

REPUBLIQUE TUNISIENNE

2002

MINISTRE DE L'AGRICULTURE
DE L'ENVIRONNEMENT ET DES RESSOURCES
HYDRAULIQUES

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

B 1867

B 1921

1124A

MICROFICHE

**SUIVI DE L'EVOLUTION DE LA SALINITE DES SOLS
ET DE LA NAPPE DANS LE PERIMETRE IRRIGUE
DE CHAMSA (TOZEUR)**

PERIODE 1999 - 2002

Par : H. Ben HASSINE et K. JELASSI Direction des Sols
J. HARRATHI, H. EL ICHI et M. MARZOUQUI, Arrondissement
des Sols de Tozeur (Décembre 2002)

E-S 322

~~B 1867~~ B 1921

11 248

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

**Suivi de l'évolution de la salinité des sols et de
la nappe dans le périmètre irrigué de Chamsa (Tozeur).
Période 1999-2002**

ES 322

Par

- Ben Hassine (H.) et Jelassi (K.), Direction des Sols
- Harrathi (J.), El Ichi (H.) et Marzougui (M.), Arrondissement des sols de Tozeur

Décembre, 2002

SOMMAIRE

Avant-propos	4
1- Le périmètre d'étude	4
2- Matériel et méthodes	6
3- Résultats et discussions	8
3-1- Le contrôle de mars 1999	8
3-1-1- Le niveau et la salinité de la nappe	8
3-1-2- la salinité des sols	9
3-1-3- Conclusion	11
3-2- Le contrôle de novembre 1999	11
3-3- Le contrôle d'avril 2000	12
3-4- Le contrôle de novembre 2000	13
3-4-1- Le niveau et la salinité de la nappe	13
3-4-2- La salinité des sols	14
3-4-3- Conclusion	16
3-5- Le contrôle d'avril 2001	16
3-6- Le contrôle de novembre 2001	20
3-6-1- Le niveau de la nappe	20
3-6-2- La salinité des sols	20
3-6-3- Conclusion	24
3-7- Le contrôle de février 2002	24
3-7-1- le niveau et la salinité de la nappe	24
3-7-2- La salinité des sols	26
3-7-3- Conclusion	26
Conclusion générale	26
Bibliographie	27

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 15 % par la formule : $CEHcorr. = CEH + 5,4*(15-Hsmoy)$

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

CEemoy. : Conductivité électrique moyenne du sol d'un point de prélèvement
 $= [2*CEe_{0-20} + CEe_{20-40} + (CEe_{40-60} + CEe_{60-80} + CEe_{80-100} + CEe_{100-120})/4]/4$

CEe₀₋₂₀ : Conductivité électrique de l'horizon 0-20 cm

CEe₀₋₄₀ : Conductivité électrique de l'horizon 0-40 cm = $(2*CEe_{0-20} + CEe_{20-40})/3$

CEe₂₀₋₄₀ : Conductivité électrique de l'horizon 20-40 cm

CEe₄₀₋₆₀ : Conductivité électrique de l'horizon 40-60 cm

CEe₆₀₋₈₀ : Conductivité électrique de l'horizon 60-80 cm

CEe₈₀₋₁₀₀ : Conductivité électrique de l'horizon 80-100 cm

CEe₁₀₀₋₁₂₀ : Conductivité électrique de l'horizon 100-120 cm

Hsmoy : Humidité pondérale moyenne du sol du point de prélèvement

Avant-propos

Le contrôle de l'évolution de la salinité des sols de l'oasis de Chamsa est un ensemble d'opérations menées d'une manière semestrielle et permanente depuis 1997. Les résultats relatifs aux campagnes de suivi des années 1997 et 1998 ont été publiés précédemment (Ben Hassine et *al.*, 1998) et ont permis de montrer que la partie basse du périmètre, en l'occurrence son extrémité nord-ouest, est soumise le plus souvent à des remontées fréquentes du niveau du plan d'eau souterrain. Malgré l'aménagement d'un réseau de drainage, cette partie du périmètre continue à subir l'effet de l'hydromorphie, en raison surtout, de sa basse altitude qui est proche de celle d'un exutoire naturel des eaux superficielles situé juste à proximité. Cette oasis qui est ancienne (une étude a signalé son existence en 1967 (El Fékih, 1967)) a vu ses problèmes d'hydromorphie s'aggraver surtout après la création d'autres oasis situées plus en amont et dont les excédents d'eau traversent ce périmètre, en s'écoulant vers l'aval. Ces problèmes d'hydromorphie ont été à l'origine des opérations de suivi de l'évolution du niveau et de la salinité et de leurs incidences sur les sols. L'actuel travail expose les résultats du suivi réalisé durant les années 1999, 2000 et 2002.

1- Le périmètre d'étude

Couvrant une surface de 90 ha environ, le périmètre de Chamsa est installé sur une forme géomorphologique en glacis orienté vers le nord, dans le bassin versant de Chatt El Gharsa (fig. 1). Il est limité sur sa bordure nord, par une sorte de talweg dans lequel est creusé le fossé principal d'évacuation des eaux de drainage (Ben Hassine, 1997). Le paysage autour du périmètre montre des sortes de monticules à matériaux meubles, souvent sableux, issus d'apports éoliens et de remaniements superficiels du complexe continental terminal qui englobe le mio-pliocène et le début du quaternaire (Coque, 1962 *in* Vieillefon, 1976). Ce paysage, avec les facteurs locaux de la pédogenèse, ne permet pas l'apparition de sols véritablement évolués sur roche en place, mais seulement des sols minéraux bruts ou peu évolués, à côté bien entendu, des sols hydromorphes et halomorphes (Le Homérou, 1960 *in* Vieillefon, 1976). Les sols du périmètre de Chamsa ont été décrits par El Fékih (1967) de la manière suivante : sols de texture légère à équilibrée, profondeur du sol sain >120 cm, salure nulle, drainage interne bon. Pas d'encroûtement gypseux et pas d'hydromorphie avant 150 cm de profondeur. Relief sans accidents et sans pente élevée. Sols aptes pour toutes les cultures arbustives, maraîchères et fourragères.

L'hydromorphie qui cause actuellement des dégâts dans l'oasis n'est pas signalée en 1967 (El Fékih, 1967). Ce sont probablement les activités d'irrigation pratiquées dans l'oasis même ses alentours qui sont à l'origine de l'apparition de cette hydromorphie. L'oasis de Chamsa est, en effet, située à l'aval de celle d'Ibn Chabbat qui est beaucoup plus large (620 ha) et dont les eaux excédentaires doivent traverser les sols de Chamsa dans leur mouvement d'écoulement naturel.

Les analyses granulométriques récemment effectuées sur ces sols signalent l'abondance de la fraction sableuse par rapport aux limons (fig. 3, 4 et 5). La fraction argileuse est négligeable. Les prélèvements ont eu lieu en mars 1999 et ont concerné trois points dans le périmètre (P5bis, P14 et P16), sur une profondeur de 120 cm. La distribution granulométrique selon la profondeur, est presque identique pour les trois points, avec des proportions presque équivalentes de sables fins et de sables grossiers. On note, cependant, une plus importante richesse en limons entre 40 et 60 cm dans le profil P14.

Ces sols sont carbonatés : les teneurs en calcaire varient entre 10 et 15 % généralement.

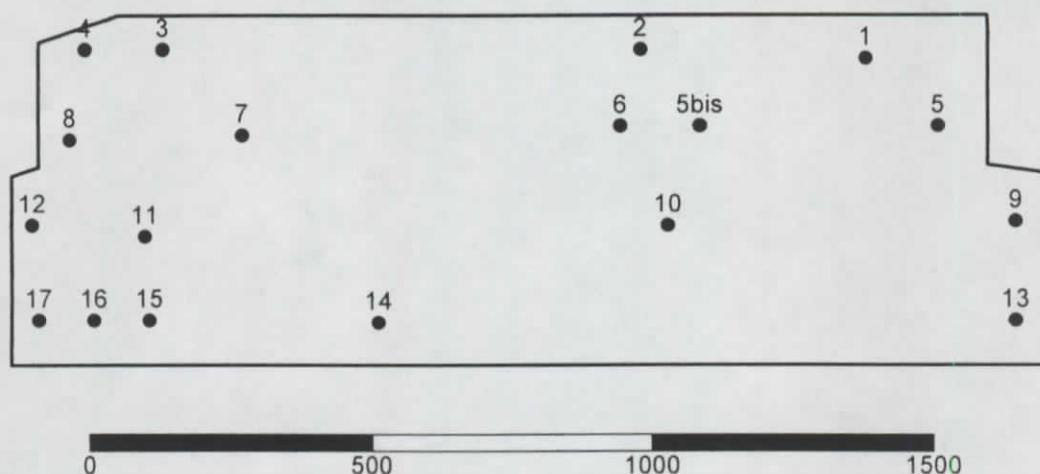
De tels sols sont perméables, poreux et ne retiennent pas les sels puisqu'ils sont dépourvus de colloïdes argileux. En effet, les opérations de lessivage par les eaux pluviales (rares) ou celles d'irrigation peuvent entraîner rapidement les sels en profondeur à travers ces sols.

Leur problème est l'hydromorphie de profondeur qui peut conduire à une salinisation de leurs horizons de surface. Des programmes de surveillance et de suivi du niveau de la nappe sont indispensables dans ces conditions. Ils permettent d'étudier l'impact des variations de ce niveau sur les sols et par conséquent sur leur productivité.

2- Matériel et méthodes

18 piézomètres sont implantés dans le périmètre (fig. 2). Ils servent à suivre périodiquement le niveau de la nappe et permettent de prélever des échantillons de ses eaux pour l'analyse de leur salinité. Ainsi, de tels outils permettent d'obtenir deux paramètres qui sont le niveau et la salinité de la nappe. Le niveau est une donnée importante du moment qu'il renseigne sur les risques d'hydromorphie et de leurs impacts négatifs sur la productivité des sols.

Fig. 2- Localisation des piézomètres de surveillance de la nappe dans le périmètre irrigué de Chamsa (Tozeur)



Pour les sols, des prélèvements sont effectués autour des piézomètres, tous les 20 cm, sur une profondeur totale de 120 cm. Sur les échantillons prélevés, sont déterminées les salinités des extraits de la pâte saturée, exprimées en mS/cm. De telles données sont exploitées pour établir des cartes de distribution spatiale de la salinité des sols dans le périmètre. En outre, une salinité globale est déterminée selon la formule suivante (CRUESI, 1970 *in* Ben Hassine et Jelassi, 2001) :

$$CE_{emoy.} (mS/cm) = [2*CE_{e0-20} + CE_{e20-40} + (CE_{e40-60} + CE_{e60-80} + CE_{e80-100} + CE_{e100-120})/4]/4$$

Un tel paramètre exprime une salinité moyenne représentant tout le profil du point de prélèvement, comme il permet aussi d'établir une corrélation avec la conductivité électromagnétique en mode horizontal, variable évaluant la CEM de la partie supérieure du sol (80 % au moins) . En effet, le conductivimètre électromagnétique de marque GEONICS EM 38 DLM a été utilisé dans ce périmètre, au cours des campagnes d'avril et de novembre 2001 et de février 2002.

Fig. 3- Distribution en fonction de la profondeur de la composition granulométrique du sol autour du piézomètre P5bis. Chamsa, mars 1999.

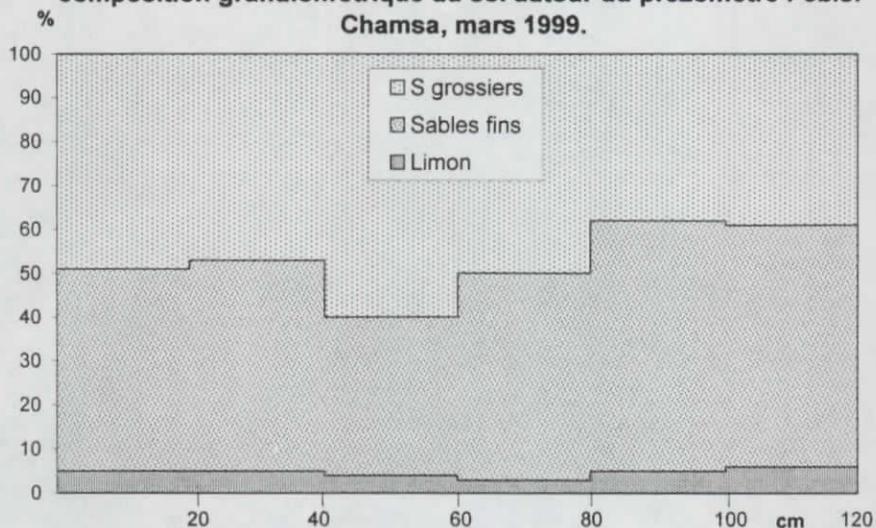


Fig. 4- Distribution en fonction de la profondeur de la composition granulométrique du sol autour du piézomètre P14. Chamsa, mars 1999.

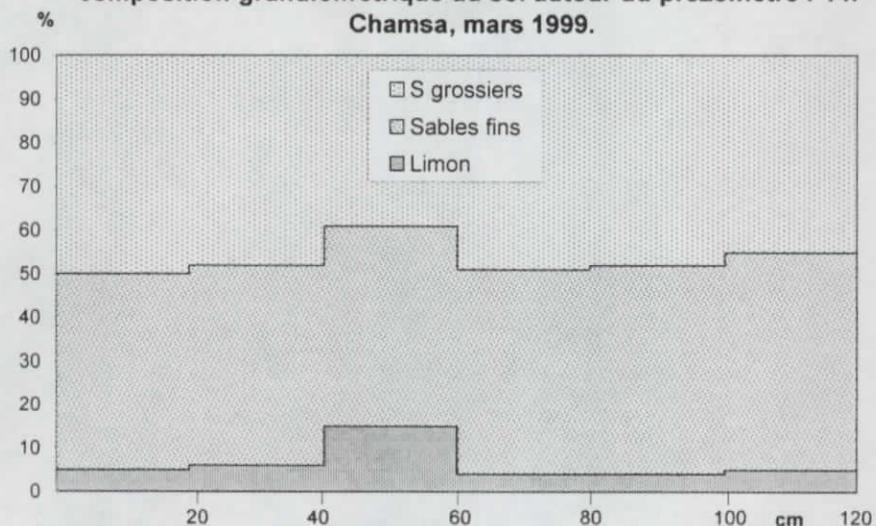
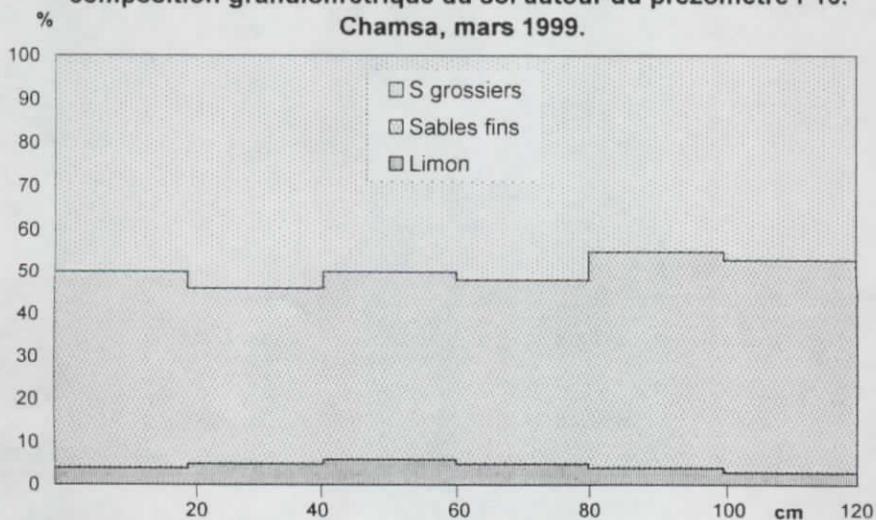


Fig. 5- Distribution en fonction de la profondeur de la composition granulométrique du sol autour du piézomètre P16. Chamsa, mars 1999.



Pour exploiter les informations obtenues à travers ces divers paramètres et déterminer les relations qui existent entre eux, des tests de corrélation simples sont établis entre chaque couple de variables ; leurs résultats permettent d'identifier les effets que peut avoir la nappe sur la salinité des sols et aussi la validité de la méthode CEM par son lien avec CEE moyenne.

Cette méthodologie qui est presque commune pour tous les périmètres irrigués contrôlés peut être jugée exhaustive du fait qu'elle retient tous les processus de salinisation survenant à partir de facteurs à risques réels découlant de la présence d'une nappe phréatique proche de la surface et d'apports très fréquents d'eau d'irrigation.

Les campagnes de contrôle ont été menées d'une manière semestrielle, soit une fois en mars-avril et une deuxième fois en octobre novembre de chaque année, comme pour tous les autres périmètres contrôlés du pays. Les données disponibles et qui seront exploitées dans l'actuel document sont relatives à la période 1999-2002, au cours de laquelle sept campagnes de contrôle ont été réalisées. Le suivi du niveau et de la salinité de la nappe est presque automatique et continu, tandis que pour les sols, les données sont disponibles pour les périodes 03/1999, 11/2000, 04/2001, 11/2001 et 02/2002. Les données relatives à la nappe ne manquent que pour la campagne d'avril 2001. Les résultats sont exprimés en cartes de distribution spatiale des paramètres étudiés, en l'occurrence, le niveau de la nappe et la salinité des sols. Des tests de corrélation sont établis entre les diverses variables étudiées pour évaluer surtout l'impact de la nappe phréatique sur les sols.

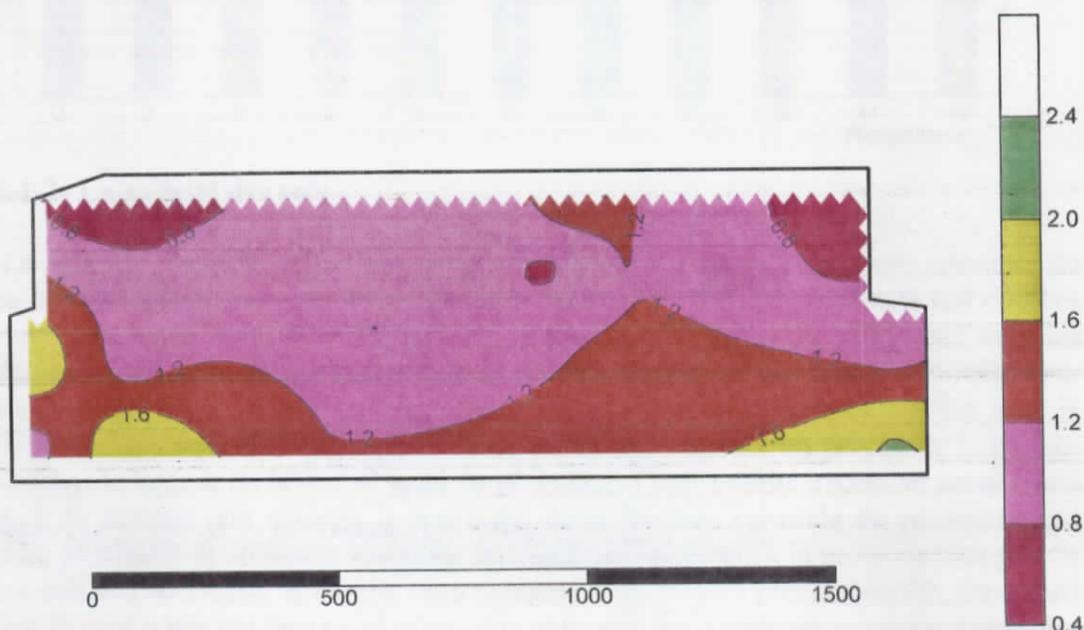
3- Résultats et discussions

3-1- Le contrôle de mars 1999

3-1-1- Le niveau et la salinité de la nappe

Au moins 60 % de la surface du périmètre est concernée par un niveau de la nappe situé au dessus de 1,2 m (fig. 6). Ce niveau remonte même au dessus de 0,8 m sur les deux extrémités de la limite septentrionale du périmètre. La nappe s'éloigne de la surface sur toute la bordure sud, mais les deux angles du périmètre semblent les moins soumis à ce niveau élevé.

Fig. 6- Carte de la distribution spatiale du niveau (m) de la nappe phréatique dans le périmètre irrigué de Chamsa. Mars, 1999.



que les sels sont plus concentrés en surface que dans l'horizon 20-40 cm (fig. 10). La salinité est encore plus faible dans l'horizon le plus profond du sol (100-120 cm). Les courbes

Fig. 8- Répartition spatiale de la salinité moyenne du sol (CE_{emoy} en mS/cm) du périmètre irrigué de Chamsa. Mars 1999.

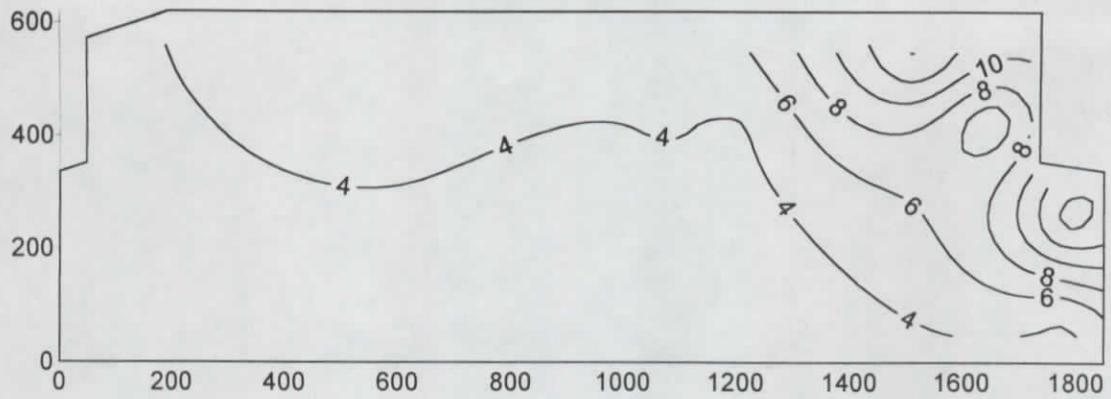


Fig. 9- Répartition spatiale de la salinité de l'horizon de surface du sol (CE_{e0-20} en mS/cm) du périmètre irrigué de Chamsa. Mars 1999.

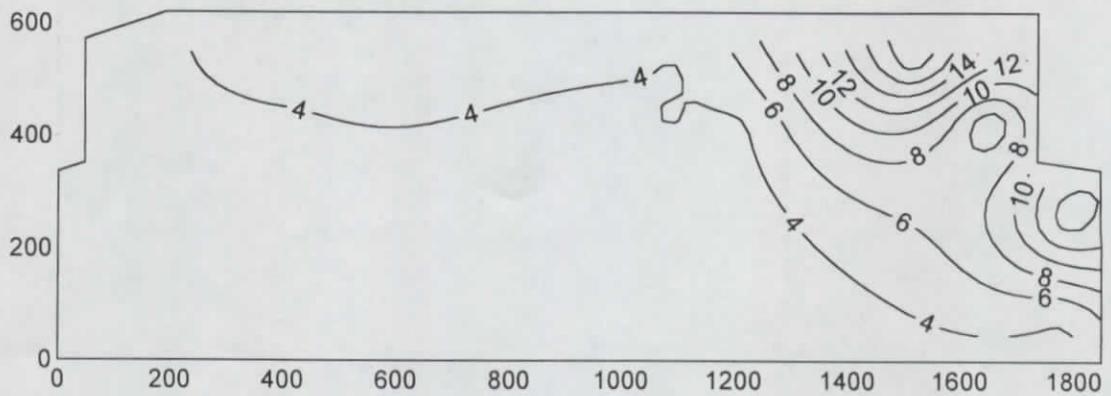


Fig. 10- Répartition spatiale de la salinité de l'horizon 0-40 cm du sol (CE_{e0-40} en mS/cm) du périmètre irrigué de Chamsa. Mars 1999.

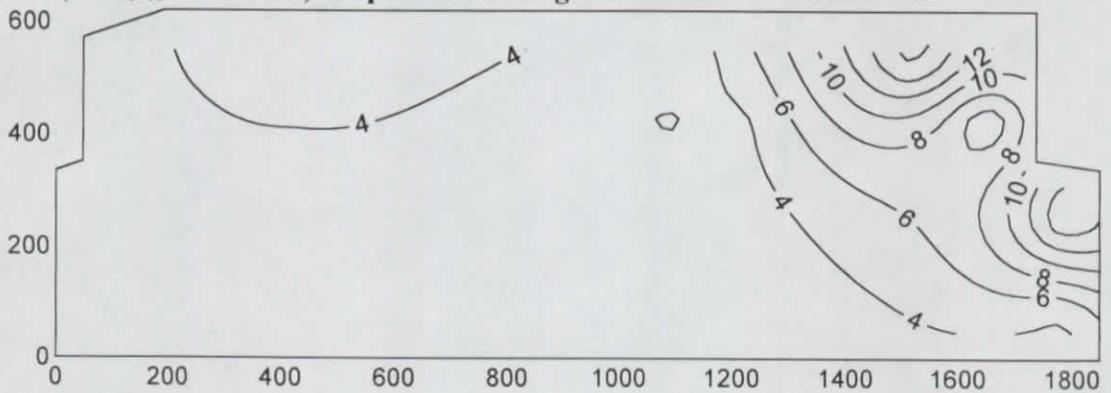
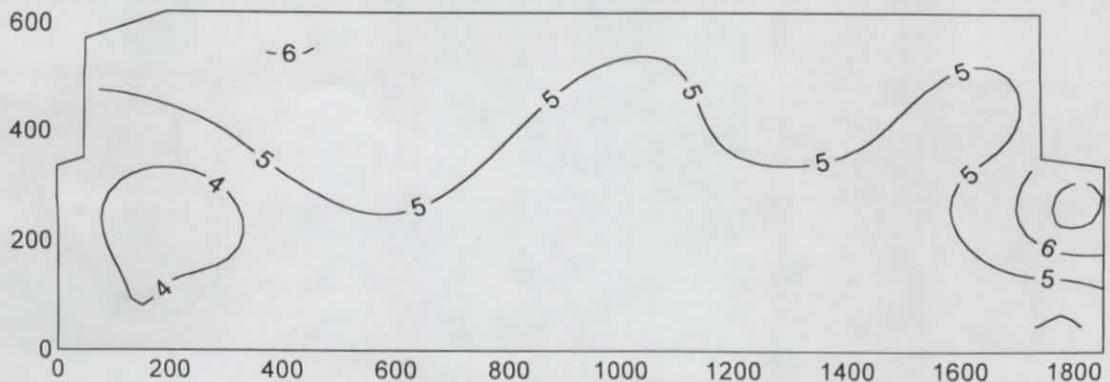


Fig. 11- Répartition spatiale de la salinité de l'horizon 100-120 cm du sol (CE_{e100-120} en mS/cm) du périmètre irrigué de Chamsa. Mars 1999.



d'isovaleurs apparaissant sur la carte sont 4 et 5 mS/cm et occupent plus de 90 % de la surface du périmètre (fig. 11). Seul un petit noyau plus concentré en sels (6 à 7 mS/cm) apparaît autour du piézomètre P9. Cet horizon profond (100-120 cm) reflète la salinité de la nappe, puisque les valeurs mesurées sont semblables. L'extrait aqueux de cet horizon est celui de la nappe, particulièrement lorsque le niveau de cette dernière est élevé.

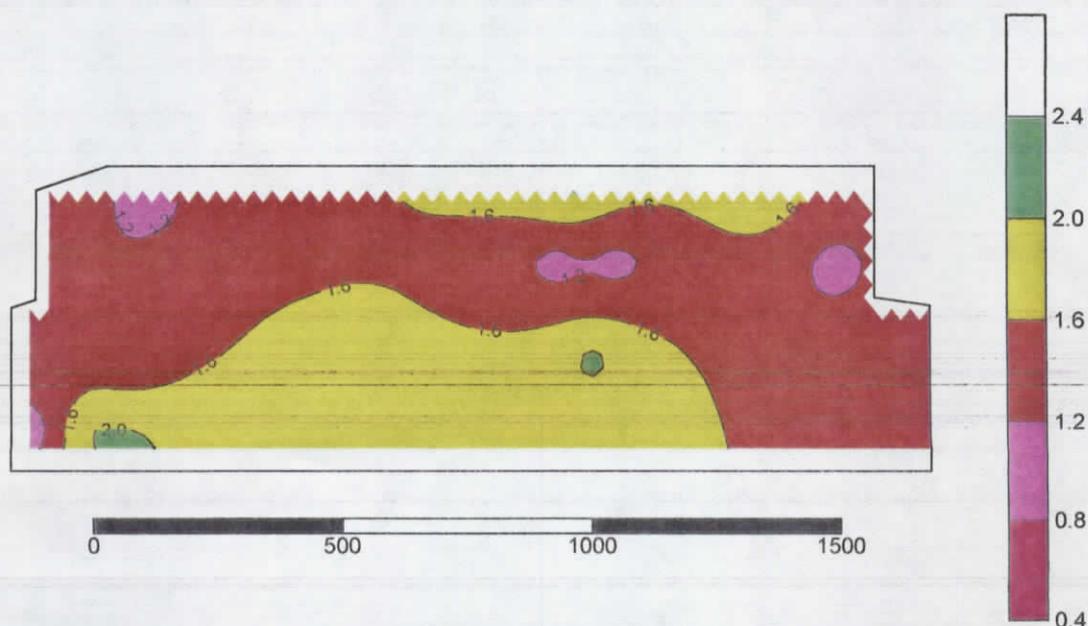
3-1-3- Conclusion

La nappe phréatique dans l'oasis de Chamsa présente un niveau inférieur à 1,2 m sur plus de la moitié du périmètre. Ce niveau occupe la partie la plus basse, en l'occurrence la zone nord. La salinité est souvent comprise entre 4 et 8 mS/cm à l'exception du piézomètre P9 dont la CE de l'eau dépasse 12 mS/cm. La salinité des sols est plus élevée en surface près des bordures est et nord-est du périmètre. Elle est faible et reste proche de celle de la nappe phréatique sur au moins 75 à 80 ha. Cette salinisation qui ne touche qu'une faible partie du périmètre aurait pour origine un effet de bordure résultant d'un mauvais drainage en dehors de l'oasis et près de son extrémité orientale.

3-2- Le contrôle de novembre 1999

Ce contrôle a concerné la nappe uniquement. La distribution spatiale de son niveau illustrée par la figure 12, signale une profondeur supérieure à 1,2 m sur plus de 95 % de la surface du périmètre (fig. 12). Seuls quelques petits noyaux, de surface limitée, indiquent un niveau compris entre 0,8 et 1,2 m et se situent en majorité dans la moitié nord du périmètre. Un rabattement important est constaté au cours de cette période, comparé à celui du mois de mars 1999. Ce rabattement est probablement le résultat d'une cessation totale ou partielle des activités d'irrigation. En novembre, les agriculteurs occupés par la cueillette des fruits, ne devraient pas pratiquer l'irrigation. Au contraire, en mars, l'activité d'irrigation reprend pour préparer la récolte de la saison suivante.

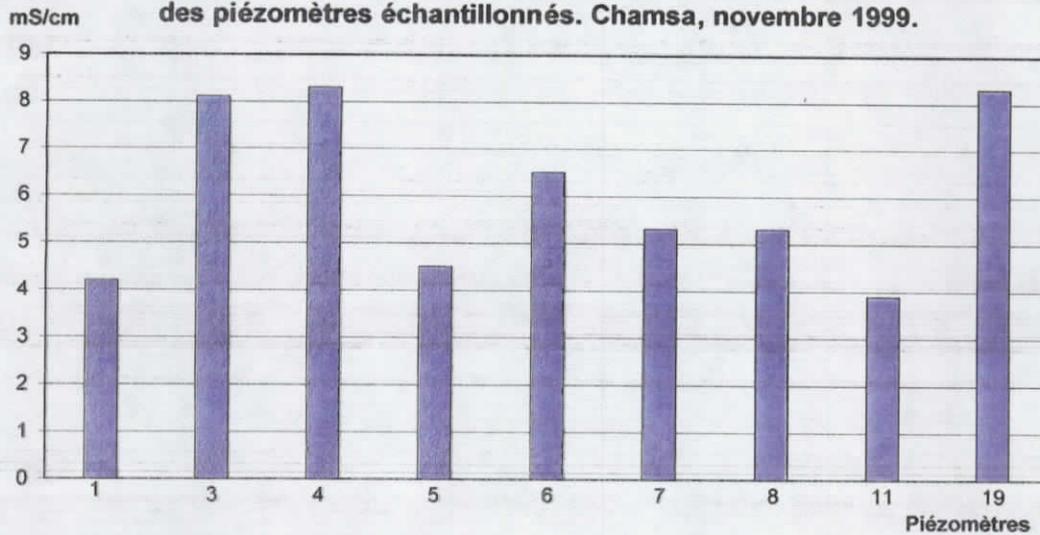
Fig. 12- Carte de la distribution spatiale du niveau (m) de la nappe phréatique dans le périmètre irrigué de Chamsa. Novembre, 1999.



La salinité des eaux de cette nappe est comprise entre 4 et 8 mS/cm (fig. 13). Le piézomètre P9, plus salé en mars précédent, n'est pas échantillonné au cours de cette campagne, à cause du rabattement de la nappe. Les ordres de grandeur des valeurs de cette

salinité n'ont pas beaucoup varié et sont restés compris dans le même intervalle : 4 à 8 mS/cm. La variation du niveau de la nappe n'influe donc, pas beaucoup, sur celle de la salinité. La qualité des eaux de cette nappe ne varie pas ; elles peuvent être déviées, à leur sortie du réseau de drainage, par système de pompage éventuellement, pour les utiliser en irrigation. Les sols du périmètre tolèrent une telle qualité d'eau puisqu'ils sont très poreux et très peu pourvus en colloïdes minéraux ou organiques.

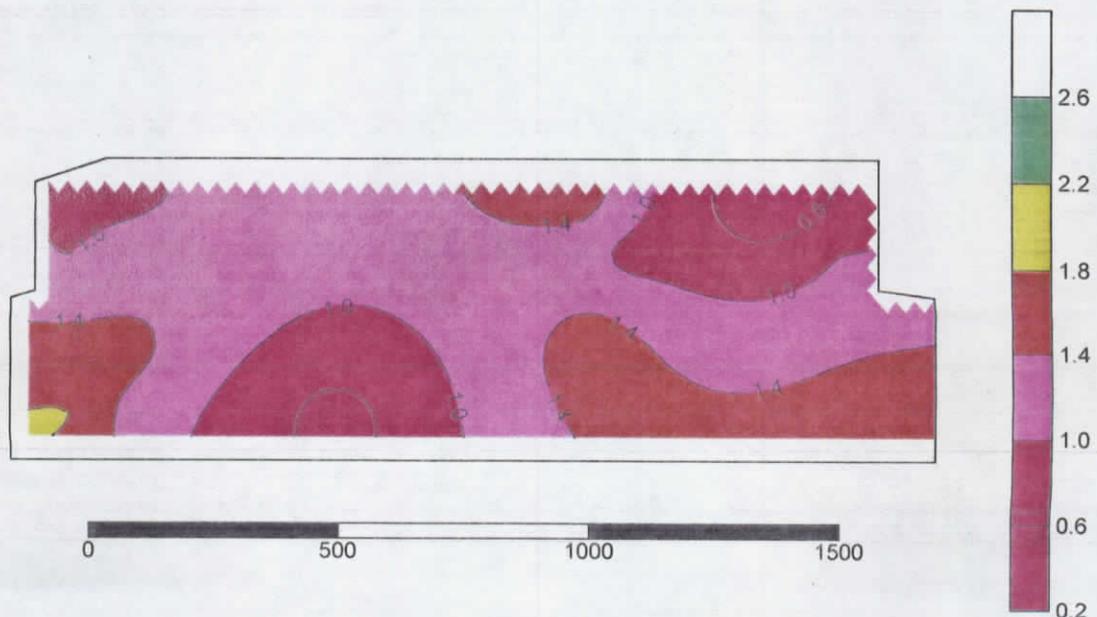
Fig. 13- Représentation en histogrammes de la salinité de l'eau des piézomètres échantillonnés. Chamsa, novembre 1999.



3-3- Le contrôle d'avril 2000

Il a concerné la nappe uniquement par la mesure de son niveau et l'échantillonnage de ses eaux. La remontée du plan d'eau est très nette au cours de cette période (fig. 14). Presque 80 % de la surface de l'oasis est soumise à un niveau inférieur à 1,4 m, avec une poussée très nette de la remontée dans la direction sud. En effet, cette partie du périmètre,

Fig. 14- Carte de la distribution spatiale du niveau (m) de la nappe phréatique dans le périmètre irrigué de Chamsa. Avril, 2000.

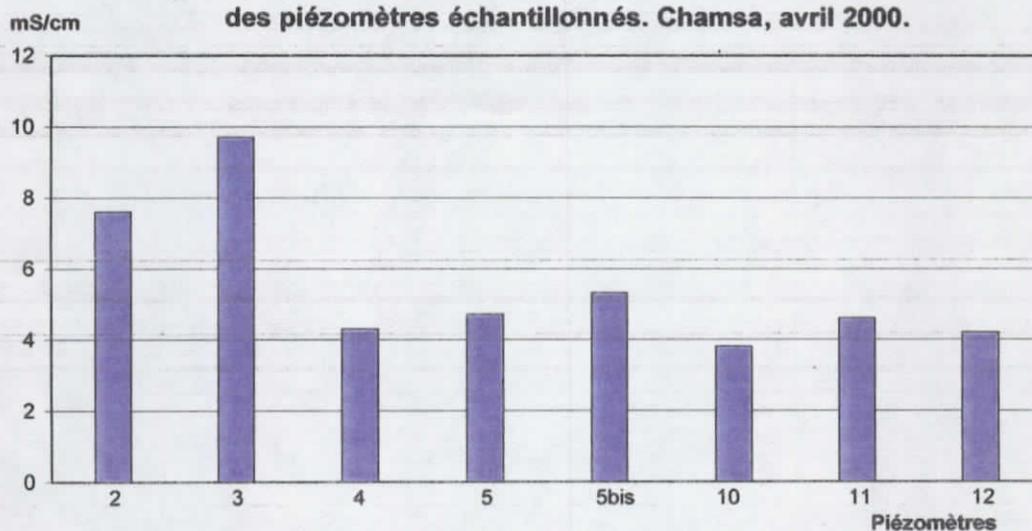


d'habitude peu hydromorphe, est concernée par un niveau de la nappe inférieur à 1 m. Ce n'est que près des angles sud-est et sud-ouest que la nappe descend au delà de 1,4 m. La remontée est presque générale au cours de ce mois d'avril, peu pluvieux dans la région. La cause de cette remontée serait, bien entendu, l'irrigation effectuée dans cette oasis et celle d'Ibn Chabbat, située plus en amont et dont la surface est beaucoup plus large (620 ha).

La salinité des eaux de la nappe est restée dans les mêmes limites observées précédemment : 4-8 mS/cm (fig. 15). Une légère augmentation de cette salinité (9,5 mS/cm) est constatée dans le piézomètre P3 qui se localise près de l'extrémité nord-ouest du périmètre.

La remontée du niveau de la nappe n'a pas beaucoup influé sur la salinité de ses eaux. On constate, cependant, que les valeurs sont plus proches de 4 que de 8. Une possible dilution des eaux de cette nappe serait survenue par les apports d'eau d'irrigation.

Fig. 15- Représentation en histogrammes de la salinité de l'eau des piézomètres échantillonnés. Chamsa, avril 2000.



En conséquence, on observe le même phénomène signalé en mars 1999, soit une remontée du niveau de la nappe mais qui est plus étendue en cette période d'avril 2000. Cette remontée est sûrement le résultat d'une intense reprise de l'irrigation dans toute la région. Il est alors possible de conclure que l'évacuation ne se produirait pas rapidement à travers le réseau de drainage, malgré la porosité du matériau dans lequel l'eau circule. La salinité de l'eau n'est pas très élevée ce qui peut inciter à étudier son recyclage pour une irrigation des espèces tolérantes comme le palmier dattier.

3-4- Le contrôle de novembre 2000

3-4-1- Le niveau et la salinité de la nappe

Un rabattement du plan d'eau par rapport au mois d'avril précédent, est observé au cours de cette période. Le niveau de la nappe est pratiquement supérieur à 1,2 m sur la totalité de la surface du périmètre (fig. 16). Trois petits noyaux à intervalle compris entre 0,8 et 1,2 m font l'exception et apparaissent près de la bordure septentrionale de l'oasis ; leur surface reste tout de même très faible. La moitié sud est complètement drainée de sorte que la profondeur de la nappe est au delà de 1,6 m. On arrive, par conséquent, à la même constatation évoquée précédemment et relative à la chute du plan d'eau au cours du mois de

novembre. Ainsi l'origine de la remontée de la nappe serait toujours la même : l'apport intensif d'eau d'irrigation qui n'est pas rapidement évacuée par le réseau de drainage.

La salinité des eaux de cette nappe n'a pas quitté l'intervalle 4-8 mS/cm mais le nombre de piézomètres à salinités proches de 4 mS/cm a diminué (fig. 17). L'eau d'irrigation, de qualité plus douce, qui n'est pas employée au cours de ce mois de novembre, devrait contribuer à la dilution de cette nappe lorsqu'elle est utilisée. La nappe s'est, par conséquent, légèrement concentrée en sels. Les piézomètres 3 et 4, situés près de la bordure nord-est sont les plus salés (8 mS/cm). La nappe a tendance à se concentrer davantage en sels dans la zone aval.

Fig. 16- Carte de la distribution spatiale du niveau (m) de la nappe phréatique dans le périmètre irrigué de Chamsa. Novembre 2000.

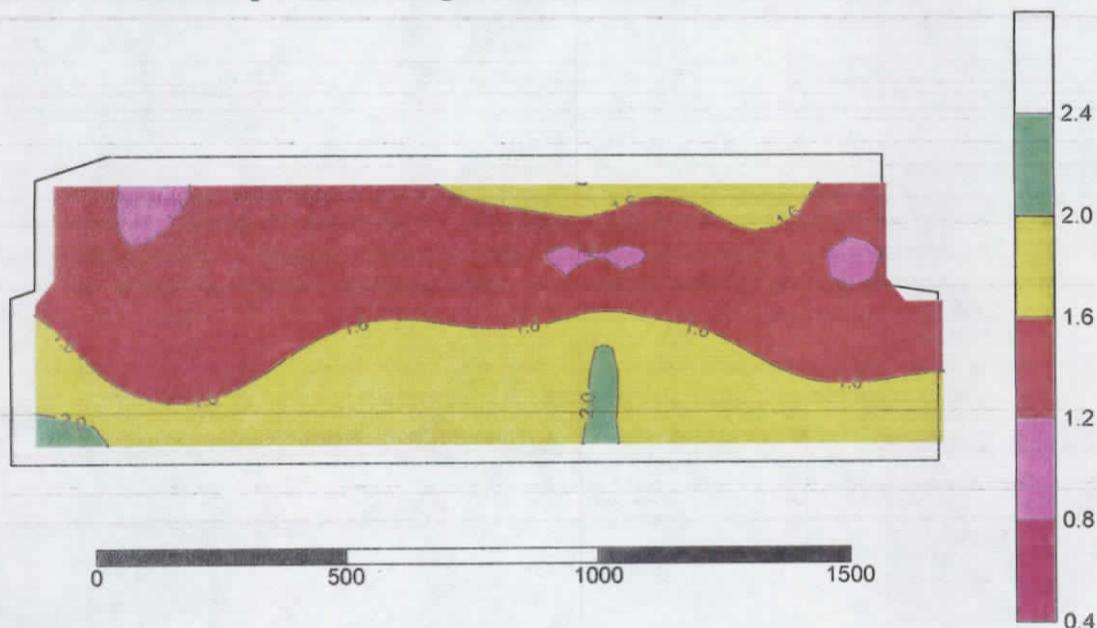
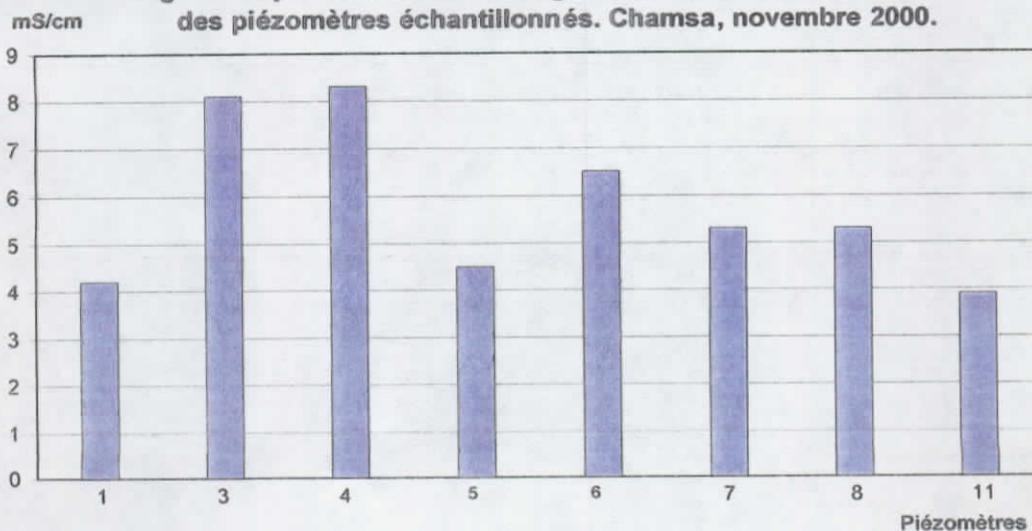


Fig. 17- Représentation en histogrammes de la salinité de l'eau des piézomètres échantillonnés. Chamsa, novembre 2000.



3-4-2- La salinité des sols

La salinité globale du sol estimée par C_{EE} moyenne (mS/cm) est faible sur la majeure partie du périmètre. Elle ne dépasse pratiquement pas 1 mS/cm (fig. 18). Ce n'est que près de la bordure nord-est du périmètre qu'elle s'accroît progressivement pour atteindre un

Fig. 18- Répartition spatiale de la salinité moyenne du sol (CE_{emoy} en mS/cm) du périmètre irrigué de Chamsa. Novembre 2000.

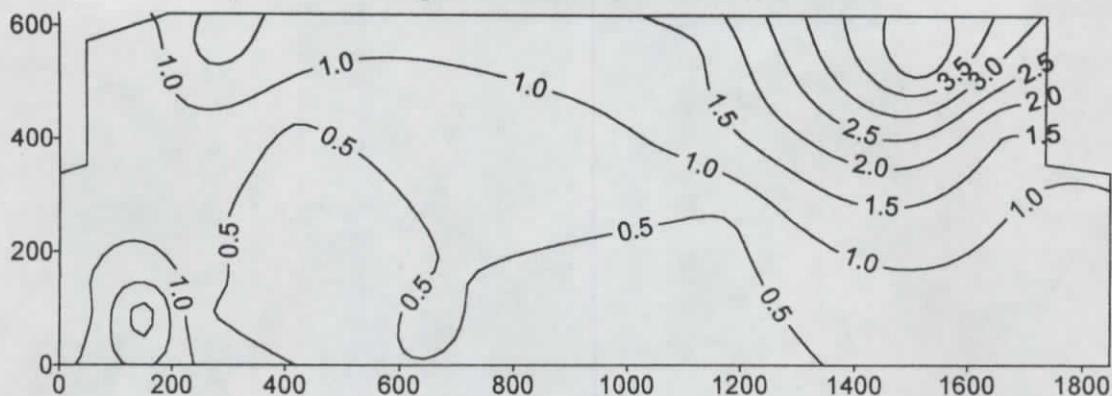


Fig. 19- Répartition spatiale de la salinité de l'horizon de surface du sol (CE_{e0-20} en mS/cm) du périmètre irrigué de Chamsa. Novembre 2000.

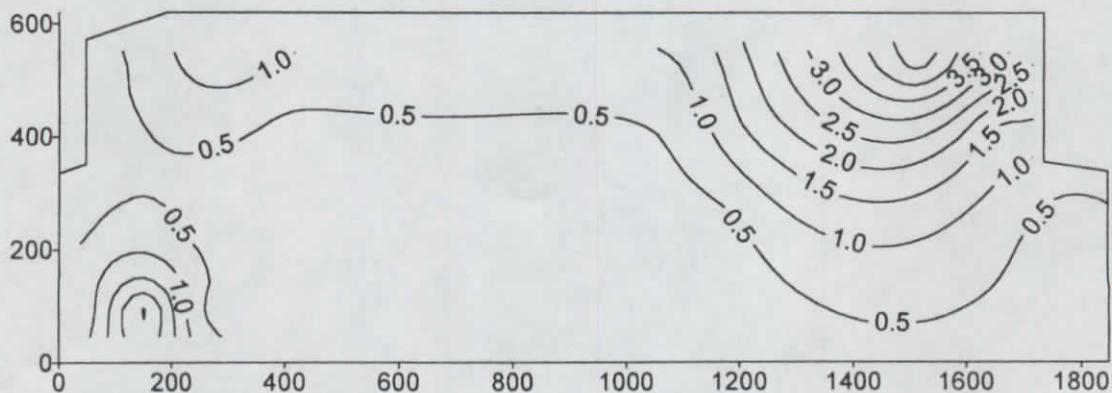


Fig. 20- Répartition spatiale de la salinité de l'horizon 0-40 cm du sol (CE_{e0-40} en mS/cm) du périmètre irrigué de Chamsa. Novembre 2000.

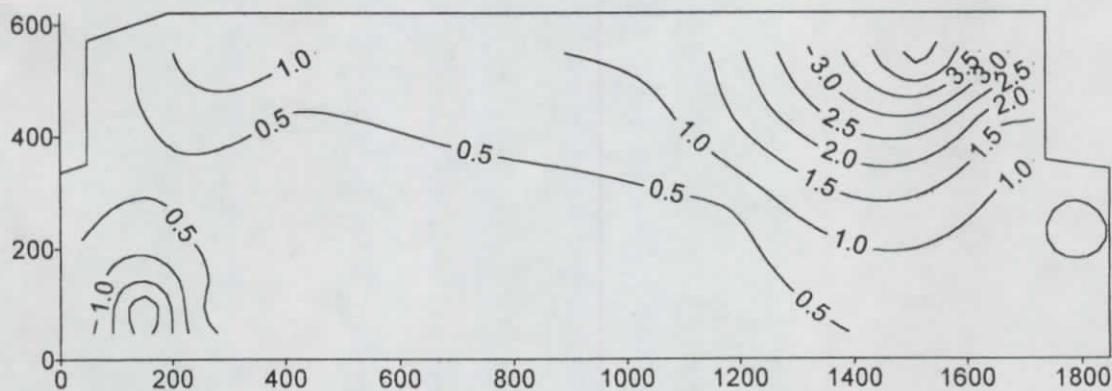
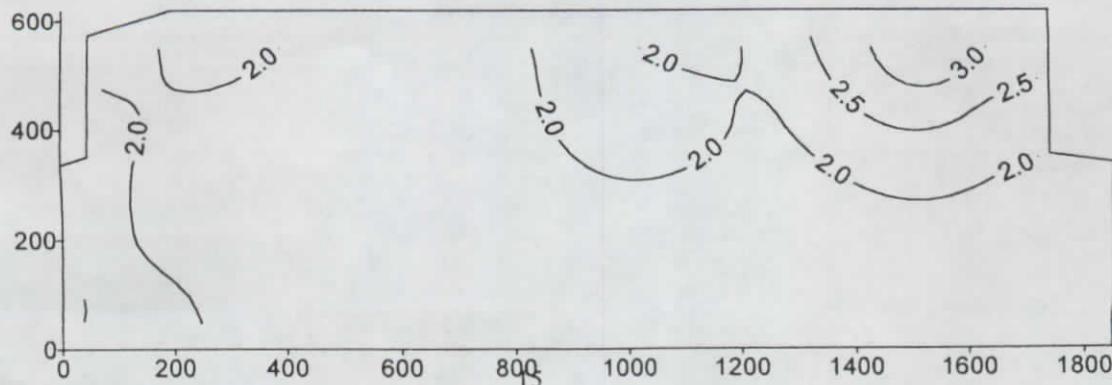


Fig. 21- Répartition spatiale de la salinité de l'horizon 100-120 cm du sol (CE_{e100-120} en mS/cm) du périmètre irrigué de Chamsa. Novembre 2000.



maximum de 4 mS/cm. Un petit noyau de 2 à 2,5 mS/cm apparaît aussi près de l'extrémité sud-ouest. Pratiquement, la même répartition spatiale de la salinité est observée pour les tranches de sols 0-20 cm et 0-40 cm (fig. 19 et 20). La salinité des horizons de surface qui est légèrement plus élevée près de l'extrémité nord-ouest influe directement sur les valeurs de la salinité globale (CE_{emoy}).

En profondeur, la salinité est presque homogène pour tout le périmètre. Pratiquement, c'est la courbe 2 mS/cm qui se répand sur presque la totalité de la surface, sauf sur la bordure sud-est où apparaissent les courbes d'isosalinité 2,5 et 3 mS/cm (fig. 21).

En conséquence, la salinité des sols est faible dans l'oasis de Chamsa au cours de ce mois de novembre 2000. Elle s'accroît uniquement près de l'angle nord-est du périmètre où elle est plus élevée en surface qu'en profondeur. Le profil salin est donc ascendant dans cette plage plus salée. Pourtant la nappe est au delà de 1,2 m sauf autour du piézomètre P5 où le niveau remonte sans dépasser 0,8 m (fig. 16) La conductivité électrique de l'eau de ce piézomètre est proche de 4 mS/cm (fig. 17) ; elle n'est pas très salée, mais en remontant en surface, les sels qui y sont dissous, même en faible quantité, peuvent précipiter et s'accumuler dans l'horizon de surface.

3-4-3- Conclusion

La salinité des sols au cours de ce mois de novembre n'est pas très dangereuse pour les cultures. Elle est même très faible sur plus des 3/4 du périmètre. Son accroissement ne se produit que près de la bordure nord-est, en atteignant un maximum de 3,5 à 4 mS/cm, en salinité moyenne (CE_e moyenne) et pour les tranches de sol 0-20 et 0-40 cm. La nappe ne remonte pas au cours de cette période qui doit connaître une trêve dans les activités d'irrigation. En conséquence, les eaux d'irrigation sont responsables de l'hydromorphie temporaire et de la salinité secondaire des sols dans le périmètre irrigué de Chamsa. L'évacuation lente des excès d'eau qui percolent rapidement à travers un matériau sableux pour rejoindre la nappe devrait influencer négativement sur la productivité des sols de ce périmètre.

3-5- Le contrôle d'avril 2001

La campagne de mesures réalisée au cours de cette période n'a concerné que les sols. Des analyses de la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée avec une série de mesures par le conductivimètre électromagnétique, ont été effectuées. Les résultats permettent de montrer que la salinité des sols s'est considérablement accrue par rapport au mois de novembre précédent. En effet, les courbes d'isosalinités de CE_e moyenne présentent des valeurs comprises entre 4 et 8 mS/cm. Les plus faibles salinités apparaissent dans la moitié sud (fig. 22). Les plus élevées se cantonnent vers l'extrémité nord-ouest. Il y a donc une augmentation progressive de la salinité globale du sol du sud vers le nord, donc de l'amont vers l'aval.

Pour les horizons 0-20 cm et 0-40 cm, la distribution spatiale de leur salinité est analogue à celle de CE_e moyenne (fig. 23 et 24). Ce sont pratiquement les mêmes courbes d'isovaleurs qui apparaissent pour les trois paramètres, avec, cependant, une poussée plus importante de la courbe 4 mS/cm vers l'aval, pour les horizons de surface. Une telle analogie revient au fait que la salinité de l'horizon de surface est soumise à un plus fort coefficient dans les formules de calcul de CE_e moyenne et de CE_{e0-40}.

La salinité de l'horizon le plus profond (CE_{e100-120}) est encore plus élevée, avec aussi une extension vers le sud des courbes à valeurs élevées. Le noyau le plus salé se déplace vers l'est par rapport à CE_e moyenne, tout en ne s'écartant pas de la limite nord du périmètre. Ses valeurs sont plus élevées et atteignent les 10 mS/cm (fig. 25). La salinité est davantage plus

Fig. 22- Répartition spatiale de la salinité moyenne du sol (CEemoy en mS/cm) du périmètre irrigué de Chamsa. Avril 2001.

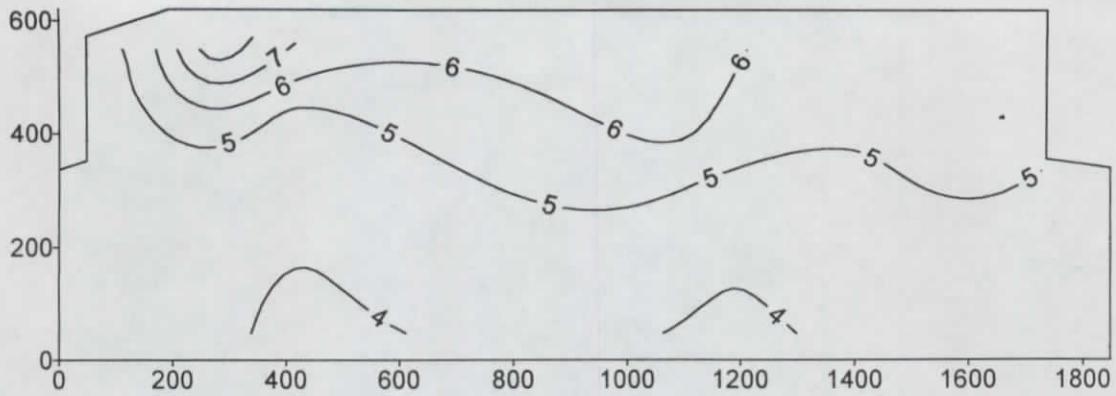


Fig. 23- Répartition spatiale de la salinité de l'horizon de surface du sol (CEe₀₋₂₀ en mS/cm) du périmètre irrigué de Chamsa. Avril 2001.

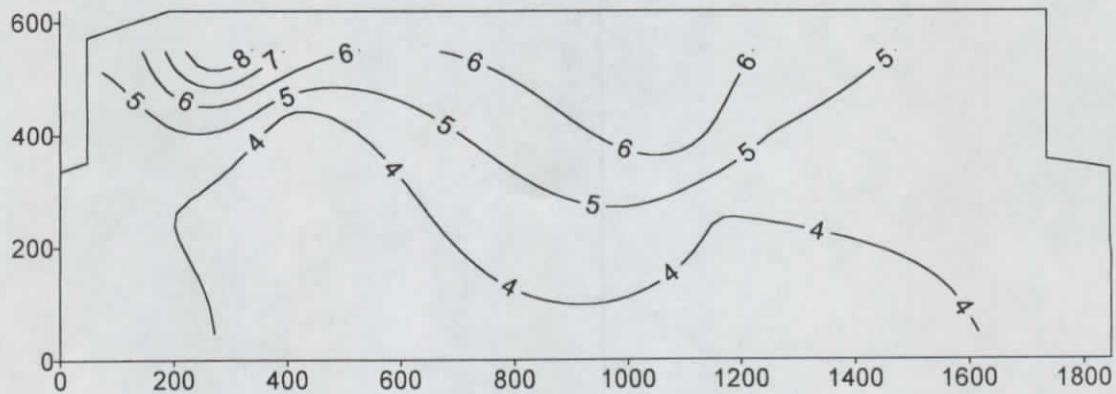


Fig. 24- Répartition spatiale de la salinité de l'horizon 0-40 cm du sol (CEe₀₋₄₀ en mS/cm) du périmètre irrigué de Chamsa. Avril 2001.

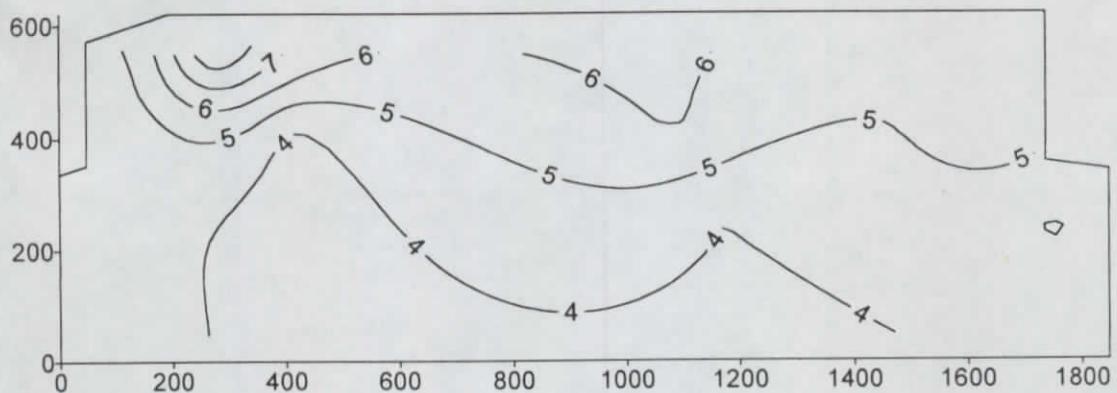
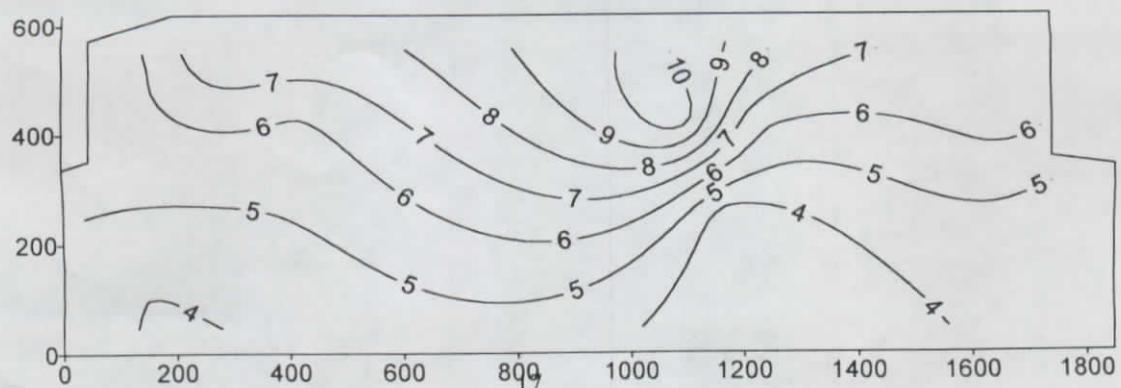
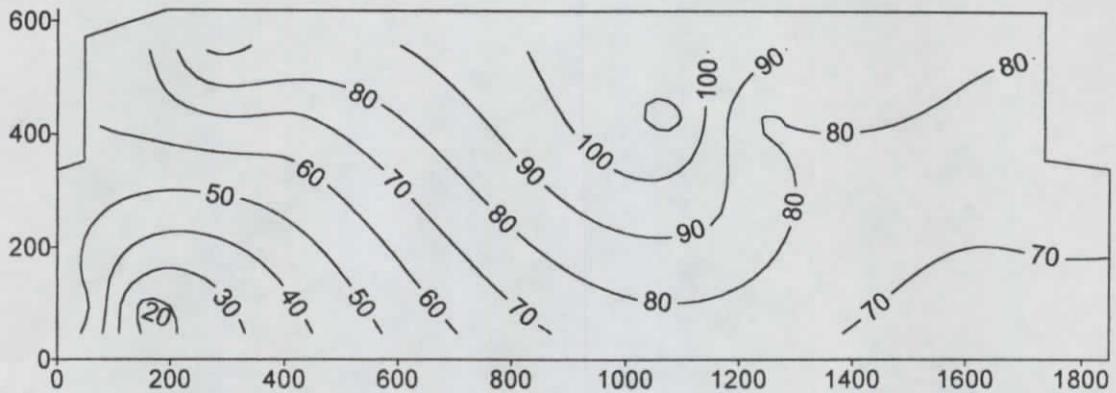


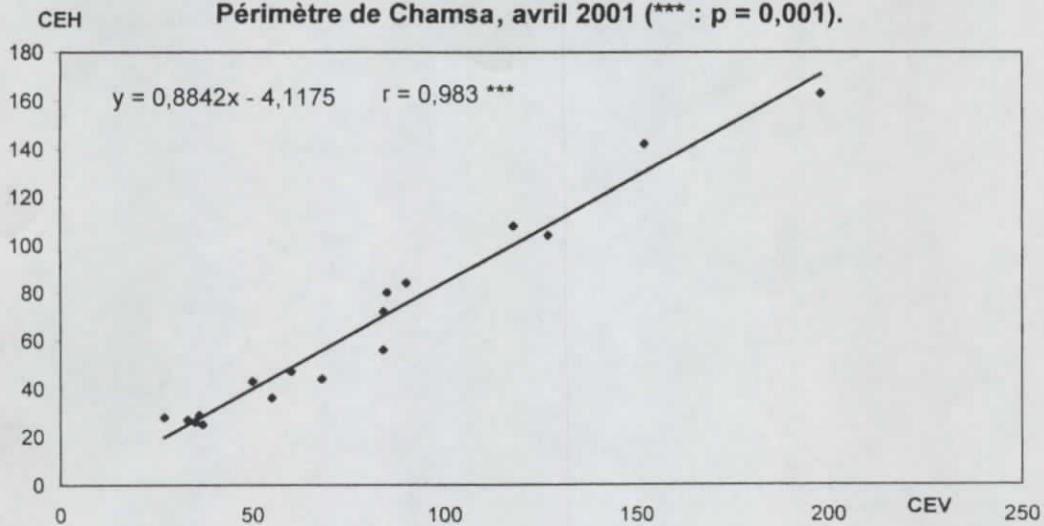
Fig. 25- Répartition spatiale de la salinité de l'horizon 100-120 cm du sol (CEe₁₀₀₋₁₂₀ en mS/cm) du périmètre irrigué de Chamsa. Avril 2001.



**Fig. 26- Répartition spatiale du paramètre CEH corrigée à 15 % d'humidité.
Périmètre irrigué de Chamsa, avril 2001.**



**Fig. 27- Droite de corrélation entre CEH et CEV.
Périmètre de Chamsa, avril 2001 (***) : $p = 0,001$.**



**Fig. 28- Régression entre CEe moyenne (mS/cm) et CEH corrigée
à 15 % d'humidité. Périmètre de Chamsa, avril 2001 (** : $p = 0,01$).**

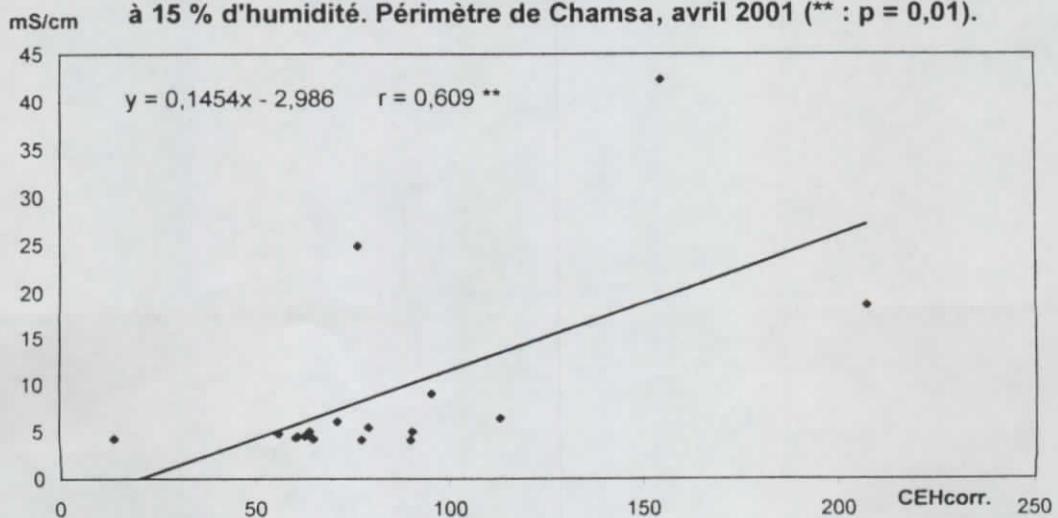


Fig. 29- Régression entre CEe0-20 (mS/cm) et CEH corrigée à 15 % d'humidité. Périmètre de Chamsa, avril 2001 (: p = 0,01).**

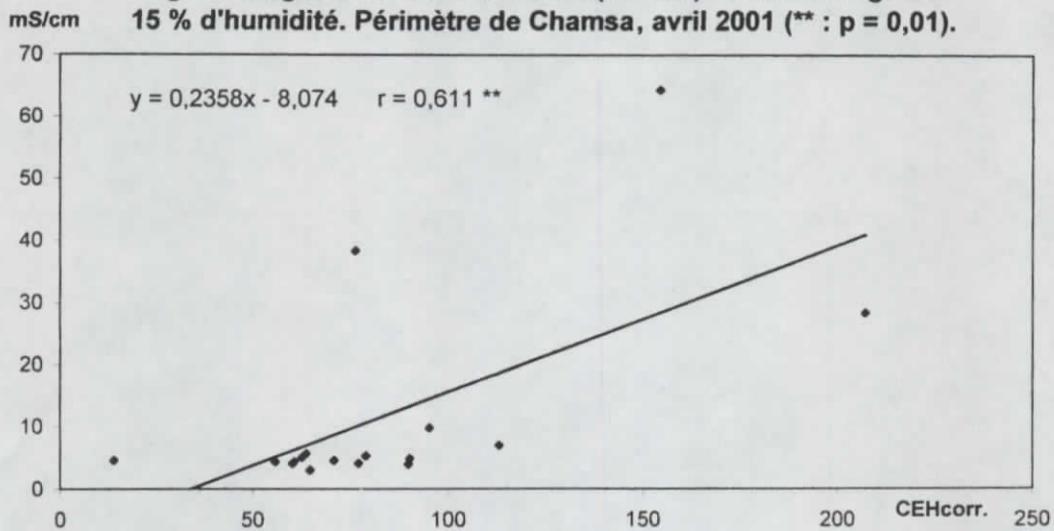


Fig. 30- Régression entre CEe0-40 (mS/cm) et CEH corrigée à 15 % d'humidité. Périmètre de Chamsa, avril 2001 (: p = 0,01).**

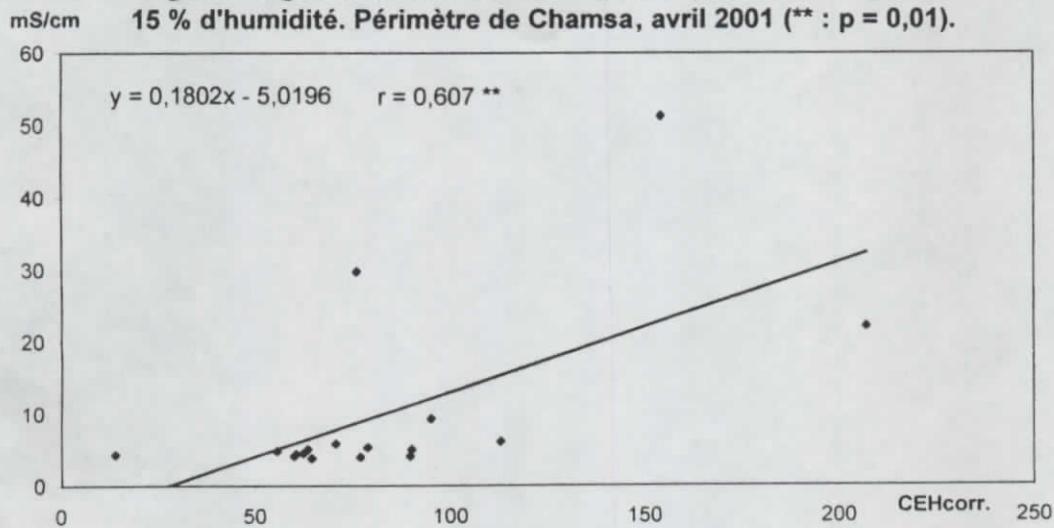
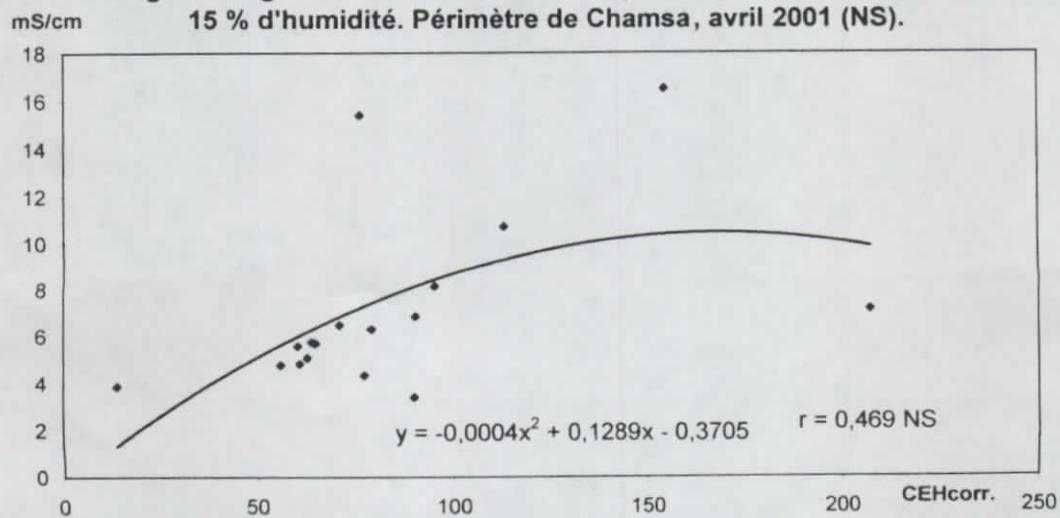


Fig. 31- Régression entre CEe 100-120 (mS/cm) et CEH corrigée à 15 % d'humidité. Périmètre de Chamsa, avril 2001 (NS).



forte en profondeur au cours de cette période et les profils salins seraient descendants dans cette situation. Ceci s'explique par une éventuelle accumulation en profondeur des sels entraînés par les eaux d'irrigation.

On peut tirer comme conclusion que la salinité des sols du périmètre de Chamsa peut quintupler en quelques mois d'intervalle. Elle a très fortement augmenté par rapport à novembre 2000. Une telle situation non stable serait due à la nature du matériau pédologique qui est très poreux et perméable. Il permet, par conséquent, un lessivage rapide des sels durant l'automne, puis une accumulation avec la reprise des activités d'irrigation.

La conductivité électromagnétique représentée par CEHcorr. se répartit d'une manière relativement similaire à celle de CEE moyenne. Ses valeurs varient entre 20 vers l'extrémité sud-ouest et 110 près de la bordure centrale nord du périmètre (fig. 26). La similarité est aussi évidente avec la répartition spatiale des isovalues de CEE₁₀₀₋₁₂₀ malgré la faible participation théorique de cet horizon profond sur les valeurs de CEH. Ceci est confirmé par la corrélation entre CEHcorr. et CEE₁₀₀₋₁₂₀ qui est non significative (fig. 31). Pour les autres paramètres (CEE moyenne, CEE₀₋₂₀ et CEE₀₋₄₀), CEHcorr. présente un lien avec eux du fait que r est significatif au seuil de 0,01 (fig. 28, 29 et 30). L'effet des salinités des horizons de surface sur la conductivité électromagnétique est plus important, selon ces résultats. On doit noter ici que la différence avec les matériaux argileux est apparente puisque la corrélation entre CEH et CEE moyenne est souvent non ou peu significative dans ces types de matériaux très pourvus en colloïdes minéraux portant beaucoup plus de charges électriques (Ben Hassine et Jelassi, 2001). Dans les sols sableux, comme ceux de Chamsa, les seuls éléments conducteurs, seraient les sels solubles. L'émission d'un champ magnétique par l'appareil de mesure CEM induisant la circulation d'un courant électrique dans le sol, est assurée, dans ces conditions, par les éléments chargés ou dissous dans la solution du sol qui sont les sels solubles.

La corrélation entre CEV et CEH, qui sont les mesures de l'appareil CEM en mode vertical et horizontal, est très hautement significative avec $r = 0,983$ (fig. 27). Ceci implique la forte participation de la tranche 0-120 cm dans la détermination des valeurs de CEV, d'une part et de la bonne manipulation de l'appareil d'autre part. Un tel résultat reflète, en plus, l'homogénéité du profil pédologique dans le périmètre de Chamsa.

3-6- Le contrôle de novembre 2001

3-6-1- Le niveau de la nappe

Les isopaques décroissent de l'amont vers l'aval, soit du sud vers le nord. L'eau est à plus de 2 m de profondeur sur presque toute la bordure sud, niveau qui pénètre assez profondément dans le périmètre près de la limite est. Le niveau le plus élevé (<1,2 m) se localise près de la bordure nord avec un décalage vers l'extrémité nord-ouest (fig. 32). Le rabattement de la nappe est très net au cours de cette période, de sorte que l'hydromorphie ne présente pas de danger important pour la production de la palmeraie. Ces observations confirment celles obtenus précédemment et indiquant toujours un rabattement de la nappe au cours de cette période de récolte. Un tel processus serait dû principalement à la cessation de l'irrigation qui n'est pas utile en cette saison.

3-6-2- La salinité des sols

Mesurée par la méthode électromagnétique et par celle de l'extrait de pâte saturée, cette salinité se répartit différemment dans le périmètre. Les courbes d'isovalues de CEM varient entre 40 et 80 et présentent les chiffres les plus faibles près de la bordure sud-ouest (fig. 33). Les valeurs les plus élevées se retranchent près de l'angle nord-est, contrairement

Fig. 32- Carte de la distribution spatiale du niveau (m) de la nappe phrétique dans le périmètre irrigué de Chamsa. Novembre, 2001.

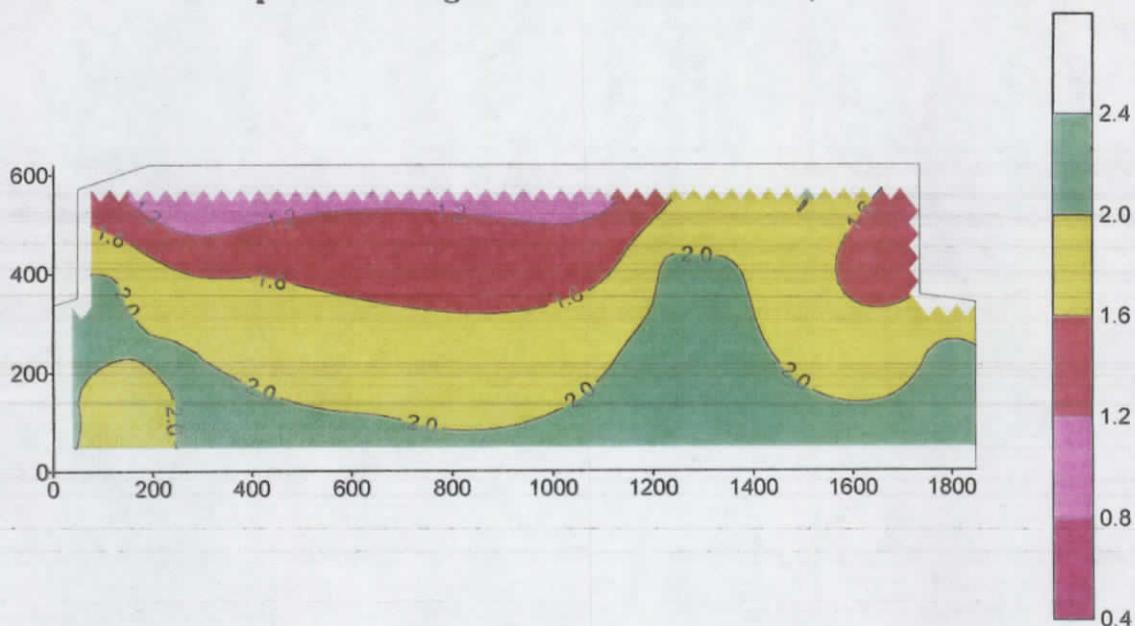


Fig. 33- Répartition spatiale de CEH corrigée à 15 % d'humidité dans le périmètre irrigué de Chamsa. Novembre, 2001.

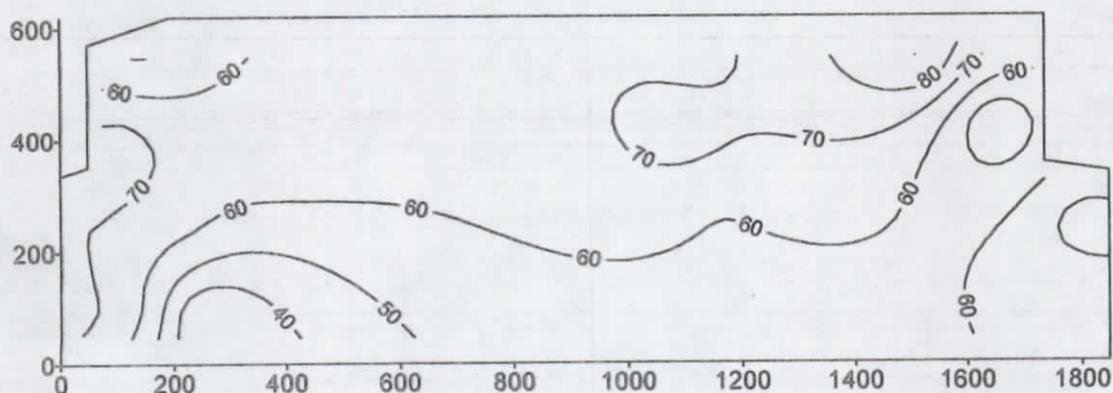


Fig. 34- Régression entre CEHcorr. et profondeur de la nappe (m). Périmètre de Chamsa, novembre 2001 (NS).

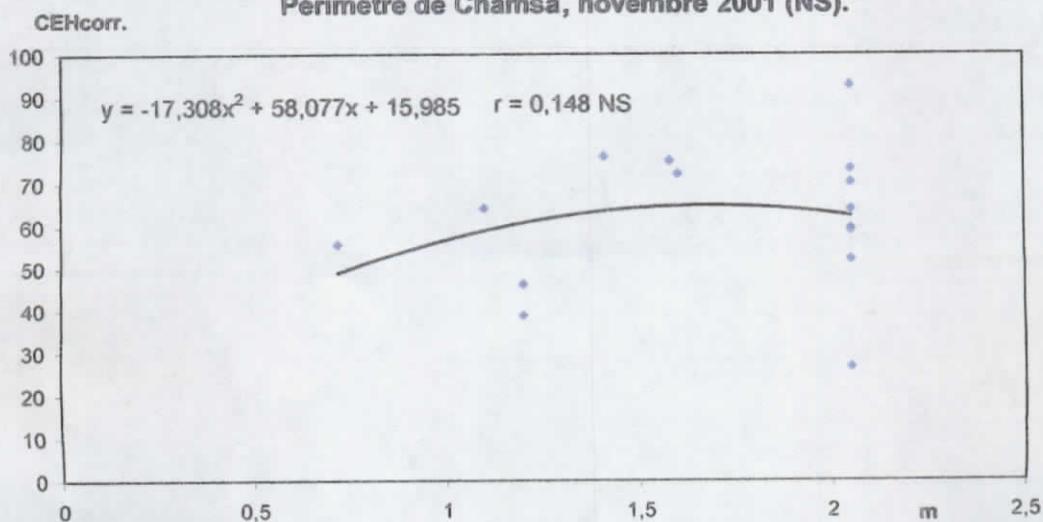


Fig. 35- Répartition spatiale de la salinité moyenne du sol (CE_{emoy} en mS/cm) du périmètre irrigué de Chamsa. Novembre 2001.

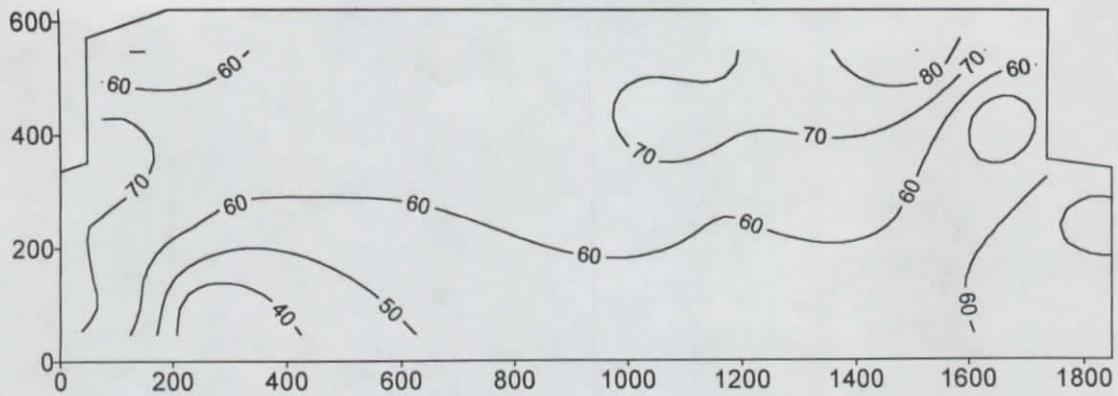


Fig. 36- Répartition spatiale de la salinité de l'horizon de surface du sol (CE_{e0-20} en mS/cm) du périmètre irrigué de Chamsa. Novembre 2001.

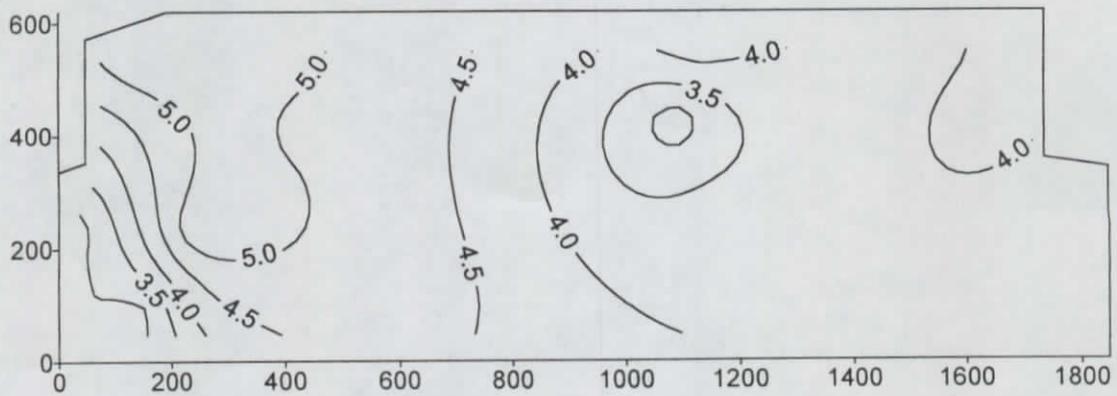


Fig. 37- Répartition spatiale de la salinité de l'horizon 0-40 cm du sol (CE_{e0-40} en mS/cm) du périmètre irrigué de Chamsa. Novembre 2001.

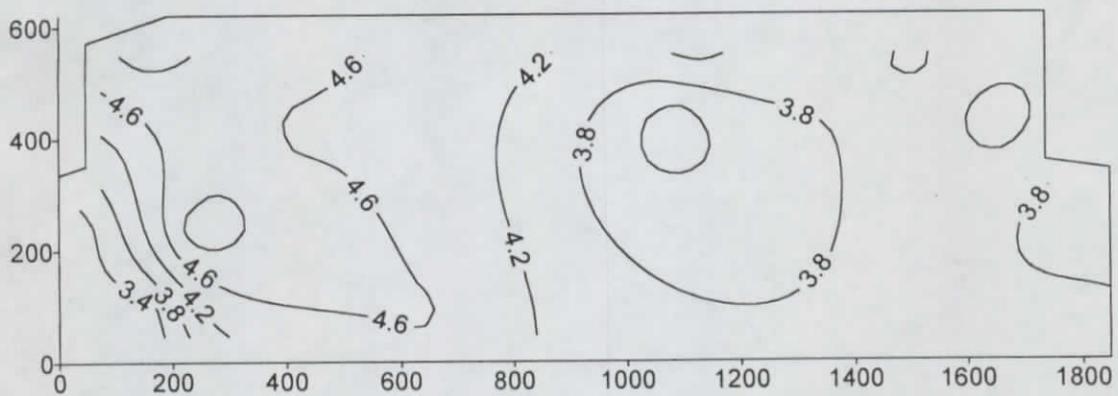


Fig. 38- Répartition spatiale de la salinité de l'horizon 100-120 cm du sol (CE_{e100-120} en mS/cm) du périmètre irrigué de Chamsa. Novembre 2001.

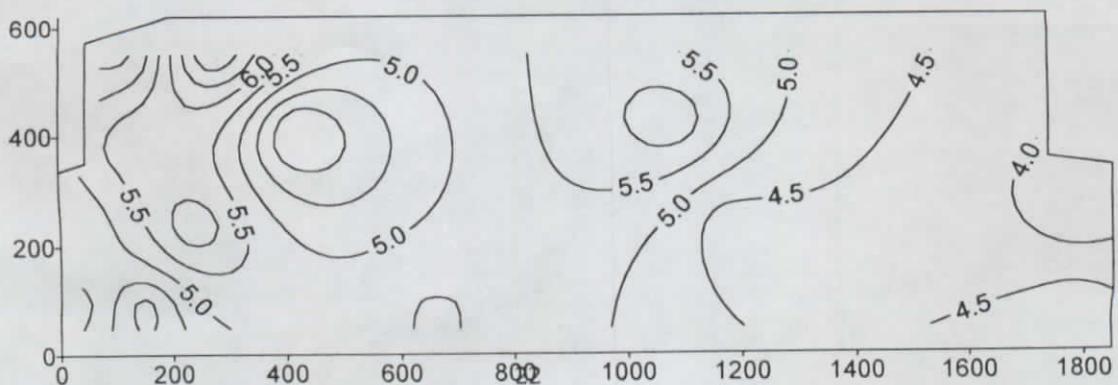


Fig. 39- Régression entre CEHcorr. et CEe moyenne du sol du périmètre de Chamsa. Novembre 2001 (NS).

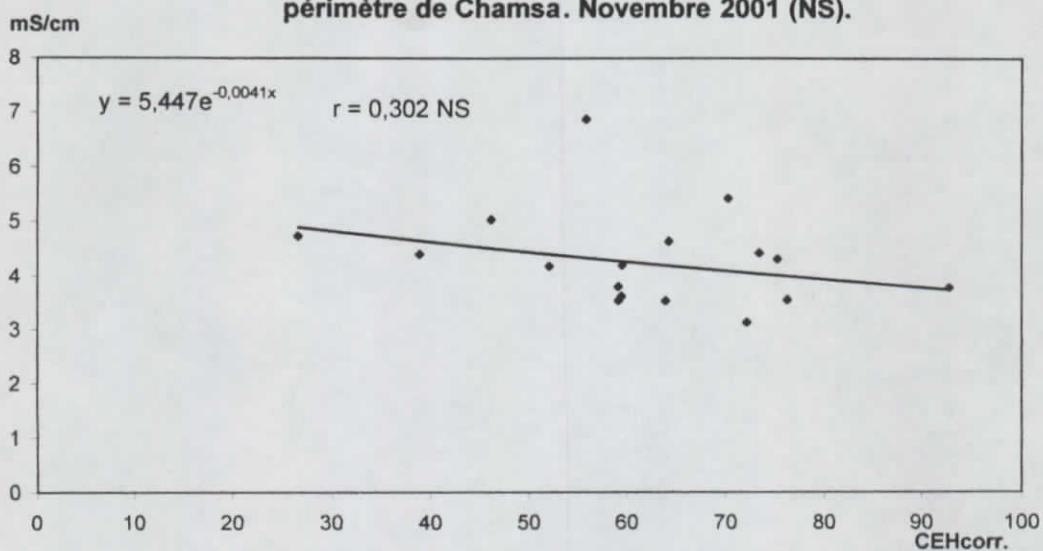


Fig. 40- Régression entre CEHcorr. et CEe0-20 du sol du périmètre de Chamsa. Novembre 2001 (NS).

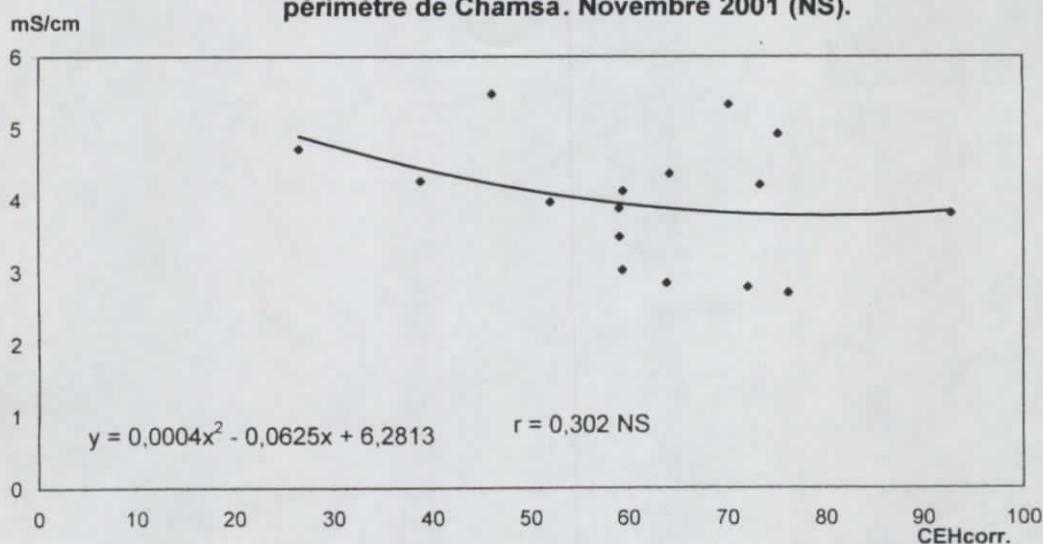
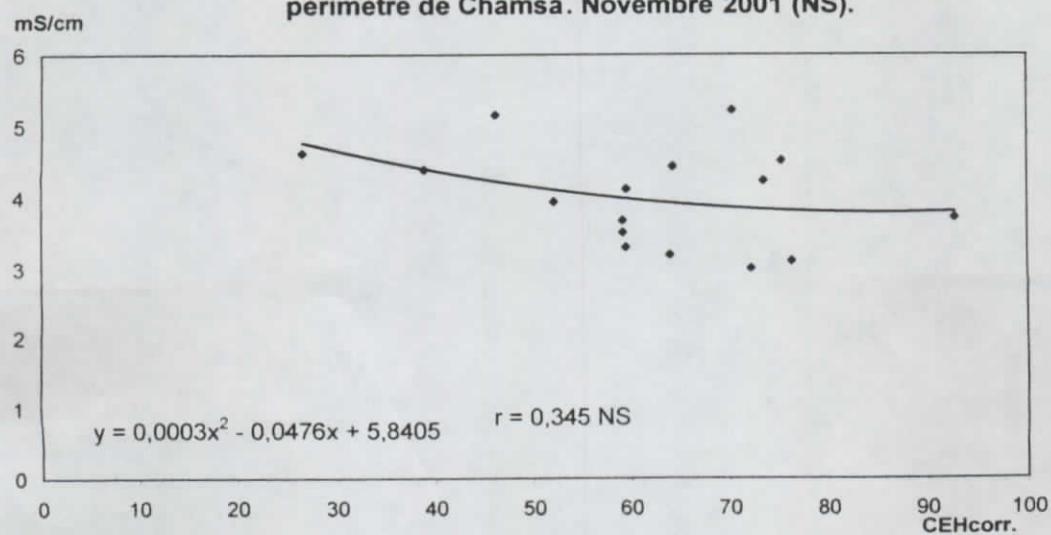


Fig. 41- Régression entre CEHcorr. et CEe0-40 du sol du périmètre de Chamsa. Novembre 2001 (NS).



au niveau de la nappe qui chute dans cette partie du périmètre. La corrélation entre les deux variables est, par conséquent, non significative : le coefficient r est égal à 0,148 (fig. 34). La nappe dont le niveau est presque toujours supérieur à 1,2 m, n'a pas d'effet sur CEH corrigée à 15 % d'humidité, paramètre qui évalue la salinité globale dans les 120 centimètres supérieurs du sol (Job et Maraï, 1991).

La répartition spatiale de CEE moyenne est aussi différente de celle de CEH corr. Les isovaleurs se distribuent entre 4 et 6 mS/cm et celles les plus élevées se localisent près de l'angle nord-ouest du périmètre (fig. 35). C'est cette partie de l'oasis qui semble la plus salée avec des valeurs comprises entre 5 et 6 mS/cm. Elle couvre une surface ne dépassant pas les 10 à 15 hectares. Sur tout le reste de la surface de l'oasis, la salinité est voisine de 4 mS/cm. Une telle répartition a fait que la corrélation avec CEH corr. soit faible et non significative ; le coefficient de régression r n'est égal qu'à 0,302 (fig. 39). La salinité des horizons de surface, 0-20 cm et 0-40 cm, est plus atténuée que celle de la salinité globale (CEE moyenne). La plage la plus salée occupe toujours le même endroit (angle nord-ouest), mais les valeurs de CEE sont proches de 5 et de 4,5 mS/cm respectivement pour les deux tranches de sol (fig. 36 et 37). Dans le reste du périmètre, la salinité a même diminué par rapport à CEE moyenne. Cette dernière serait, par conséquent, augmentée par les salinités des horizons de profondeur. C'est ce qui est, en effet, constaté sur la figure 38 relative à la profondeur 100-120 cm où des valeurs supérieures à 5 mS/cm occupent plus de 60 % de la surface du périmètre et s'étendent sur toute sa partie ouest. Les valeurs les plus élevées se situent toujours près de l'angle nord-ouest. Ainsi, les sels seraient plus abondants en profondeur qu'en surface au cours de cette période et les profils salins doivent être du type descendant. Une telle situation explique le fait que les sels se sont plus déplacés en profondeur à travers le matériau très poreux de l'oasis ; on peut supposer aussi que le rabattement de la nappe n'a pas permis la remontée des sels qui se seraient plus accumulés en profondeur, au dessus de la frange capillaire.

On doit signaler enfin que les corrélations entre CEH corr. d'une part et CEE₀₋₂₀ et CEE₀₋₄₀ d'autre part sont non significatives (fig. 40 et 41). Ces faibles corrélations seraient dues probablement à la précipitation des sels dans un matériau asséché par l'abstention de l'irrigation : dans un état précipité (non ionisé), les sels ne jouent plus le rôle de conducteur de courant. Par ailleurs, la plus importante accumulation des sels en profondeur qu'en surface a probablement influé sur les résultats de ces corrélations : la salinité des couches de profondeur participe faiblement aux valeurs de CEH.

3-6-3- Conclusion

La nappe a subi un rabattement au cours de cette période. La salinité des sols n'est pas très homogène mais ses valeurs se distribuent dans l'intervalle 4-6 mS/cm. La moitié ouest du périmètre, et surtout la zone située près de l'angle nord-ouest, est celle qui présente les plus fortes salinités aussi bien en surface qu'en profondeur. Les sels accumulés par les irrigations estivales n'ont, probablement pas, subi de lixiviation par des eaux douces (pluies). A l'état précipité, ils ne participeraient pas à déterminer les mesures de l'appareil CEM.

3-7- Le contrôle de février 2002

3-7-1- Le niveau et la salinité de la nappe

Comme à chaque période de fin d'hiver, le niveau de la nappe remonte dans le périmètre, en ce mois de février 2002, mais la remontée ne concerne que la partie centrale avec une légère poussée vers l'ouest. C'est sur la bordure nord que le niveau est le plus faible avec moins de 0,4 m (fig. 42). Il descend progressivement en se dirigeant vers le sud.

Fig. 42- Carte de la distribution spatiale du niveau (m) de la nappe phréatique dans le périmètre irrigué de Chamsa. Février 2002.

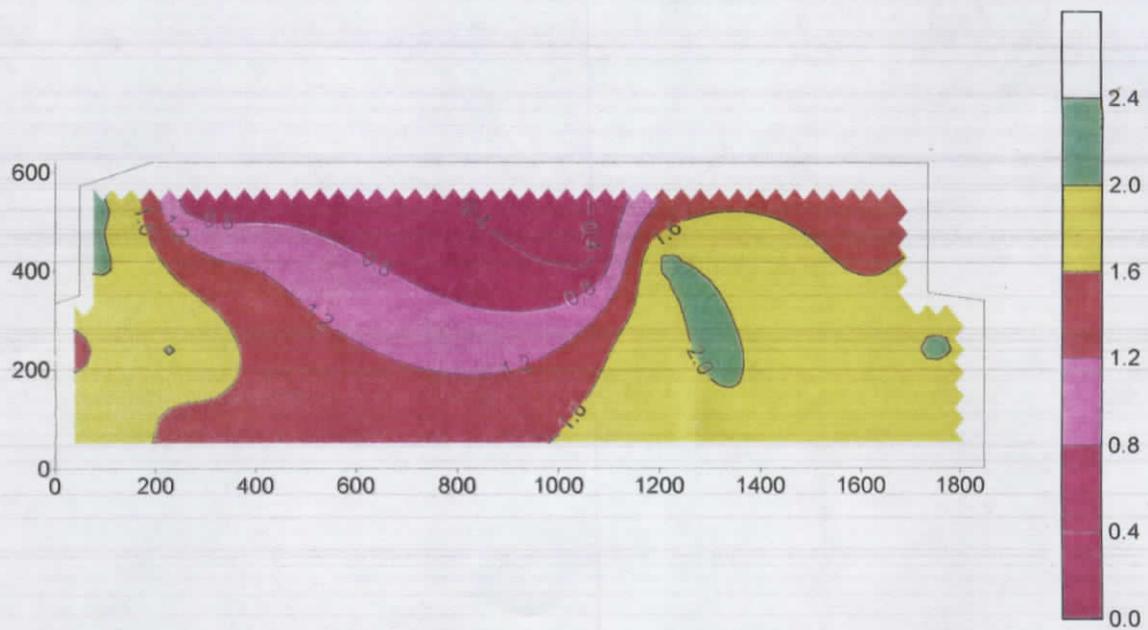


Fig. 43- Représentation en histogrammes de la salinité de l'eau des piézomètres contrôlés. Chamsa, février 2002.

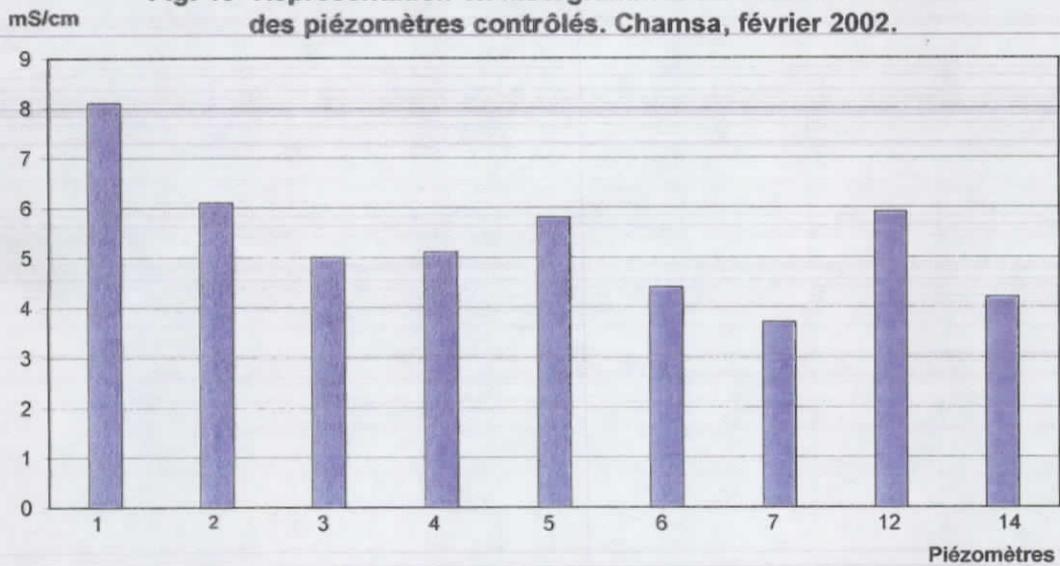
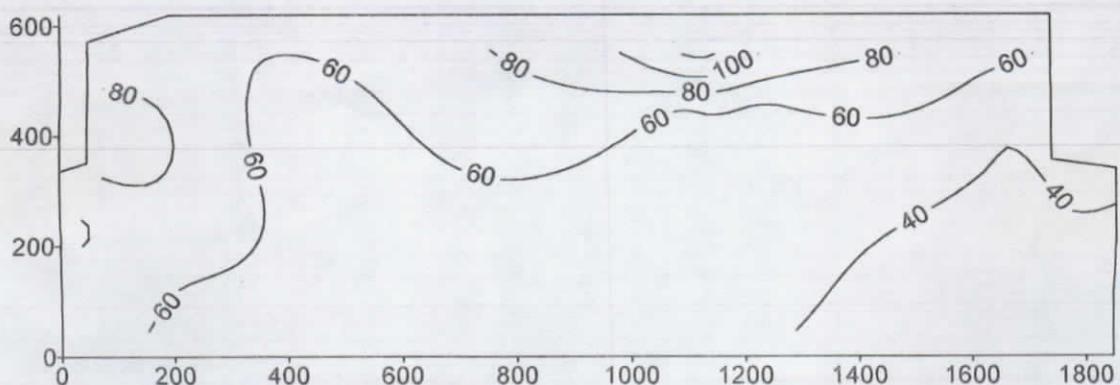


Fig. 44- Répartition spatiale de CEH corrigée à 15 % d'humidité dans le périmètre irrigué de Chamsa. Février, 2002.



Sur les deux flancs oriental et occidental du périmètre, la nappe s'éloigne de la surface et est située au-delà de 1,6 m. L'hydromorphie touche, par conséquent la zone aval du périmètre, où se trouve l'émissaire principal d'évacuation des eaux de drainage (Ben Hassine, 1997). Cette stagnation des eaux dont l'origine est l'irrigation, devrait être due à des difficultés d'écoulement et d'évacuation, malgré la nature sableuse de la couverture pédologique du périmètre.

La salinité des eaux de la nappe varie entre moins de 4 mS/cm et 8 mS/cm (fig. 43). L'eau est la plus salée dans le piézomètre P1 situé près de l'angle nord-est. Elle est la plus douce dans le piézomètre P7 implanté dans le quart nord-ouest du périmètre. L'intervalle dans lequel varient les valeurs de la salinité est presque toujours le même (4-8 ms/cm) peu importe la période de contrôle de l'année. Cette salinité n'est pas très élevée, mais elle est suffisante pour causer une salinisation des sols en se rapprochant de la surface.

3-7-2- La salinité des sols

Elle n'est mesurée qu'au conductivimètre électromagnétique. Les valeurs de CEH corrigée à 15 % d'humidité sont comprises entre 40 et 100 à 120 (fig. 44). Les courbes aux valeurs les plus élevées n'occupent qu'une faible surface située près de la bordure nord-est du périmètre et chevauchant partiellement la zone hydromorphe. Le lien avec la profondeur de la nappe n'est, par conséquent, pas évident. Les valeurs les plus faibles (40 à 60) apparaissent près de l'extrémité sud-est et s'étendent sur les plus larges parties du périmètre. Elles pénètrent profondément vers l'aval dans la direction nord-ouest.

3-7-3-Conclusion

La nappe remonte vers la surface probablement suite à la reprise de l'irrigation par les agriculteurs. Cette remontée n'a touché qu'une partie du périmètre dont les deux flancs sont restés épargnés de l'hydromorphie. Cette remontée n'a pas eu d'effet sur la variation de la salinité des eaux qui gardent toujours le même intervalle 4-8 mS/cm. La salinité des sols mesurée par méthode CEM, n'a apparemment pas de lien avec le niveau de la nappe. Ses valeurs augmentent vers l'aval mais avec un décalage vers l'est par rapport à la zone engorgée.

Conclusion générale

Le périmètre irrigué de Chamsa dont la composition granulométrique des sols est constituée à plus de 90 % de sables, est drainé par un réseau comprenant des tuyaux enterrés et des fossés à ciel ouvert. Sa situation à l'aval d'autres oasis et l'altitude basse de sa moitié septentrionale sont à l'origine de problèmes d'hydromorphie temporaire. Les contrôles effectués entre 1999 et 2002 ont permis de constater les faits suivants :

- Il y a une alternance entre remontée du niveau de la nappe en février-mars-avril et un rabattement en automne. La zone concernée par l'hydromorphie est toujours la bordure nord du périmètre avec un déplacement latéral (est-ouest) des plages "engorgées" suivant les années.
- De tels processus laissent penser que l'hydromorphie est causée par les excès d'eau d'irrigation qui traversent rapidement le matériau sableux et rejoignent la nappe pour contribuer à la remontée de son niveau. En outre, l'évacuation par le réseau de drainage est lente, soit par déficience de ce dernier ou écoulement latéral difficile de la nappe.
- La salinité des eaux de la nappe varie toujours entre 4 et 8 mS/cm. Elle n'a presque jamais quitté cet intervalle de valeurs. Une telle salinité n'est pas très élevée pour le palmier dattier. En conséquence, la récupération des eaux de drainage par système de bêche de reprise serait

utile dans la mesure où elle permettrait une seconde réutilisation de ces eaux pour l'irrigation.

- La salinité des sols mesurée sur des extraits de pâte saturée n'est pas stable. Elle est généralement comprise entre 4 et 6 mS/cm sauf en novembre 2000 où elle a été beaucoup plus faible. Les zones les plus salées sont toujours situées dans la partie aval qui est la plus touchée par l'hydromorphie. La nappe contribuerait par conséquent, à la salinisation des sols lorsqu'elle se rapproche de la surface. Cette salinisation n'est pas définitive ou permanente : en raison de la texture sableuse des sols, des lixiviations de sels vers la profondeur peuvent se produire rapidement.

- Le lien entre la conductivité électromagnétique et les mesures sur des extraits de pâte saturée n'est pas toujours confirmé. En l'absence de colloïdes minéraux ou organiques qui peuvent perturber la relation, c'est l'état d'humidité du sol qui doit intervenir dans l'obtention des fortes ou des faibles corrélations. A l'état frais ou humide, les sels sont dissous et peuvent contribuer à mieux conduire les flux de courant induit par les champs magnétiques émis et reçus par l'appareil CEM.

Enfin, on doit retenir que le phénomène d'hydromorphie est temporaire dans l'oasis de Chamsa. Il peut générer une salinisation des sols qui reste temporaire à son tour et peu dangereuse. Cependant, pour mieux accroître la productivité des sols de cette oasis, des mesures et des techniques d'amélioration de l'évacuation des eaux de drainage sont utiles.

Bibliographie

- Ben Hassine (H.), 1997. Compte-rendu d'une tournée dans les gouvernorats de Tozeur et Kébili, du 06 au 08/01/1997. Direction des Sols, Ministère de l'agriculture, 6 pages et 7 cartes.
- Ben Hasisne (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, 23 pages.
- Ben Hassine (H.), Zidi (C.), Harrathi (J.) et Bouagil (C.), 1998. Résultats des opérations de suivi de l'évolution du niveau de la nappe et de la salinité des sols dans l'oasis de Chamsa (Gouvernorat de Tozeur). Rapport technique, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, 11 pages.
- Durand (J.H.), 1970. L'excès d'eau et ses conséquences sur le rendement des cultures. Etude bibliographique, Division des Sols, DRES, Ministère de l'Agriculture, 71 pages.
- El Fekih (M.), 1967. Etude pédologique du Djerid (de Tozeur à Nefta). Etude n° 389, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, une carte d'aptitudes des sols et un tableau.
- Job (J.O.) et Maraï (M.), 1991. Origine et gestion des sols salés de l'oasis d'El Guettar. Document technique, Direction des Sols-ORSTOM, 64 pages.
- Ollat (C.), 1973. Observations concernant l'évolution de la salinité de divers sols de Tunisie, irrigués à l'eau salée. Projet PNUD/FAO, TUN 70/529. Document de travail, laboratoire de chimie du sol, centre de Recherche du Génie Rural, 63 pages.
- Vieillefon (J.), 1976. Inventaire critique des sols gypseux en Tunisie. Etude préliminaire. ES 98, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, 80 pages.