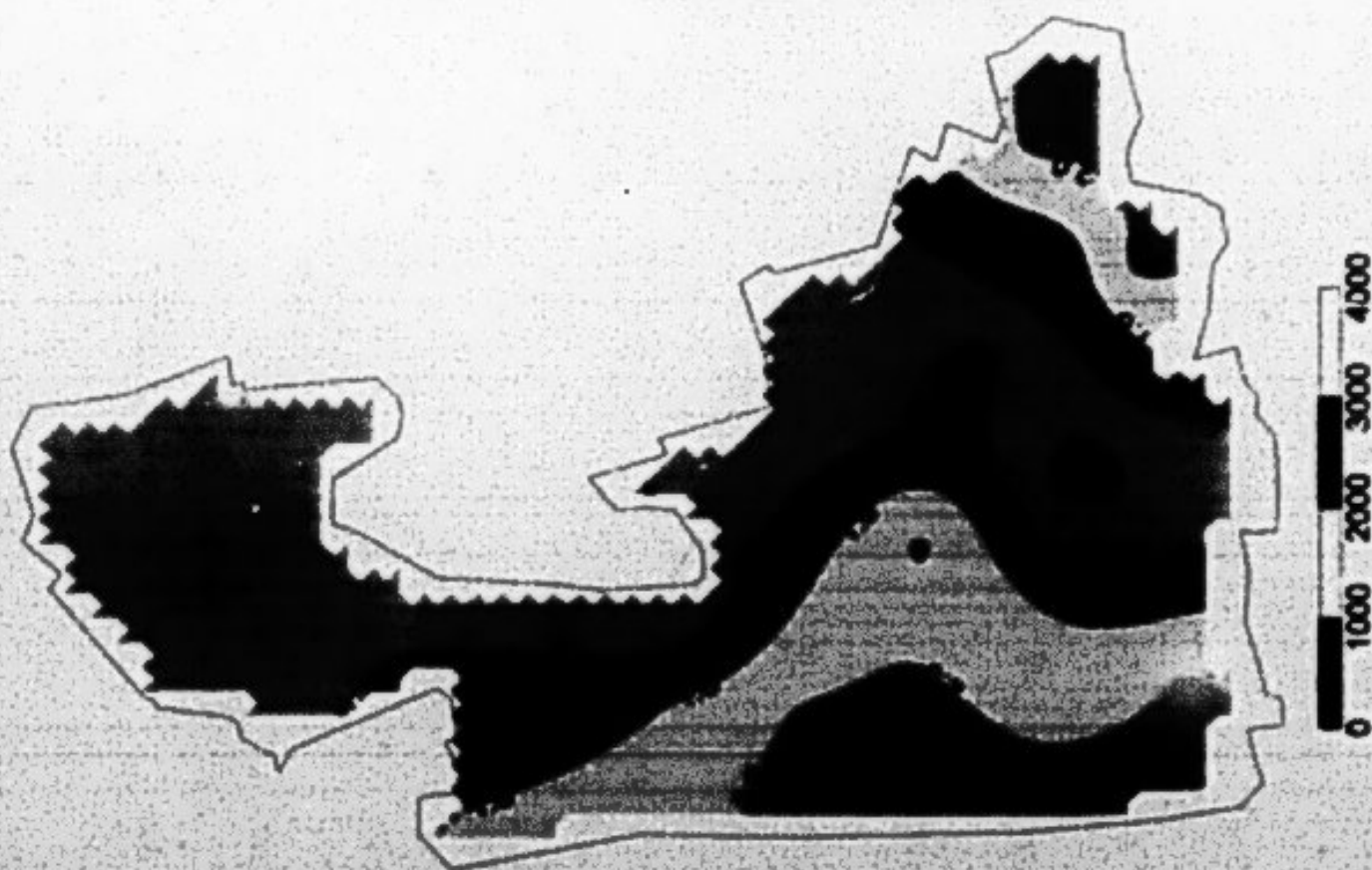


Fig. 54- Carte de la salinité (mS/cm) du plan d'eau dans le périmètre irrigué de Cébala-Borj Touil. Mars, 2002.

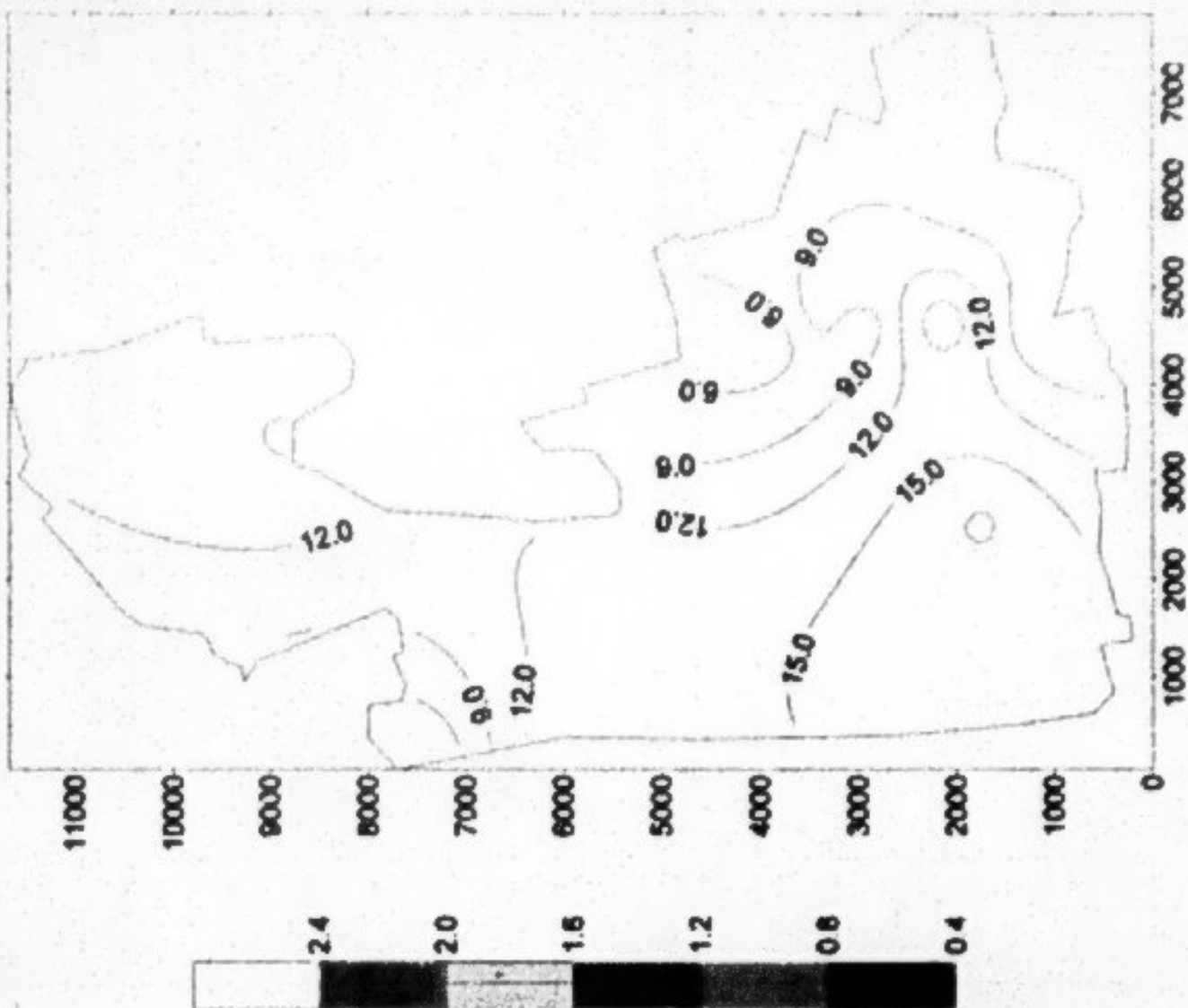


Fig. 55- Distribution spatiale de CÉHcont, des sols du périmètre irrigué de Cébala-Borj Touil, Avril, 2002.

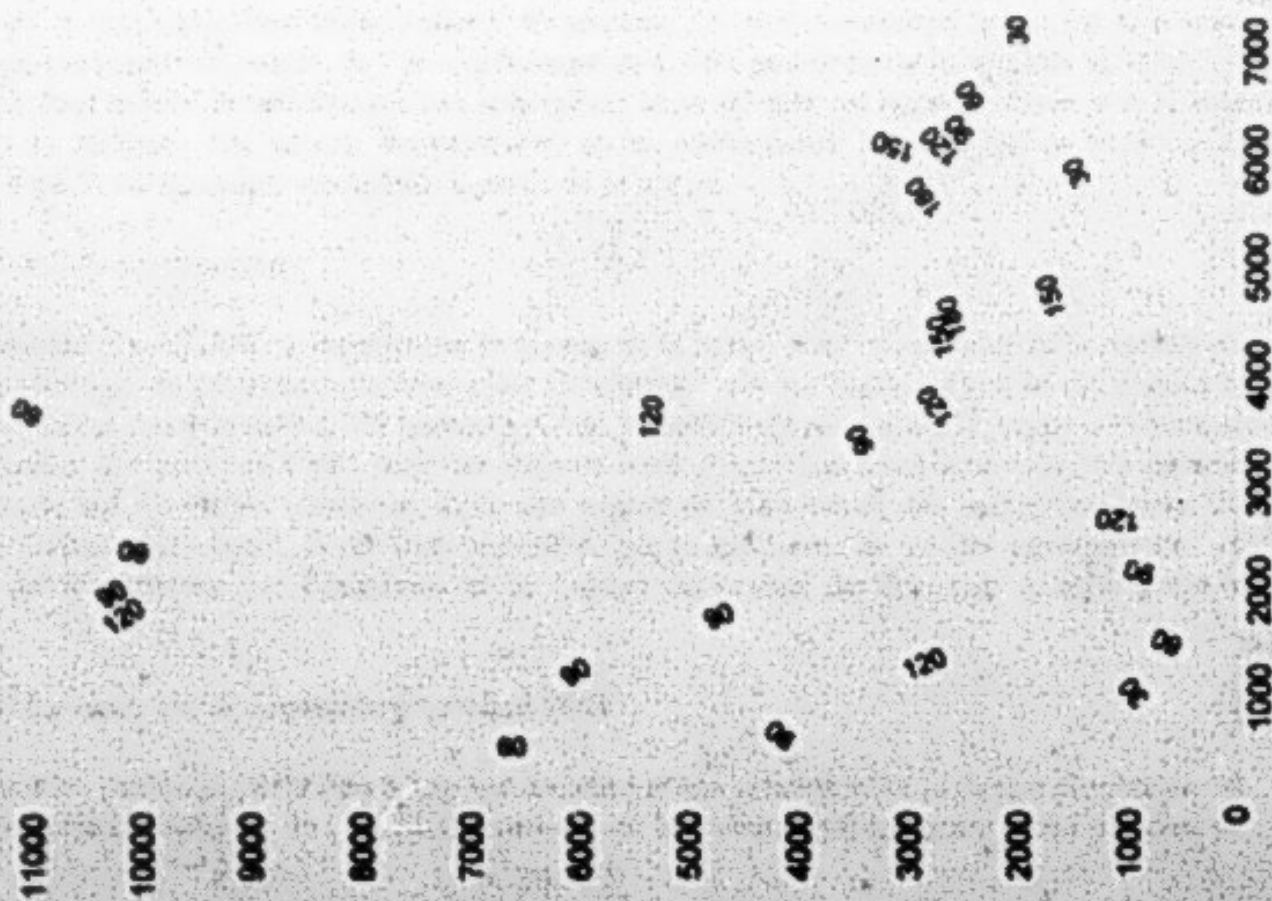


Fig. 56- Régression entre CÉHcont, et profondeur de la nappe phréatique (m). Périmètre de Cébala-Borj Touil, Mars-avril, 2002.

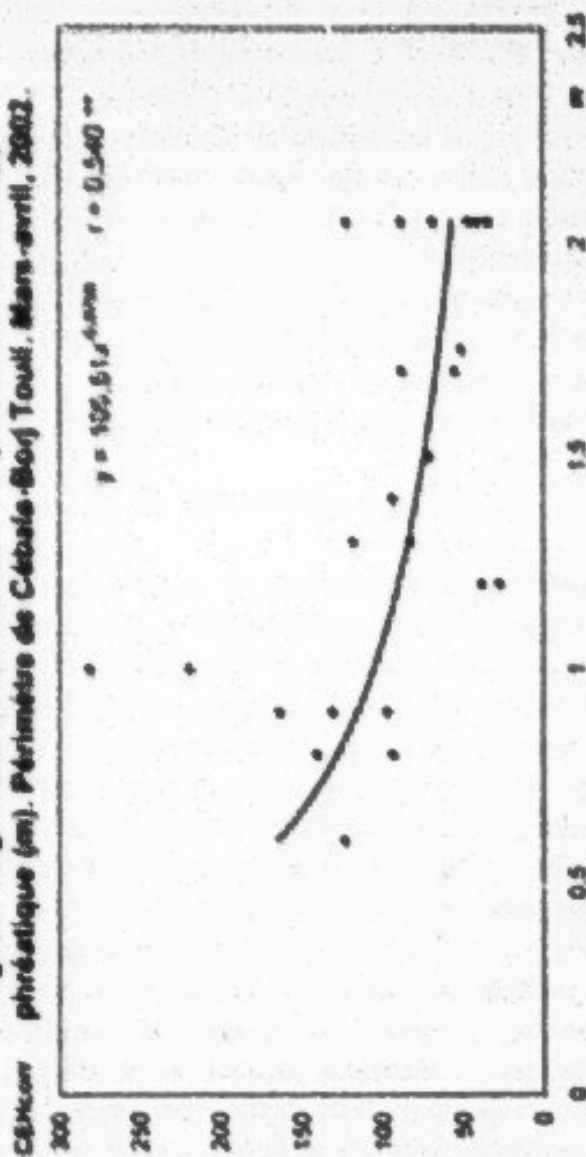
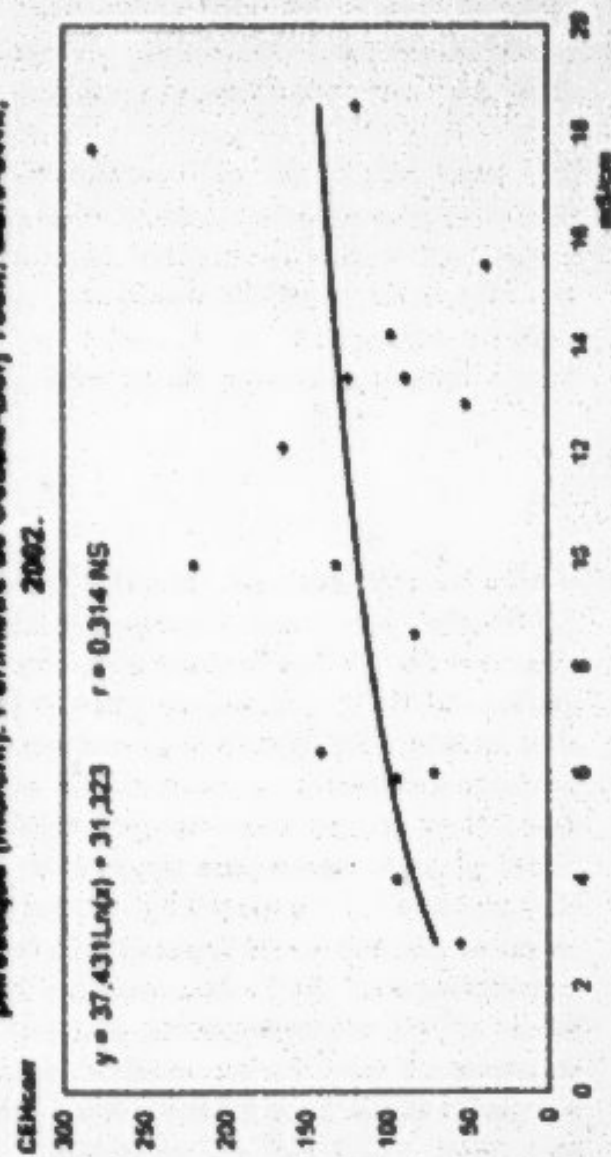


Fig. 57- Régression entre CÉHcont, et salinité de la nappe phréatique (mS/cm). Périmètre de Cébala-Borj Touil, Mars-avril, 2002.



observe, en effet, une accumulation et une stagnation de l'eau sur le flanc est et dans la partie centrale de la moitié sud du périmètre. L'hiver a eu ainsi pour conséquence, une remontée du niveau de la nappe qui s'est visiblement manifestée par l'est. Le périmètre évacuerait ainsi ses eaux de la partie ouest qui s'écouleraient difficilement par le nord et l'est.

La salinité de cette nappe est comprise entre 6 et 15 mS/cm. Elle est la plus salée vers l'extrémité sud-ouest. La partie la plus diluée est située sur la bordure est et coïncide avec un niveau élevé de la nappe (fig. 54). Les eaux qui s'accumulent sont ainsi de meilleure qualité ce qui pourrait supposer qu'il s'agirait d'eau d'infiltration d'origine pluviale. Les pluies d'hiver seraient ainsi une origine certaine de l'hydromorphie dans ce périmètre. De même, l'eau d'irrigation pourrait contribuer à cette remontée puisqu'elle est utilisée aussi en hiver et au printemps comme apport d'appoint pour des cultures surtout céréalières et fourragères.

3-4-1-2- La salinité des sols

Elle est estimée par la conductivité électromagnétique (CEHcorr.). Ce paramètre est lié à la salinité globale du sol et est proportionnel aux quantités de sels présentes dans le sol (Job, 1993). Les valeurs les plus élevées de ce paramètre se concentrent près de la bordure sud-est du périmètre et celles les plus faibles apparaissent près de ses limites sud et ouest surtout (fig. 55). Elles varient entre 30 et 20 et les courbes d'isovaleurs deviennent plus rapprochées et à chiffres de plus en plus élevés dans la moitié sud et près de la limite est du périmètre. Ces courbes se concentrent aussi sur la pointe nord-ouest du périmètre mais sans atteindre les chiffres apparaissant dans la moitié sud. Une telle distribution est similaire à celle de la profondeur de la nappe uniquement dans la moitié sud. C'est ce qui explique la corrélation hautement significative ($r = 0,540$) entre CEH corrigée à 20 % d'humidité et le niveau de la nappe (fig. 56). Celle-ci aurait communiqué au sol des sels solubles en se rapprochant de la surface, processus identifié et mesuré par l'appareil CEM. En conséquence, la nappe phréatique constituerait une source de salinisation des sols, particulièrement dans la moitié méridionale et près de la bordure orientale du périmètre. Une meilleure surveillance du réseau de drainage et son curage fréquent et continu serait des solutions à entreprendre pour mieux rabattre le niveau de la nappe dans cette zone et éviter le processus de salinisation des sols. Cette salinisation est liée surtout, au niveau de la nappe et non à sa salinité. En effet, la corrélation entre CEHcorr. et la salinité de la nappe n'est pas significative avec un coefficient $r = 0,314$ (fig. 57). Ce dernier n'est pas nul et signifie qu'un lien très faible peut exister entre les deux paramètres qui restent très légèrement liés et non totalement indépendants. Cependant, on peut considérer que c'est le niveau de la nappe qui est plus responsable de l'accroissement de CEM, peu importe le seuil de salinité. En effet, la nappe peut causer la salinisation des sols même si sa salinité est basse, lorsque son niveau remonte vers la surface. Les hautes températures et les sécheresses plus au moins prolongées aggravent ce type de salinisation secondaire à partir de la nappe.

3-4-1-3- Conclusion

Le contrôle d'avril 2002 a montré que le niveau de la nappe s'est rapproché de la surface du sol dans la moitié sud du périmètre, sur une zone s'étendant entre les bordures sud et est et dont la surface est estimée à environ 600 à 700 hectares. Cette remontée du niveau de la nappe a provoqué une augmentation des mesures CEM dont les valeurs sont proportionnelles aux quantités de sels présentes dans le sol. La nappe constitue donc une source de salinisation des sols d'une partie du périmètre de Cébala-Borj-Touil. Il devient impératif, par conséquent, de veiller constamment au rabattement de son niveau par l'entretien et le curage du réseau de drainage installé dans le périmètre.

3-4-2- Le contrôle de septembre-octobre 2002

La majeure partie du périmètre n'est pas soumise à une remontée de la nappe phréatique au cours de cette période sauf près de l'extrémité sud-est où le niveau peut remonter jusqu'à moins de

Fig. 58- Carte de la profondeur (m) du plan d'eau dans le périmètre irrigué de Cébala-Borj Touil. Septembre, 2002.

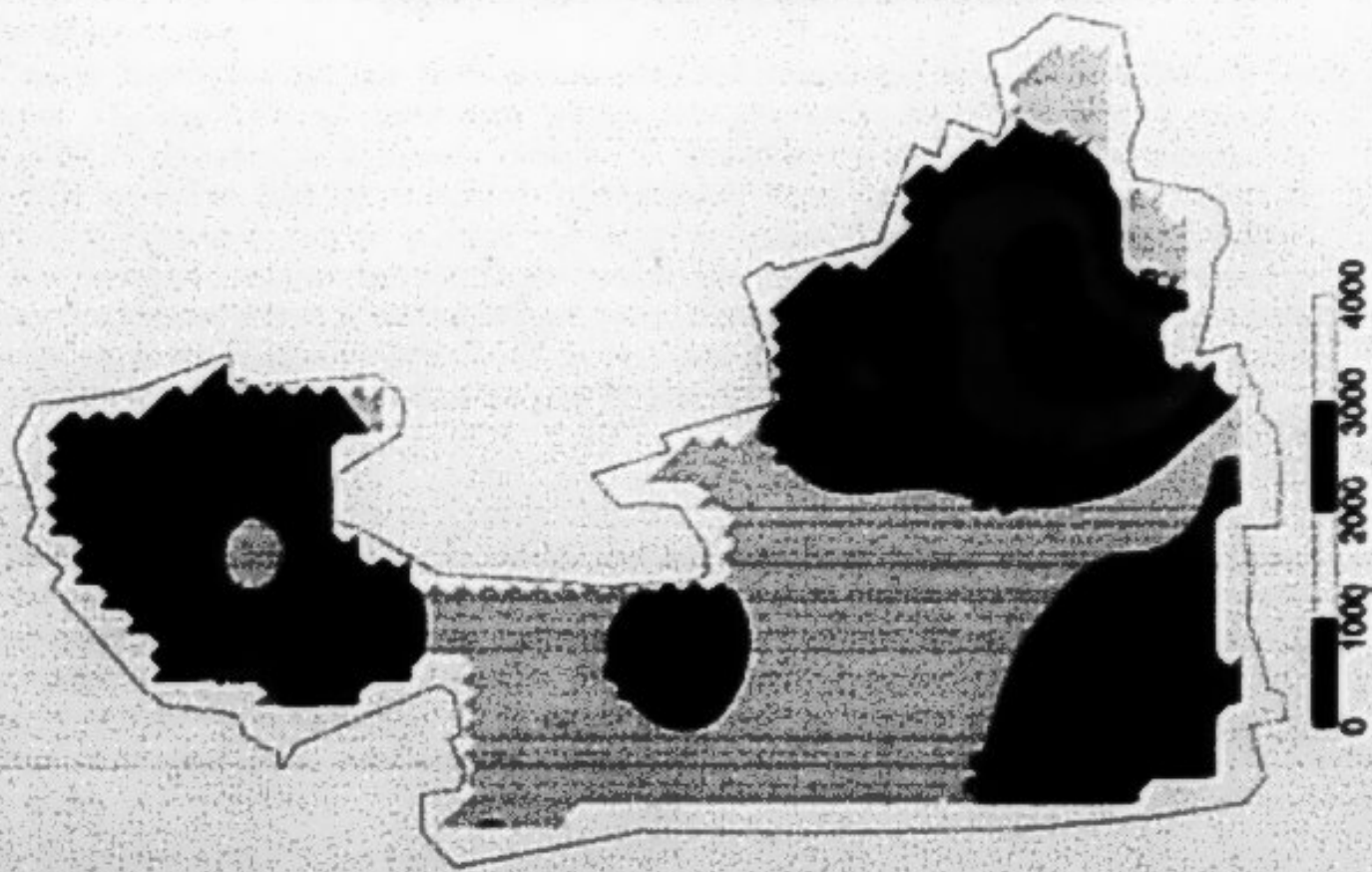


Fig. 59- Distribution spatiale de CEllecor, des sols du périmètre irrigué de Cébala-Borj Touil. Septembre-octobre, 2002.

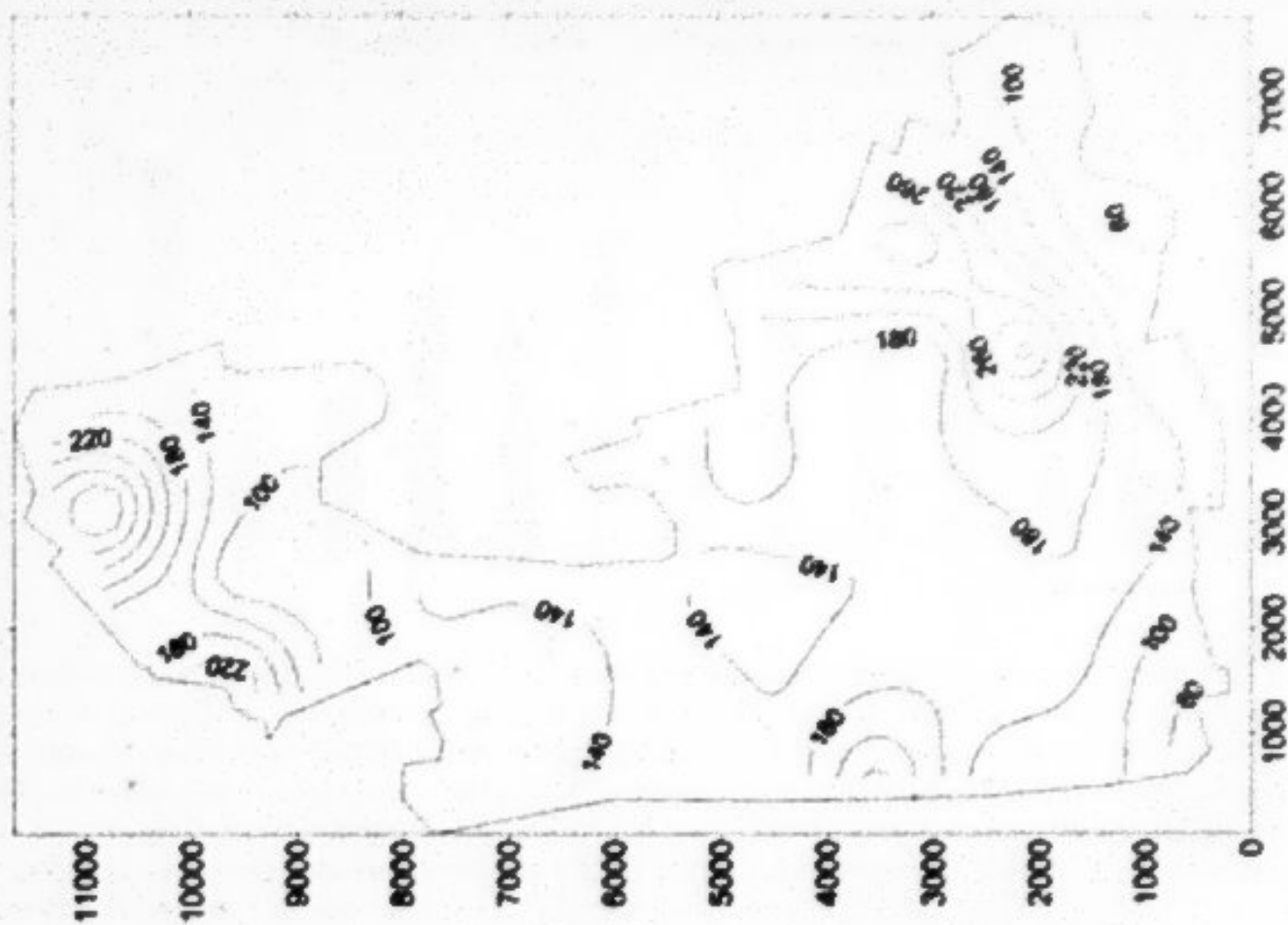
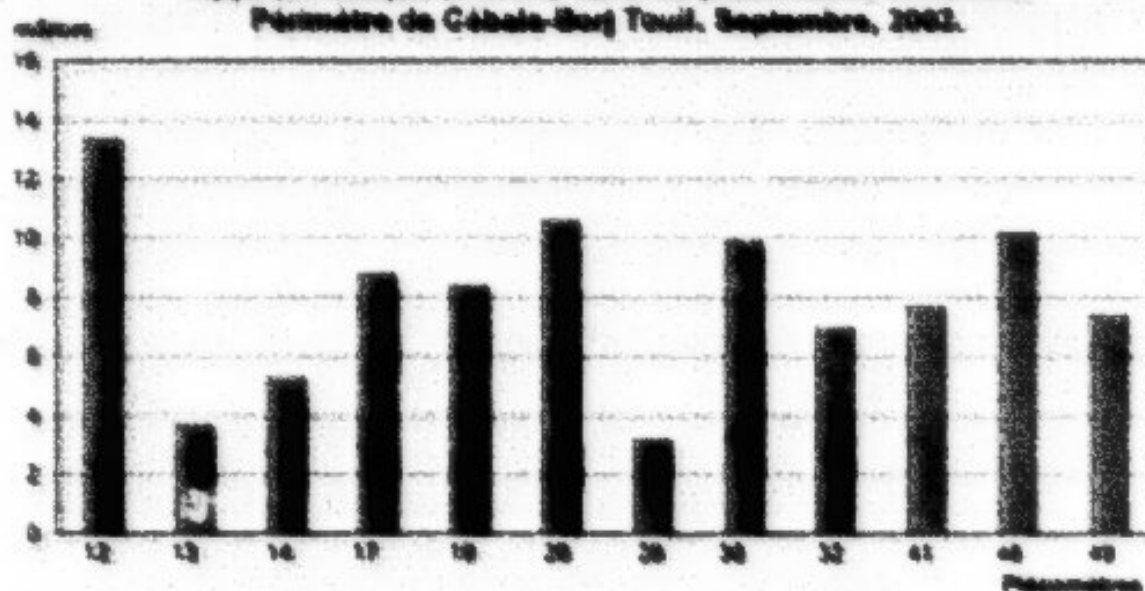


Fig. 60- Représentation en histogrammes de la salinité de la nappe phréatique (mS/cm) dans les piézomètres contrôlés. Périmètre de Cébala-Borj Touil, Septembre, 2002.



80 cm, de la surface du sol (fig. 58). On signale aussi une légère incursion de la remontée de la nappe près de la bordure nord-ouest du périmètre. L'été 2002 n'a pas eu d'impact sur le niveau de la nappe dans la partie engorgée du périmètre qui est la zone proche de son extrémité sud-est. Des pluies estivales enregistrées au mois d'août 2002 auraient eu pour effet une remontée du niveau de la nappe dans la partie habituellement soumise à un régime d'hydromorphie. Il est, par conséquent, utile d'envisager d'éventuelles interventions visant à curer davantage les drains et assurer une meilleure circulation vers les exutoires.

Les résultats de mesure de la salinité de la nappe sont interprétés par une représentation en histogrammes (fig. 60). Les valeurs supérieures à 10 mS/cm sont enregistrées dans les piézomètres 12, 20, 30 et 48 dont trois parmi eux sont situés dans la partie sud-est du périmètre (la plus engorgée). Les valeurs les plus faibles sont observées dans les piézomètres 13 et 28 avec moins de 4 mS/cm. Le reste des valeurs varie entre 5 et 9 mS/cm. Cette nappe est salée et ses hautes concentrations en sels peuvent entraîner de fortes accumulations dans les sols en cas de remontée excessive de son niveau.

Pour la distribution spatiale de la salinité des sols mesurée par la méthode CEM, elle est illustrée par la figure 59. On y constate deux noyaux de concentration des sels : le premier occupe la partie sud-est du périmètre dans laquelle la nappe se caractérise par son plus faible niveau dans le périmètre, le second se situe sur la bordure septentrionale de ce dernier. Si les fortes valeurs de CEH₀₋₆₀ sont habituelles près de la limite sud-est du périmètre, l'apparition de valeurs similaires près de son extrémité nord peut être considérée comme nouvelle et inhabituelle. En effet, les valeurs de CEH₀₋₆₀ atteignent même le chiffre 340 qui est un maximum pour tout le périmètre. Le niveau de la nappe est pourtant situé au-delà de 1,2 m dans cette partie du périmètre. Des accumulations salines seraient concernées les sols et auraient pour origine essentielle les eaux d'irrigation.

4- Synthèse et conclusions

Le contrôle de l'évolution de la salinité des sols dans le périmètre irrigué de Cébala-Borj Touil a été réalisé au cours de sept campagnes s'étalant sur quatre années : de 1999 à 2002. Il y a eu ainsi deux campagnes de suivi par an, en moyenne, sauf pour l'année 2000 au cours de laquelle une seule campagne (du printemps) a été réalisée. Pour la plupart des périodes de suivi, le contrôle a concerné la profondeur et la salinité de la nappe avec aussi la salinité des sols évaluée sur six profondeurs et mesurée in-situ par l'appareil CEM.

Les résultats obtenus ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- Une forte remontée de la nappe est constatée en avril 1999, mai 2000 et mars-avril 2002, principalement sur la façade est du périmètre. Cette remontée concerne la moitié sud et surtout la partie sud-est du périmètre en mars 2001 et septembre 2002. En revanche, le niveau de la nappe subit un rabattement très net en octobre 1999 et septembre-octobre 2001. Il s'avère ainsi qu'après les saisons hivernales, la nappe s'approche de la surface du sol et atteint des niveaux qui peuvent communiquer les sels à la zone de distribution racinaire. L'été a tendance à faire chuter le niveau de la nappe, sauf en septembre 2002 où on a constaté une remontée dans la partie sud-est du périmètre. Cette remontée serait due à la pluviométrie enregistrée dans la région en août 2002. Ainsi, les pluies seraient une cause de l'hydromorphie dans le périmètre irrigué de Cébala-Borj-Touil qui n'évacue pas rapidement ses excès d'eau s'accumulant surtout près de sa pointe sud-est. Des opérations de curage des drains et de nettoyage des fossés seraient nécessaires dans cette partie du périmètre.

- La salinité de la nappe est généralement comprise entre 4 et 15 mS/cm et elle est plus ou moins stable pour toutes les campagnes de mesure. L'eau a tendance à être plus diluée dans la moitié nord près de la Mejerda, et devient plus concentrée dans la moitié sud. Les eaux de la Mejerda communiqueraient latéralement avec la nappe et contribueraient à sa dilution. Les risques de salinisation sont, par conséquent, plus graves dans la moitié sud qui associe à la fois l'hydromorphie à la forte salinité de la nappe.

- La salinité des sols mesurée par la méthode à la pâte saturée et au conductivimètre électromagnétique est plus élevée dans la moitié sud du périmètre. Elle peut atteindre même les 8 mS/cm en conductivité électrique moyenne. Cette salinité présente généralement, un profil à deux maxima : au sommet (0-20 cm) et à la base (100-120 cm). Les sources de sels sont donc à la fois, l'eau de la nappe et celle de l'irrigation, avec une prépondérance relative de celle de la nappe. En effet, les valeurs élevées de C_{Ec} apparaissent généralement au-dessus des zones hydromorphes. Il y a, par conséquent, une nécessité de rabattre le niveau de cette nappe à des profondeurs plus importantes par l'entretien et le curage des drains.

Le périmètre de Cébala-Borj-touil, irrigué par les eaux usées traitées, est partagé en deux moitiés à conditions d'hydromorphie et de salinité différentes : une moitié nord moins salée et à nappe phréatique souvent diluée par les infiltrations latérales des eaux de la Mejerda et une moitié sud à sols plus salés et à nappe remontant vers la surface après les saisons hivernales et les périodes pluvieuses. La salinité a tendance, toutefois, à se cantonner près de la bordure sud-est du périmètre où s'étendent des sols salsodiques. La surveillance continue de cette zone est recommandée et le passage fréquent et périodique des hydro-cureuses pour le nettoyage et l'entretien des drains est nécessaire.

BIBLIOGRAPHIE

- Arrondissement des Sols de l'Ariana, 2002. Résultats d'analyses d'un échantillon d'eau usée du périmètre de Cébala-Borj Touil. PPE/ Tunisie Environnement. Département Laboratoire d'Analyse, CRDA Ariana (DRPS / Arr Sols).
- Ben Hassine (H.), Ben Hassine (T.) et Ben Ammar (A.), 1981. Evolution saisonnière et variation inter-annuelle de la salure du sol dans la basse vallée de la Mejerda. ES 193, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture.
- Ben Hassine (H.) et Jelassi (K.), 2001. Résultats de deux années de suivi de l'évolution de la salinité des sols dans le périmètre irrigué de Kalaât Landalous : 1999-2000. ES 315, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture.
- Dérouiche (C.), Loukil (A.), Decluseau (D.) et Braudeau (E.), 2001. Le SIRS-sols du périmètre irrigué de Cébala. Bulletin « Sols de Tunisie », numéro spécial 2001, pages 51-66.
- Hachicha (M.), Jelidi (B.), Trabelsi (A.) et Brari (N.), 1992. Impact du drainage sur les variations saisonnières de la salinité dans le périmètre irrigué de Cébala-Borj Touil. ES 264, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, 18 pages.
- Job (J.O.), 1993. Les sols salés de l'oasis d'El Guettar (Sud tunisien). Résumé de thèse. ES 268, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, 36 pages.
- Job (J.O.) et Hachicha (M.), 1990. Suivi de la salure des périmètres irrigués de Tunisie par conductivimétrie électromagnétique. Rapport de campagne 1989-1990. Document technique, Direction des Sols-ORSTOM, 22 pages.
- Job (J.O.) et Meraf (M.), 1991. Origine et gestion des sols salés de l'oasis d'El Guettar. Document technique, Direction des Sols-ORSTOM, 64 pages.
- Mami (A.) et Hamdane (A.), 1977. Etude du drainage, de la salure et de l'alcalinité dans les périmètres irrigués de la basse vallée de la Mejerda. ES 128, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture.
- UNESCO/UNDP, 1970. Research and training on irrigation with saline water. 1962-1969. Technical report, 256 pages.

FIN

44

VUES