

Calcul des doses d'irrigation pour les sols salés

Application d'une méthode géochimique de calcul à un sol tunisien

V. VALLES, F. BOURGEAT, M. GUIRESSE

Laboratoire de Pédologie/Aménagement E.N.S.A.T., 145, av. de Muret, 31076 Toulouse Cédex

RÉSUMÉ

En zone aride et semi-aride, l'irrigation des sols salés nécessite un apport d'eau supérieur au besoin des cultures. Ce volume excédentaire lessive les sels et les repousse en profondeur. La méthode de prévision du volume de lessivage habituellement utilisée (méthode classique, recommandée par la FAO) néglige la précipitation de minéraux à partir de la solution du sol. Une méthode, dite géochimique, prenant en compte ces phénomènes par le biais d'un modèle thermodynamique, a été proposée dans un article précédent.

L'application de ces deux méthodes, pour déterminer la dose de lessivage sur des plots d'expérimentation irrigués avec des eaux de salure différentes à la station de Cherfech en Tunisie, permet de comparer leur validité. Si l'on ne tient pas compte des phénomènes de dissolution et précipitation des minéraux, les doses prévues sont différentes de celles réellement appliquées. La prise en compte de ces phénomènes s'avère par contre intéressante et donne des résultats plus satisfaisants.

MOTS-CLÉS : Sel — Irrigation — Doses de lessivage — Tunisie — Comparaison de méthodes.

ABSTRACT

CALCULATION OF IRRIGATION WATER QUANTITY IN THE CASE OF SALINE SOILS.
APPLICATION OF A ESTIMATION BY A GEOCHEMICAL METHOD TO A TUNISIAN SOIL

In aride regions, the irrigation of saline soils requires more water that is necessary solely for crop growth. This excess leaches the salts and washes them into lower soil layers. The method normally used to predict leaching volume (conventional method, recommended by FAO) does not account for the precipitation of minerals from the soil solution. A « geochemical » method in which a thermodynamic model was used to take these phenomena into consideration was described in a previous paper.

The relative validities of these two methods were compared at the Cherfech research station in Tunisia, where both methods were applied to determine the leaching quantity to be used on experimental plots irrigated with water of varying salinities. If the phenomena of dissolution and precipitation of minerals are not allowed for, the predicted leaching quantities will differ from those actually applied. On the other hand, satisfactory results are generally obtained when these phenomena are taken into account.

KEY WORDS : Salt — Irrigation — Leaching quantities — Tunisia — Comparison of methods.

INTRODUCTION ET OBJECTIFS

La mise en valeur des sols salsodiques se heurte à trois types de problèmes. On peut noter une difficulté

d'absorption de l'eau qui est liée à la pression osmotique des solutions riches en sels dissous ; il peut y avoir aussi dégradation des propriétés physiques du sol due à la fixation du sodium sur le complexe ; enfin des

problèmes de toxicité des sels sont susceptibles d'apparaître. Les cultures pâtissent d'un excès de sels ou de sodium échangeable. Cependant les conséquences sur l'état végétatif dépendent de la qualité des eaux d'irrigation, de la tolérance des végétaux et de la conduite des irrigations.

Dans le cas de sols sodiques salés de Tunisie, les propriétés physiques sont relativement satisfaisantes et un apport d'eau supérieur au besoin des cultures permet l'entraînement des sels en profondeur ; on s'affranchit ainsi des contraintes liées à une salinité excessive. Nous nous proposons dans cette note de nous intéresser au calcul des doses de lessivage qui sont compatibles avec les exigences culturales et le maintien de la fertilité des sols. La méthode restée classique pour cette évaluation ne tient pas compte de la précipitation des minéraux. Employée en Syrie (vallée de l'Euphrate) et au Tchad (vallée du Chari), elle donne des résultats qui surestiment les risques de salinité et les doses d'eau nécessaires à l'entraînement des sels, mais sous-estime les risques d'alcalisation (VALLES *et al.* 1982, VALLES *et al.* 1989). C'est pourquoi nous proposons une méthode, dite géochimique, qui paraît mieux adaptée à la conduite des irrigations car elle tient compte de l'appauvrissement de la solution du sol qui résulte de la précipitation de minéraux au cours de l'évaporation. A partir de certains résultats obtenus sur les essais réalisés par le CRUESI (Centre de Recherches sur l'Utilisation de l'Eau Salée en Irrigation), à la station de Cherfech près de l'oued Mejerdah (Tunisie), nous aurons la possibilité de comparer les deux méthodes et de les tester.

1. LE CALCUL DE LA FRACTION DE LESSIVAGE

On appelle fraction de lessivage (FL) le rapport entre le volume Vd d'eau qui draine à la base du profil et le volume d'eau apporté par les pluies ou l'irrigation (Vi)

$$FL = \frac{Vd}{Vi}$$

Dans les conditions de culture, l'eau évapotranspirée ou ETR est égale à Vi - Vd d'où :

$$FL = \frac{Vi - ETR}{Vi}$$

Initialement, la fraction de lessivage a été définie pour un calcul à long terme. Cependant, des travaux plus récents (BRESLER et HOFFMAN 1986) l'utilisent sur la durée d'une seule campagne. De même, les variations spatiales de la salinité, liées à l'hétérogénéité des apports d'eau sur la parcelle (MIYAMOTO et CRUZ 1986 et 1987) ne peuvent être prises en compte par la notion de F.L.

Le concept de fraction lessivante ainsi défini pose comme condition que l'eau drainée en dehors du profil

soit en équilibre avec le sol : ce n'est qu'une fois cette condition réalisée que les formules qui font intervenir les conductivités électriques peuvent être développées.

1.1. Le calcul de la dose de lessivage par la méthode classique

Connaissant la conductivité de l'eau d'irrigation CE_i, et la conductivité électrique moyenne de l'extrait de pâte saturée que l'on ne veut pas dépasser sur le profil racinaire CE_{esm}, il est possible d'établir une relation reliant CE_{esm} et CE_i à la fraction de lessivage (RHOADES 1974). Pour cela il est fait un certain nombre d'hypothèses :

- l'extrait à saturation et l'eau d'irrigation ont la même composition en surface ;
- le régime permanent est atteint et la salinité ne varie plus d'une année sur l'autre ;
- les conductivités sont proportionnelles aux concentrations ;
- la conductivité de l'extrait de pâte saturée est supposée égale à la moitié de celle de la solution du sol à la capacité au champ ;
- la profondeur utile du sol est divisée en quatre quarts et l'on suppose que 40 % de l'eau évapotranspirée provient du premier quart, 30 % du second, 20 % du troisième et 10 % du dernier.
- l'eau d'irrigation ne dissout aucun minéral et ne participe à aucune précipitation.

A la base du premier quart 40 % de l'ETR ont été prélevés. Au cours de l'irrigation le volume de la solution qui atteint le 2^e quart est :

$$0,6 \text{ ETR} + Vd \text{ soit } 0,6 (Vi - Vd) + Vd \\ \text{ou } 0,6 Vi + 0,4 Vd$$

Par rapport à l'eau apportée l'eau qui s'écoule dans cette première partie du sol a subi un facteur de concentration de $\frac{Vi}{0,6 Vi + 0,4 Vd}$ soit $\frac{1}{0,6 + 0,4 FL}$

A la base du second quart le volume qui atteint le 3^e quart est : 0,7 Vi + 0,3 Vd le facteur de concentration est : $\frac{1}{0,7 + 0,3 FL}$

Le volume qui atteint le 4^e quart est 0,9 Vi + 0,3 Vd, l'eau facteur de concentration est de $\frac{1}{0,9 + 0,1 FL}$

Le volume qui sort du profil racinaire est bien entendu Vd et le facteur de concentration par rapport à l'eau d'irrigation est de 1/FL

Prenant en compte l'ensemble de ces considérations et hypothèses, RHOADES (1974) a pu établir la formule suivante qui permet de déduire la dose de lessivage qui doit être appliquée :

$$\frac{CE_{esm}}{CE_i} = \left(\frac{1}{10 FL} + \frac{1}{0,1 + 0,9FL} + \frac{1}{0,3 + 0,7FL} + \frac{1}{0,6 + 0,4FL} + 1 \right) \quad (1)$$

RHOADES a proposé une formule approchée plus simple :

$$FL = \frac{CE_i}{5 CE_{esm} - CE_i} \quad (2)$$

Il a été montré (VALLES *et al.* 1979) que le calcul de la FL, en fonction du rapport $\frac{CE_{esm}}{CE_i}$ était pra-

tiquement indépendant de la formule utilisée dans le domaine où la fraction de lessivage est communément utilisée : c'est-à-dire $0,1 < FL < 0,3$.

Dans la pratique on se fixe, à partir des tables de tolérance aux sels qui ont été établies pour diverses cultures, la valeur de CE_{esm} qu'il convient de ne pas dépasser pour avoir une baisse de rendement qui se situe à un seuil choisi (0, 10, 25, 50 pour cent). En général on estime que l'on ne maîtrise pas entièrement les facteurs de la production autres que la salinité et l'on admet que les effets de celle-ci ne se feront pas sentir tant que la chute prévisible des rendements reste inférieure à 10 %. Connaissant CE_{esm} , on calcule donc FL à partir des formules (1) ou (2).

1.2. Le calcul de la dose de lessivage par la méthode géochimique

La méthode géochimique se distingue de la méthode classique par la prise en compte de la précipitation et de la dissolution des minéraux ; les autres hypothèses sont communes aux deux méthodes.

Le calcul de cette interaction minéraux-solution du sol est basé sur la prise en compte d'un grand nombre de réactions chimiques et nécessite l'emploi d'un calculateur. FRITZ (1981) présente un répertoire des différents types de modèles thermodynamiques. Certains d'entre eux sont capables de simuler l'évolution de la composition chimique d'une solution, et donc de sa salure, lors de sa concentration par évaporation (FRITZ 1975, 1981, DROUBI *et al.*, 1976a et b, PERRET 1982). L'état d'avancement de la réduction du volume est estimé en fonction du facteur de concentration (F.C.) qui n'est autre que le rapport entre le volume initial de la solution et le volume après concentration.

Ainsi, si l'on se réfère à l'hypothèse de la répartition de l'E.T.R. sur les quatre parties de couches utiles du sol, il est possible d'estimer la salure aux différentes profondeurs :

— en surface du sol, l'eau d'irrigation se transforme en solution du sol par mise en équilibre avec les minéraux, mais sans se concentrer ($FC = 1$).

A la base du premier quart, le facteur de concentration des solutions en ce point est $FC = Vi/(0,6 Vi + 0,4 Vd)$ soit $1/(0,6 + 0,4 FL)$. A partir de ce facteur de concentration, il est possible d'estimer la salure de la solution du sol grâce au modèle thermodynamique. On opère de la même façon pour les tranches de sol suivantes sachant que :

— A la base du second quart, le facteur de concentration des solutions est $FC = 1/(0,7 + 0,3 FL)$

— A la base du troisième quart, $FC = 1/(0,9 + 0,1FL)$.

— A la base de la couche utile du sol $FC = \frac{1}{FL}$

Connaissant la salure de la solution du sol sur les cinq niveaux de la couche utile du sol, on détermine la valeur moyenne sur le profil. La conductivité moyenne de l'extrait de pâte saturée est égale à la moitié de la conductivité moyenne de la solution du sol.

2. L'ESSAI DE CHERFECH ET LA COMPARAISON DES DEUX MÉTHODES D'ESTIMATION DE LA FL

Dans le cadre des expérimentations mises en place par le CRUESI à la Station de Cherfech dans la basse vallée de Medjerdah (Tunisie), nous disposons d'un essai qualité des eaux qui a été suivi pendant 4 ans par des chercheurs de l'UNESCO, des chercheurs tunisiens ainsi que des coopérants français. Nous avons la possibilité, à partir des résultats relevés sur cet essai, de comparer et de tester les deux méthodes de calcul de la FL que nous avons exposées.

2.1. Présentation des essais de Cherfech

Les essais mis en place à Cherfech avaient pour but de « déterminer la sensibilité de diverses cultures et de proposer des méthodes de production économiquement intéressantes et agrologiquement correctes ». Il est apparu, en particulier, nécessaire d'étudier le maintien de la salinité à un niveau acceptable et de tester la réaction de différentes cultures à la salure et à l'apport d'eau.

Les sols de la station correspondent à des sols peu évolués à hydromorphie de profondeur qui sont dérivés d'alluvions récentes. Le calcaire total atteint 45 % et le gypse n'est présent qu'à l'état de trace. Le taux d'argile est plus élevé en surface où il se situe aux environs de 45 % ; en profondeur il peut descendre jusqu'à 25 %. Le pH légèrement basique se situe aux environs de 7,8.

La station météorologique mise en place sur ces essais a permis de mesurer les différentes composantes du

climat, notamment la température, l'évaporation et la hauteur des précipitations. L'évaporation d'une surface d'eau libre a été mesurée à l'aide de 2 bacs : l'un situé sur le sol, l'autre dans le sol ; un évaporomètre a été également installé. La consommation d'eau des cultures a été mesurée en plein champ sur lysimètre et elle a été estimée à partir de l'ETP.

Nous nous intéresserons ici plus spécialement à l'essai qualité des eaux qui a été suivi de 1965 à 1968. Quatre qualités d'eau, dont la composition chimique est reportée dans le tableau I et la conductivité électrique

dans le tableau II, ont été testées sur quatre soles occupées par des cultures différentes et ceci avec quatre répétitions. Ces quatre qualités d'eau (A, B, C, D) ont été expérimentées sur quatre groupes de parcelles où se sont succédées les mêmes rotations. On y a pratiqué les mêmes régimes d'irrigation et appliqué les mêmes techniques culturales. Les apports d'eau par irrigation atteignent, en moyenne, 1000 mm, auxquels s'ajoutent les précipitations (400 mm) qui se produisent essentiellement en hiver.

BAHRI (1982) et VALLES (1985), à partir des mesures

TABLEAU I
Composition chimique des quatre eaux utilisées sur l'essai « qualité des eaux » (d'après UNESCO 1970)

mmole/l	K	Na	Ca	Mg	Cl	SO ₄	HCO ₃
A	0.10	0.80	0.75	0.20	1.10	0.35	1.10
B	0.10	13.00	3.30	1.55	12.90	4.00	1.80
C	0.20	22.90	5.60	2.75	23.10	7.15	2.30
D	2.60	30.80	8.15	4.45	33.10	10.55	2.70

faites au champ et du calcul de l'ETR, ont estimé que la fraction de lessivage qui avait été apportée sur cet essai était comprise entre 10 et 13 %.

A partir des analyses d'eau d'irrigation et de la fraction de lessivage qui a été appliquée, on peut estimer la conductivité moyenne de l'extrait de pâte saturée du sol entre 0 et 80 cm. Les calculs peuvent être effectués en ne tenant pas compte de la précipitation des sels (méthode classique) ou en prenant en compte ces phénomènes (méthode géochimique). La conductivité de l'extrait de pâte saturée ayant été mesurée aux différents niveaux du sol, après 4 ans d'expérimentation, nous avons ainsi la possibilité de comparer ces deux types d'approches, de vérifier leur validité et leur précision.

Pour bien comprendre le problème abordé il est utile de préciser que les méthodes que nous proposons de tester sont généralement utilisées pour prévoir les doses d'irrigation à partir de la qualité de l'eau utilisée et de la tolérance des cultures, alors que dans le cas présent on les utilise à l'inverse. On connaît les doses d'irrigation, la composition de l'eau apportée et la fraction de lessivage ; c'est à partir de ces données que l'on calcule la salinité des sols pour la comparer aux valeurs réellement mesurées.

Il est apparu raisonnable de considérer la conductivité moyenne de l'extrait de pâte saturée dans la couche de sol de 0 à 80 cm ; car les racines s'y cantonnent et l'étude des profils hydriques avait montré que l'humidité restait pratiquement constante en-dessous de 80 cm.

Pour les estimations faites à partir des 2 méthodes précitées, l'hypothèse d'une participation à l'alimentation hydrique des quatre tranches de sol telle qu'elle a été formulée au paragraphe 1.1. sera maintenue. On considérera également que la conductivité de l'extrait de pâte saturée est égale à la moitié de celle de la solution du sol lorsque celui-ci est à la capacité au champ.

2.2. Estimation de la conductivité du sol par la méthode géochimique

La comparaison de la solution du sol est suivie grâce au modèle de simulation « GYPSOL » (VALLES 1985). L'estimation de la conductivité électrique des solutions à partir de leur résidu sec, s'obtient en utilisant la corrélation établie par VALLES 1985 pour les eaux naturelles de la basse vallée de l'oued Medjerdah :

$$RS = 0,230 + 0,658 CE$$

(CE étant la conductivité électrique en mmho/cm et RS résidu sec en g/l)

La démarche adoptée pour le calcul est celle qui a été présentée précédemment. Les résultats obtenus pour FL = 10 % et FL = 13 % ont été reportés dans le tableau II.

2.3. Calcul de la salinité des sols par la méthode classique

Si l'on admet l'absence de précipitation dans le profil, la conductivité moyenne de l'extrait de pâte saturée du sol peut être estimée à partir de la formule (1). Il n'est pas tenu compte d'échanges d'ions avec les argiles car on suppose qu'au bout de quelques années, il

s'établit un équilibre entre le sol et les eaux apportées. De plus, l'échange d'ions ne modifie pas la quantité totale dissoute.

Les résultats correspondants à 2 niveaux de FL (10 et 13 %) sont reportés dans le tableau II et représentés sur la figure 1.

TABLEAU II
Estimation de la conductivité moyenne de l'extrait de pâte

Qualité de l'eau (1)	CE _i mmho/cm	Méthode classique		Méthode géochimique		CE _{esm} mesurée
		CE _{esm} FL = 10 %	CE _{esm} FL = 13 %	CE _{esm} FL = 10 %	CE _{esm} FL = 13 %	
A	0,3	0,63	0,51	0,65	0,57	2,15
B	2,0	4,2	3,4	3,96	3,53	4,00
C	3,5	7,35	5,95	5,39	5,07	4,90
D	5,2	10,92	8,84	6,98	6,12	6,35

2.4. La conductivité mesurée des sols

Après 4 ans d'expérimentation, il a été fait des mesures de la conductivité de l'extrait de pâte saturée sur des échantillons de sol prélevés entre 0 et 20 cm, 20 et 40 cm, 40 et 60 cm et 60 et 80 cm. Ces mesures ont été faites au printemps et à l'automne et il est apparu judicieux d'en retenir la valeur moyenne.

De nombreuses formules ont été proposées pour déterminer la conductivité moyenne de l'extrait de pâte saturée dans la zone explorée par les racines.

A Cherfech la formule suivante a été retenue :

$$CE_{esm} = 1/4 (2CE_{0-20} + 1CE_{20-40} + 1CE_{40-80}) \quad (3)$$

Cette formule fait intervenir de façon différente les tranches de sol car elle affecte d'un facteur 2 la conductivité de l'horizon de surface. Ceci se justifie par le rôle déterminant de cette couche au moment de la germination et durant les premiers stades végétatifs de la plante ; de plus, cet horizon participe très largement à l'alimentation hydrique des cultures, en sol irrigué.

Le choix de ce mode de pondération ne devrait d'ailleurs pas poser de problème puisqu'il a été montré (UNESCO 1970) qu'en effectuant les calculs à partir de différentes formules, les résultats restent très proches compte tenu que dans les sols tunisiens la salinité varie peu entre 0 et 80 cm. Les résultats des mesures sont reportés dans le tableau II et représentés sur la figure 1.

2.5. Discussion des résultats

Lorsqu'on irrigue avec une eau à très faible conductivité de type A, la salure moyenne du profil (exprimée par les conductivités de l'extrait de pâte saturée) calculée par les 2 méthodes décrites s'éloigne fortement des mesures faites sur les échantillons de sol.

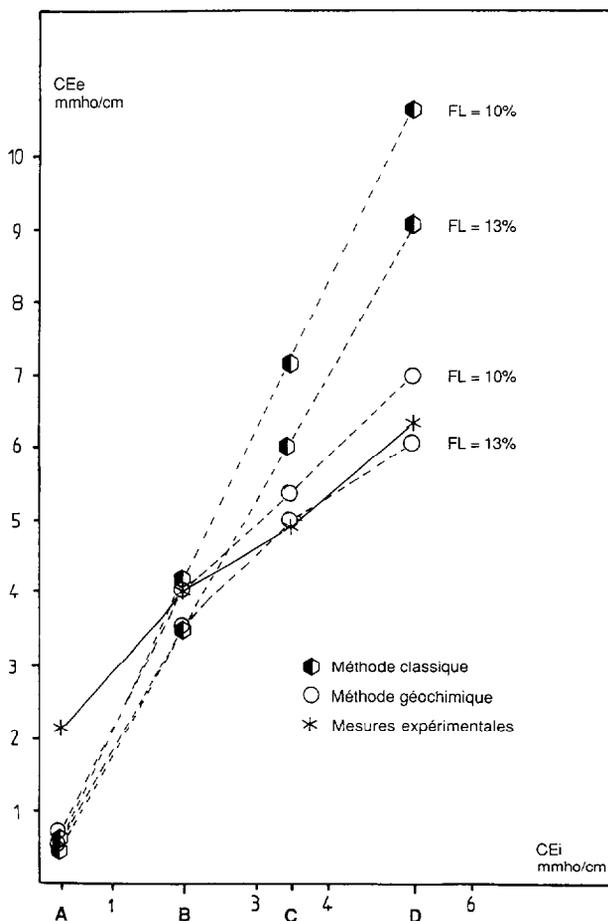


FIG. 1. — Conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée moyenne sur le profil en fonction de celle de l'eau d'irrigation. Comparaison entre les valeurs expérimentales et les estimations par les méthodes classique et géochimique

Ce résultat peut s'expliquer par le fait que les eaux B, C, D, sont des eaux qui proviennent de prélèvements effectués dans la basse vallée de l'oued Medjerdah (eau de nappe, d'irrigation ou de mélange) ; leur composition est le reflet d'un certain équilibre avec le sol. Au contraire l'eau A prise au niveau d'un barrage situé bien en amont a une composition très différente. Il est donc tout à fait normal de supposer que l'équilibre entre le sol et les eaux de qualité B, C, D sera plus rapide à réaliser qu'avec l'eau A. Ce dernier équilibre ne serait pas atteint au bout des quatre années d'expérimentation. DAOUD (1983) a d'ailleurs montré que l'équilibre à la base d'un profil pouvait nécessiter un temps assez long.

Il convient cependant de faire remarquer que ce résultat est relatif à l'utilisation d'une eau très douce, ce qui ne se produit qu'assez rarement dans les régions où l'on rencontre des problèmes de salinité.

Par contre, pour des eaux de salinité moyenne ou forte la méthode géochimique conduit à des résultats satisfaisants très proches de ceux provenant des mesures. Sur la figure 1 il apparaît nettement que, pour les eaux de type B C et D, les valeurs estimées et mesurées sont très proches lorsque la FL varie de 10 à 13 %.

Pour les eaux C et D (les plus salées) la méthode classique conduit à des valeurs estimées très élevées de la salure, et celles-ci s'éloignent fortement de la réalité (fig. 1). Ceci est dû au fait qu'il n'est pas tenu compte des phénomènes de dissolution et de précipitation des minéraux. Or pour l'eau de qualité D, qui est la plus chargée, les calculs montrent qu'on a précipitation de gypse dès le début de l'évaporation. Ces mêmes calculs conduisent à admettre qu'avec une fraction de lessivage comprise entre 10 et 13 %, 45 % des sels présents dans l'eau d'irrigation précipitent dans le sol sous forme de calcite et de gypse.

Il apparaît donc que la méthode géochimique qui est présentée puisse conduire à des résultats intéressants et marquer un progrès par rapport aux anciennes méthodes. Plusieurs points restent cependant critiquables ; on peut notamment citer :

— Le calcul des coefficients de concentration est basé sur un découpage du profil en 4 tranches auxquelles sont attribuées des fractions différentes de cession de l'eau. Il convient à ce propos de faire remarquer que cette démarche est généralement admise même si certains auteurs n'en sont pas tellement partisans. VALLES *et al.*, (1982) ont d'ailleurs montré que si on modifiait le pourcentage d'eau puisée dans chaque tranche de sol, la fraction de lessivage calculée s'en trouvait très peu modifiée et il en va de même pour le facteur de concentration FC.

— Il a été admis que la conductivité de la solution du sol à la capacité au champ était le double de celle

de l'extrait de pâte saturée. Cette hypothèse est basée sur le fait que dans cette gamme d'humidité il n'est pas observé de précipitation avec les eaux utilisées en irrigation et que l'on admet que le taux d'humidité de l'extrait de pâte saturée est égal au double du taux d'humidité du sol à la capacité au champ.

— On est conduit pour le calcul de la F.L. par la méthode géochimique à passer de la conductivité des solutions au résidu sec ; cela implique que l'on connaisse la relation qui lie, localement, ces deux séries de données.

Il convient surtout d'insister sur le fait que la méthode géochimique peut fournir des résultats qui sont mal utilisés, car on manque de données précises sur la tolérance des végétaux. On est tenu, pour utiliser les tables de références dont on dispose, de passer de l'activité et de la molalité de chaque ion à la conductivité de la solution et au résidu sec, ce qui constitue une perte considérable d'information.

CONCLUSIONS

Cette étude est consacrée au calcul de la fraction de lessivage qui devrait être apportée pour la mise en valeur des sols salés irrigués avec des eaux plus ou moins chargées. Elle constitue une des premières vérifications justifiant l'emploi de la méthode géochimique qui est proposée.

Raisonnement sur la conductivité comme paramètre global descriptif de la salinité peut s'avérer inexact. Lorsqu'en volume la solution se concentre d'un facteur FC, il est inexact de dire qu'en conductivité la solution se concentrera du même facteur : ce serait oublier la part des précipitations qui conduit à une salure moindre que prévue. En effet, les ions n'ont pas tous le même comportement ; certains participent à la synthèse des minéraux et sont donc retirés de la solution, tandis que d'autres restent dissous, et sont effectivement concentrés d'un facteur FC. Ces derniers participent à des phénomènes d'échange avec les argiles au cours des premières irrigations ; il s'établit par la suite un équilibre entre les ions adsorbés et la solution du sol.

A partir des données recueillies sur les essais de Cherfeh il a été possible de montrer que la méthode classique utilisée pour estimer la fraction de lessivage était inadaptée. Ceci est vrai en particulier lorsqu'on irrigue les sols avec des eaux à forte conductivité où l'évaporation provoque rapidement la précipitation de la calcite, voire du gypse. La méthode géochimique donne, par contre, des résultats plus satisfaisants, lorsqu'on irrigue des sols avec des eaux dont la conductivité est supérieure à 2 mmho/cm, ce qui correspond au cas le plus fréquent dans les régions où se posent des problèmes de salinité.

Il faut préciser que le modèle proposé et dont nous avons voulu tester la validité a déjà fait l'objet de plusieurs applications. Il a permis notamment de presumer les risques de salinité et d'alcalisation des sols irrigués avec des eaux de différentes qualités. On a pu (VALLES et BOURGEAT, 1988a et b) montrer l'inefficacité des apports de gypse pour les sols irrigués de la vallée de Medjerdah qui avait été confirmée par des essais au champ. N'DYAYE (1987) a montré quant à lui, par des simulations, les risques d'alcalisation que l'on observe à l'Office du Niger à la suite

de l'irrigation des sols avec des eaux pourtant très peu chargées.

REMERCIEMENTS

Les auteurs sont particulièrement reconnaissants à Messieurs AUBERT et RIEU d'avoir bien voulu leur faire part de leurs observations qui ont permis la mise au point de cette note.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 16 février 1989

BIBLIOGRAPHIE

- BAHRI (A.), 1982. — Utilisation des eaux et des sols salés dans la plaine de Kairouan (Tunisie). Th. Doc. Ing. Institut National Polytechnique de Toulouse, 156 p.
- BRESLER (E.) et HOFFMAN (G.J.), 1986. — Irrigation management for soil salinity control. Theories and tests. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50 : 1552-1559.
- DAOUD (Y.), 1983. — Contribution à l'étude de la dynamique des sels dans un sol irrigué du périmètre du haut-Cheliff (Algérie). Thèse doct. Ing. Rennes, 194 p.
- DROUBI (A.), 1976. — Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermodynamique de simulation. Application sur sols salés du Tchad. Thèse Doct. Ing. et *Sci. Géol.*, Mém., 46, 177 p.
- DROUBI (A.), CHEVERRY (C.), FRITZ (B.) et TARDY (T.), 1976a. — Géochimie des eaux et des sels dans les sols des polders du Lac Tchad : Application d'un modèle thermodynamique de simulation de l'évaporation. *Chem. Géol.*, 17 : 1265-177 p.
- DROUBI (A.), FRITZ (B.) et TARDY (Y.), 1976b. — Equilibres entre minéraux et solutions. Programmes de calcul appliqués à la prédiction de la salure des sols et des doses optimales d'irrigation. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.*, vol. XIV n° 1 : 13-38.
- FRITZ (B.), 1975. — Etude thermodynamique et simulation des réactions entre minéraux et solutions. Applications à la géochimie des altérations et des eaux continentales. Thèse Doct. Ing. Strasbourg et Mem. *Sci. Géol.*, 41, 152 p.
- FRITZ (B.), 1981. — Etude thermodynamique et modélisation des réactions hydrothermales et diagénétiques. *Sci. Géol.*, Mém. 65, 197 p.
- MIYAMOTO (S.) et CRUZ (I.), 1986. — Spatial variability and soil sampling for salinity and sodicity appraisal in surface-irrigated orchards. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50 : 1020-1026.
- MIYAMOTO (S.) et CRUZ (I.), 1987. — Spatial variability of soil salinity in furrow-irrigated Torrifluvents. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51 : 1019-1025.
- N'DIAYE (M.K.), 1987. — Evaluation de la fertilité des sols à l'Office du Niger à la recherche des causes et de la dégradation des sols. Thèse Doct. Ing. I.N.P., 133 p.
- PERRET (D.), 1982. — Calcul d'équilibres géochimiques par minimisation d'énergie libre. Thèse Doc. Ing., ENSA Rennes, 119 p.
- RHOADES (J.O.), 1974. — Drainage for salinity control. In : Drainage for Agriculture. Van Schilfaarde J. (Ed.), *Amer. Soc. Agronomy Monograph*, 17 : 433-462.
- UNESCO, 1970. — Recherche et formation en matière d'irrigation avec des eaux salées. Techn. Rpt. UNESCO UNDF (SF) TUN. 5, Paris, 243 p.
- VALLES (V.), 1985. — Etude et modélisation des transferts d'eau et de sels dans un sol argileux. Application au calcul des doses d'irrigation. Thèse Doct., INP Toulouse, 15, 146 p.
- VALLES (V.) et DOSSO (M.), 1979. — Problèmes posés par l'utilisation des eaux salées pour l'irrigation. Calcul des doses d'arrosage. Rapport GERSAR, 52 p.
- VALLES (V.), VALLES (A.M.), DOSSO (M.), 1982. — Méthodes actuelles d'étude des problèmes de salinité liés à l'irrigation. Publication ORSTOM, Tunis, 71 p., *multigr.*
- VALLES (V.), VALLES (A.M.), DOSSO (M.), 1983. — Irrigation des sols salés et doses de lessivage. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XX, n° 2, 119-127.
- VALLES (V.) et BOURGEAT (F.), 1988a. — Geochemical determination of the gypsum requirements of cultivated sodic soils. 1988aI. Development of the thermodynamic model gypsol simulating the irrigation water soil chemical interaction. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 2 : 165-177.

VALLES (V.) et BOURGEAT (F.), 1988b. — Geochemical determination of the gypsum requirements of cultivated sodic soils. II. Application to the sodic saline soils of the lower wally of the oued Mejerdah in Tunisia. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 2 : 179-186.

VALLES (V.), BERTRAND (R.V.) et BOURGEAT (F.), 1988c. — Utilisation du concept d'alcalinité résiduelle généralisée pour apprécier la qualité des eaux d'irrigation pour les sols sodiques. Application aux sols de l'Office du Niger (Mali) et de la Vallée de l'oued Mejerdah (Tunisie). *Agronomie Tropicale* (à paraître).