

Irrigation des sols salés et doses de lessivage

Vincent VALLES (1), Anne-Marie VALLES (2) et Mireille DOSSO (3)

(1) *Pédologue O.R.S.T.O.M., mission O.R.S.T.O.M.-Tunisie, 18, avenue Charles-Nicolle, Tunis. INP, place des Hauts-Murats Toulouse*

(2) *Pédologue O.R.S.T.O.M., laboratoire de Minéralogie et Cristallographie Université Paul Sabatier, 38, rue des Trente-six-Ponts, 31062 Toulouse Cédex*

(3) *Centre Scientifique I.B.M. France, 36 avenue Raymond Poincaré, 75016 Paris*

RÉSUMÉ

L'irrigation avec des eaux salées nécessite l'apport d'une fraction d'eau supplémentaire pour lessiver les sels ou fraction de lessivage.

La méthode classique de calcul de cette dose de lessivage est présentée et critiquée. Une méthode dite « géochimique » est proposée, elle tient compte des interactions entre la solution et les minéraux du sol, notamment les phénomènes de précipitation et de dissolution que néglige la méthode classique.

Les deux méthodes sont comparées sur deux exemples d'irrigation avec l'eau de l'Euphrate et l'eau du Chari.

MOTS-CLÉS : Sols salés — Caractérisation — Comparaison des méthodes — Irrigation.

ABSTRACT

IRRIGATION OF SALINE SOILS AND LEACHING

Irrigation with salted waters requires extra water in order to allow the salt leaching. This addition is called the leaching fraction.

The "classical method" used to calculate this leaching fraction is investigated and a new method called "geochemical method" is proposed. In opposition to the classical method, it takes into account the interactions between the solution and the soils minerals which are mainly dissolution and precipitation processes.

As an application, two examples of irrigation with the Euphrate and Chari waters are given.

KEY WORDS : Saline soils — Characterization — Comparison of methods — Irrigation.

1. INTRODUCTION

L'utilisation d'eau salée pour l'irrigation engendre plusieurs problèmes que l'on peut résumer ainsi :

— des phénomènes de toxicité des sels vis-à-vis du végétal;

— une augmentation de la pression osmotique qui peut freiner voire arrêter l'absorption de l'eau par le végétal;

— une dégradation des caractéristiques physiques du sol : perte de structure, baisse de perméabilité avec les risques d'asphyxie pour les racines qui en résultent.

On peut s'affranchir en partie de ces contraintes en apportant un supplément d'eau qui permet le lessivage des sels. Le volume d'apport est égal à l'évapotranspiration additionnée du volume de lessivage et des pertes liées à la percolation. L'eau de percolation est la partie de l'eau d'irrigation qui s'infiltre directement, sans se mélanger à la solution du sol.

$$V_i = ETM + V_1 + V_P$$

avec V_i volume d'apport.

ETM évapotranspiration.

V_1 volume de lessivage.

V_P percolation.

Si l'on néglige les pertes par percolation on a :

$$V_i = \text{ETM} + V_1$$

On appellera fraction lessivante (FL) le rapport :

$$\text{FL} = \frac{V_1}{\text{ETM} + V_1}$$

L'irrigation avec des eaux salées se pratique le plus souvent dans des pays arides; l'eau y est rare et il convient donc de minimiser cette dose de lessivage. Le but de cet article est d'évaluer au plus juste cette fraction lessivante en tenant compte :

- de la composition chimique de l'eau d'irrigation;
- des caractéristiques du sol;
- de la plante;
- du climat.

Deux méthodes seront présentées :

— la méthode dite classique qui résulte d'une approche surtout empirique des problèmes de salinité;

— une méthode dite géochimique qui découle d'une approche plus récente et plus théorique.

Pour la détermination de la fraction lessivante, deux étapes apparaissent nécessaires. Dans un premier temps on cherchera à caractériser la transformation de l'eau d'irrigation en solution du sol, ensuite on estimera l'influence exercée par la solution du sol sur le rendement de la culture.

Les deux méthodes présentées diffèrent au niveau de la première étape, qui sera d'ailleurs la seule abordée ici. Pour ce qui concerne les relations entre les rendements et les concentrations de la solution du sol, on pourra se rapporter au rapport plus complet que nous avons récemment présenté (VALLES *et al.*, 1982) et aux bulletins FAO-1975, FAO-1976).

Nous rappellerons seulement qu'en se fixant un seuil de productivité, correspondant à un certain pourcentage du rendement optimum, on peut déterminer les concentrations critiques de la solution du sol qu'il convient de ne pas dépasser pour s'affranchir des différentes contraintes (salinité, toxicité Cl et Na, perméabilité). Ces concentrations critiques connues, permettent de fixer des doses de lessivage pour chaque contrainte. Seule la fraction lessivante limitante, c'est-à-dire la plus grande, est finalement retenue.

2. PRÉSENTATION DES MÉTHODES

Les pertes d'eau liées au mode d'irrigation (pertes par percolation et pertes d'amenée d'eau à la parcelle) ne sont pas prises en considération. Dans tout ce qui

suit, on suppose l'existence d'un réseau de drainage, ou d'une nappe suffisamment profonde, ce qui exclue les phénomènes de salinisation secondaire par remontée capillaire.

Connaissant les caractéristiques chimiques de l'eau d'irrigation, le but que nous fixons est de déterminer la fraction de lessivage FL.

Dans la méthode dite « classique » il n'est pas tenu compte des phénomènes de précipitation et dissolution des minéraux alors que dans la méthode géochimique que nous proposons, ces processus sont analysés.

2.1. La méthode classique

Il sera successivement traité des problèmes posés par la salinité, par la toxicité de certains ions (Cl⁻ et Na⁺) et par les risques d'imperméabilité.

2.1.1. PROBLÈMES DE SALINITÉ

Le calcul de la fraction lessivante repose sur un certain nombre d'hypothèses que l'on peut résumer ainsi :

- le régime permanent est atteint;
- l'eau d'irrigation ne dissout et ne précipite pas de minéraux;
- l'humidité de l'extrait de pâte saturée est supposée égale à deux fois l'humidité de la capacité au champ;
- seule la moitié de la réserve utilisable du sol est absorbée par les végétaux entre deux arrosages (les mesures de tolérance des cultures ont été effectuées dans ces conditions);
- les végétaux réagissent à la salinité moyenne de la zone racinaire;
- la profondeur utile du sol peut être divisée en 4 quarts et l'on suppose que 40 % de l'eau absorbée par les plantes sont prélevés dans le premier quart, 30 % dans le deuxième, 20 % dans le troisième et 10 % dans le dernier quart.

Moyennant ces hypothèses, on peut calculer la conductivité moyenne de la zone racinaire.

Si l'on considère les échanges qui se produisent seulement au niveau du premier quart du profil, on peut estimer que la plante absorbe 0,4 ETM soit 0,4 (V_i — V₁). L'eau qui percole à la base de ce premier quart du sol atteint un volume de V_i — 0,4 (V_i - V₁) c'est-à-dire 0,6 V_i + 0,4 V₁.

L'eau de conductivité CE_i, apportée lors de l'irrigation passe à la conductivité CE_{s1}.

L'équation de la balance des sels s'écrit :

$$CE_i \cdot V_i = CE_{s1} \cdot [0,6 V_i + 0,4 V_1].$$

$$CE_{s1} = CE_i \frac{V_i}{0,6 V_i + 0,4 V_1} = CE_i \frac{1}{0,6 + 0,4 FL}$$

De même les concentrations atteintes à la fin des deuxième, troisième et quatrième quarts sont égales à :

$$CE_{s2} = CE_i \frac{1}{0,3 + 0,7 FL}$$

$$CE_{s3} = CE_i \frac{1}{0,1 + 0,9 FL}$$

$$CE_{s4} = CE_i \frac{1}{FL}$$

d'où l'expression de la conductivité moyenne dans la zone racinaire

$$CE_s = \frac{1}{5} [CE_i + CE_{s1} + CE_{s2} + CE_{s3} + CE_{s4}].$$

Le premier terme $\frac{1}{5} CE_i$ est introduit pour tenir compte du fait que dans les premiers centimètres du sol l'eau d'irrigation ne se modifie pratiquement pas et conserve sa conductivité.

Avec l'hypothèse que le taux d'humidité de l'extrait de pâte saturée est le double de celui de la capacité au champ, on calcule la conductivité d'extrait de pâte saturée moyenne sur la zone racinaire.

$$CE_e = \frac{CE_i}{10} \left[\frac{1}{FL} + \frac{1}{0,1 + 0,9 FL} + \frac{1}{0,3 + 0,7 FL} + \frac{1}{0,6 + 0,4 FL} \right].$$

Nous avons donc une relation entre la conductivité de l'eau d'irrigation CE_i , la conductivité d'extrait saturé moyenne sur la zone racinaire CE_e et la fraction lessivante FL . Cette relation n'étant pas inversible, RHOADES (1971) a proposé une formule approchée $FL = \frac{CE_i}{5 \cdot CE_e - CE_i}$

Pour une culture donnée, le niveau de rendement désiré permet de fixer la valeur limite moyenne que peut atteindre l'extrait de pâte saturée dans la zone racinaire. Connaissant la conductivité de l'eau d'irrigation, on peut alors déterminer la fraction lessivante qui maintient dans le profil cette conductivité reconnue tolérable.

Remarque : La relation $FL = f\left(\frac{CE_i}{CE_e}\right)$ est obtenue dans l'hypothèse de la stabilisation de la salinité lorsque les sels amenés par l'eau d'irrigation sont exportés par l'eau de drainage.

Si l'on calcule une fraction lessivante FL correspondant à une salinité CE_e que l'on désire maintenir dans le profil sans se soucier de l'état de salinité initiale du sol, il faut bien réaliser que le raisonnement n'est valable qu'à long terme et que la conductivité de l'extrait de pâte saturée CE_e désirée est un état d'équilibre du sol, qui ne sera atteint qu'après une longue période d'irrigation.

2.1.2. PROBLÈMES LIÉS AUX PHÉNOMÈNES DE TOXICITÉ

L'irrigation avec des eaux salées pose des problèmes de toxicité essentiellement avec le chlore et le sodium. L'action de ces éléments et des seuils de tolérance pour quelques cultures essentielles sont précisés dans le rapport VALLES *et al.* (1982).

Le chlore

Le chlore n'est présent dans le sol que dans la solution du sol sous forme Cl^- . Il n'est pas fixé et ne participe pas à des précipitations; en effet, le produit de solubilité de $NaCl$ est tel que la pression osmotique maximale tolérable par le végétal est atteinte bien avant l'apparition du premier cristal de sel. La solution se concentre par absorption d'eau au niveau des racines et l'équation de balance des sels nous permet d'écrire :

$$V_i \cdot C_i = V_1 \cdot C_1.$$

La concentration de l'eau de lessivage C_1 est égale à :

$$C_1 = \frac{V_i}{V_1} \cdot C_i = \frac{1}{FL} \cdot C_i.$$

La concentration C_e de l'extrait de pâte saturée à la base du profil est :

$$C_e = \frac{1}{2} C_1 = \frac{1}{2 FL} \cdot C_i.$$

Pour une culture donnée, c'est-à-dire une valeur tolérable maximale de C_e et une teneur en chlore de l'eau d'irrigation, la fraction lessivante est déduite de la formule $FL = \frac{C_i}{2 \cdot C_e \max}$.

Le sodium

Le raisonnement appliqué au chlore n'est pas valable car lorsque la solution se concentre, le sodium est davantage fixé sur les argiles. La variation de la concentration en sodium ne dépend pas seulement du facteur de concentration de la solution.

Le rapport $\text{Na}/\text{T} \times 100$ (pourcentage de sodium fixé sur les argiles) est utilisé comme paramètre pour évaluer la toxicité du sodium.

Ce rapport Na/T est fonction non seulement de la teneur en Na^+ mais aussi des valeurs de Ca^{++} et Mg^{++} .

Diverses équations ont été proposées pour relier le rapport Na/T à la composition de la solution, parmi celles-ci on peut citer celle obtenue par le CRUESI :

$$\frac{\text{Na}}{\text{T}} (\%) = 0,988 \cdot \text{SAR} - 0,61.$$

$$\text{avec SAR} = \frac{(\text{N}_a)}{\sqrt{\frac{(\text{C}_a) + (\text{M}_g)}{2}}} \text{ exprimé en mé/l.}$$

Pour les eaux carbonatées, un SAR ajusté est utilisé afin de tenir compte de la mise à l'équilibre de l'eau avec la calcite.

$$\text{SAR}_{aj} = \text{SAR}_i [1 + (8,4 - \text{pH}_c)].$$

Le problème consiste donc à estimer le SAR de la solution du sol au bas de la zone racinaire, lieu où la valeur du SAR est la plus élevée.

Au cours de la percolation, la solution se concentre d'un facteur $\frac{1}{\text{FL}}$.

Dans l'hypothèse de l'absence de précipitation et de dissolution, les molalités des ions sont aussi multipliées par ce facteur.

Le SAR à la base du profil devient :

$$\text{SAR max} = \text{SAR}_i \cdot \frac{1/\text{FL}}{\sqrt{1/\text{FL}}}$$

$$\text{SAR max} = \text{SAR}_i \cdot \frac{1}{\sqrt{\text{FL}}}$$

$$\text{ou SAR max} = \text{SAR}_{aj} \cdot \frac{1}{\sqrt{\text{FL}}}$$

On peut là encore, pour une culture donnée, déterminer la valeur tolérable qui peut être atteinte par le SAR max, la fraction lessivante est alors

$$\text{donnée par la formule : } \text{FL} = \left(\frac{\text{SAR}_i}{\text{SAR max}} \right)^2.$$

2.1.3. PROBLÈMES LIÉS À LA PERMÉABILITÉ

L'estimation du risque de mauvaise perméabilité se fait à l'aide de trois critères :

- la conductivité de l'eau d'irrigation ;
- le taux de sodium échangeable du sol ;
- le type d'argile.

Des tableaux de valeurs maximales du SAR sont établis en fonction de ces trois paramètres (VALLES *et al.*, 1982). Avec l'hypothèse d'absence de précipitation et dissolution, le calcul s'effectue comme dans le cas de la toxicité liée au sodium.

Le SAR est maximum à la base du profil et il est fonction du SAR de l'eau d'irrigation et de la fraction lessivante :

$$\text{SAR}_{\text{max}} = \frac{1}{\sqrt{\text{FL}}} \cdot \text{SAR}_i.$$

$$\text{d'où FL} = \left(\frac{\text{SAR}_i}{\text{SAR}_{\text{max}}} \right)^2.$$

Pour lever les contraintes liées à la mauvaise perméabilité du sol, on est donc ramené, comme pour l'excès de sodium à fixer la valeur d'un SAR_{max} en fonction du type de sol et de l'eau utilisée ; on en déduit ensuite la fraction lessivante que l'on doit adopter.

2.2. La méthode géochimique

Nous avons fait remarquer à propos de l'équation de la balance des sels et du calcul du SAR, l'importance des hypothèses retenues, en particulier l'absence de phénomènes de précipitation et de dissolution. En négligeant cet aspect chimique du comportement des solutions on peut aboutir à des erreurs dans l'appréciation des risques de salinité.

Le problème de la qualité d'une eau d'irrigation ne peut valablement être abordé que si l'on étudie la transformation de l'eau d'irrigation en solution du sol. L'analyse géochimique de cette transformation se révèle très riche en enseignements ; elle permet la compréhension des processus de la salinisation (DROUBI *et al.*, 1976 a ; DOSSO, 1980). L'approche géochimique permet de préciser comment s'effectue l'évolution du système « eau d'irrigation-sol », si l'on se dirige vers la voie saline neutre ou la voie alcaline, c'est-à-dire si l'on est conduit vers une dégradation irréversible ou non du sol (CHEVERRY, 1974 ; DROUBI, 1976).

D'un point de vue pratique, cette démarche peut conduire à une optimisation dans le calcul des doses de lessivage. Dans cette optique nous exposons une méthode qui permet de calculer la fraction lessivante (FL) en tenant compte des interactions qui se manifestent entre le sol ou la solution.

L'approche géochimique est basée sur le calcul des équilibres chimiques entre la solution et les minéraux du sol.

Le grand nombre de réactions et de paramètres pris en compte rend nécessaire l'emploi d'un calculateur. Un inventaire des programmes et modèles

de calcul des interactions entre minéraux et solutions est présenté par FRITZ (1981).

Une application de ces modèles réside dans la simulation de l'évaporation d'une eau (FRITZ, 1975; DROUBI *et al.*, 1976 b; FRITZ, 1981; PERRET, 1982).

La méthode que nous proposons consiste précisément à simuler l'évaporation d'une eau d'irrigation. La simulation fournit en fonction du facteur de concentration FC (c'est-à-dire le rapport des nombres de moles d'eau à l'état initial et à l'état considéré) les activités et les molalités des espèces dissoutes, la nature et le nombre de moles des minéraux précipités. Dans un sol irrigué, les eaux de lessivage se concentrent au fur et à mesure de leur percolation, le facteur de concentration maximal est obtenu

$$\text{à la base du profil et on a } FC = \frac{1}{FL}$$

FC facteur de concentration.

FL fraction de lessivage.

On peut alors tracer en fonction du facteur de concentration ou de la fraction lessivante, les paramètres retenus qui caractérisent une eau à savoir la charge totale dissoute équivalente à la conductivité électrique, le SAR et la teneur du chlore.

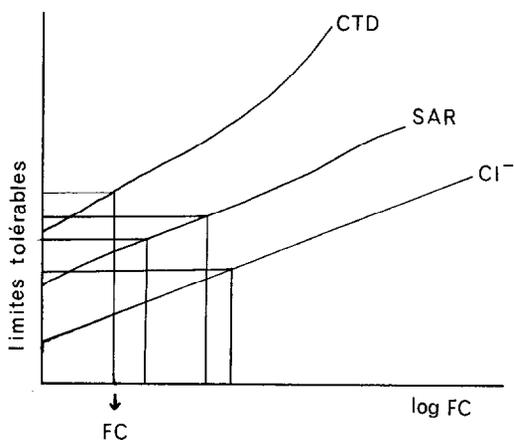


FIG. 1. — Calcul de la fraction lessivante

Les résultats obtenus par simulation de l'évaporation de l'eau d'irrigation sont portés sur la figure 1. Les valeurs tolérables pour une culture donnée de la charge totale dissoute, du SAR et de la teneur en chlore, sont portées en ordonnée sur le même graphique. Ainsi, on détermine directement les valeurs limites des facteurs de concentration correspondant à chacune des contraintes définies : salinité, toxicité en chlore, toxicité en sodium et perméabilité. Comme dans la méthode précédente, on retiendra évidemment, en dernier ressort, la plus petite valeur

trouvée pour le facteur de concentration soit la fraction lessivante la plus grande.

Remarques : Pour une famille d'eaux naturelles, il existe une relation entre la charge totale dissoute et la conductivité électrique.

Par exemple, l'UNESCO (1970) propose pour la Tunisie la relation :

$$CTD = 0,884 \cdot CE^{0,993}$$

CTD = charge totale dissoute en g/l.

CE = conductivité électrique en mmhos.

On peut donc utiliser indifféremment la charge totale dissoute ou la conductivité électrique comme paramètre de la salure.

Les tables de tolérance des végétaux à la salure sont exprimées en conductivités électriques moyennes sur le profil (CE_e). Or, la méthode géochimique utilise la conductivité électrique limite à la base du profil. Comme dans la méthode classique, il est impossible de calculer directement la fraction lessivante FL à partir de la conductivité de l'extrait de pâte saturée CE_e . Par contre, on peut calculer CE_e induite par une fraction lessivante FL donnée avec les résultats de la simulation et l'hypothèse 40-30-20-10. Il faut donc établir pour une eau d'irrigation donnée un tableau FL- CE_e .

Dans la plupart des cas, la formule de RHOADES est assez précise et permet de s'affranchir de ce calcul fastidieux. Cependant, il ne faut pas oublier que la formule de Rhoades est établie en négligeant les phénomènes de précipitation et de dissolution.

3. EXEMPLES

3.1. Application de la méthode classique sur la station de Cherfech

Quatre eaux de qualité différente ont été testées sur des parcelles expérimentales irriguées de manière identique à la station de Cherfech en Tunisie (UNESCO, 1970). D'autre part il a été montré que la salure du sol s'est stabilisée après cinq ans d'irrigation (VALLES *et al.*, 1979).

On dispose sur cette parcelle de toutes les données nécessaires à la vérification de la validité de la méthode classique.

On a porté dans le tableau I les rapports CE_e/CE_i mesurés pour chaque qualité d'eau et les fractions lessivantes correspondantes d'après la formule de RHOADES.

Les quatre valeurs du rapport CE_e/CE_i et de FL sont très différentes alors qu'elles devraient être égales puisque la conduite de l'irrigation est la même pour les quatre qualités d'eau.

TABLEAU I

Conductivité des eaux d'irrigation, conductivité moyenne des extraits de pâte saturée et fractions lessivantes à Cherfech

	CE _i	CE 0-80 ^c cm	CE _e /CE _i	FL
	(1)	(2)	(3)	(4)
Qualité A	0,30	2,15	7,17	0,02
B	2,00	4,00	2,00	0,10
C	3,50	4,90	1,40	0,18
D	5,20	6,35	1,22	0,23

(1) et (2) Source rapport UNESCO-1970.

(3) et (4) Valeurs calculées.

Sur cet exemple, la méthode classique ne permet même pas de prévoir l'ordre de grandeur de la fraction de lessivage qui a été appliquée. D'autre part ce ne sont pas les hypothèses 40-30-20-10 et $\theta_{\text{sat}} \approx 2 \cdot \theta_{\text{ret}}$ qui pourraient justifier les écarts observés entre les quatre qualités d'eau.

En effet, ces hypothèses influent de manière identique sur le calcul de la FL quelle que soit la conductivité de l'eau d'irrigation.

L'hypothèse d'absence de dissolution et de précipitation de minéraux semble donc être la source principale d'imprécision dans ce calcul.

Dans ce sol qui contient du calcaire et des traces de gypse, l'eau de qualité A très douce dissout ces minéraux et la fraction lessivante est sous-estimée. L'eau de qualité D, chargée en sels, proche de la saturation de la calcite, précipite ce minéral dans le sol quand elle se concentre; la fraction lessivante est alors surestimée.

3.2. Utilisation et comparaison des deux méthodes pour l'irrigation

L'irrigation des sols à partir d'eau salée peut être conduite en utilisant l'une ou l'autre des méthodes décrites. Les deux modes de calcul de la fraction lessivante conduisent parfois à des résultats très différents; c'est ce que nous voulons montrer en traitant de l'irrigation à partir d'eaux de composition différente.

Deux qualités d'eau sont ainsi testées, ce sont :

— l'eau de l'Euphrate en Syrie qui est bicarbonatée calcique (Dosso, 1980);

— l'eau du Chari au Tchad qui est bicarbonatée calcique, sodique (DROUBI, 1976).

TABLEAU II

Composition chimique des eaux de l'Euphrate et du Chari

	pH	CTD g/l	CE	K	Na	Ca	Mg	Si	SO ₄	Cl	Alc
						en mmoles					
Euphrate	7,6	0,40	0,50	0,07	1,01	1,27	0,73	0,12	0,70	0,88	2,63
Chari	7,6	0,10	0,12	0,07	0,18	0,17	0,14	0,34	0,01	0,02	0,85

La culture envisagée est celle du Prunus pour laquelle on admet une baisse de rendement de 10 % pour les valeurs limites suivantes :

Salinité	CE _e	= 2,2 mmhos.
Toxicité chlore	C _{max}	= 40 mé/l.
Toxicité sodium	SAR _{max}	= 8,7
Perméabilité	SAR _{aj max}	= 7 pour l'Euphrate.
	SAR _{aj max}	= 6 pour le Chari.

Les résultats sont portés dans le tableau III.

Avec l'eau de l'Euphrate, le facteur limitant est une mauvaise perméabilité. Suivant la méthode choisie, la fraction lessivante qui permet de s'en affranchir est 3,7 % ou 5 %.

Pour le Chari, les deux méthodes donnent des résultats très différents. D'après la méthode classique, le facteur limitant est la salure, il faut une fraction lessivante de 0,5 % ce qui est négligeable. D'après

la méthode géochimique, le facteur limitant est la perméabilité et il exige une fraction lessivante de 7,4 %.

Ainsi, par rapport à la méthode géochimique, la méthode classique surestime la fraction lessivante qui permet de maintenir la salure à un niveau satisfaisant. Cette méthode sous-estime par contre la fraction lessivante nécessaire au maintien d'une bonne perméabilité.

Pour la toxicité en chlore, les résultats sont identiques.

La différence essentielle entre les deux méthodes réside dans la prise en compte des phénomènes de dissolution et de précipitation. Le chlore ne participant pas à ces réactions dans le domaine de concentrations étudié, les deux méthodes donnent des résultats semblables pour la toxicité en chlore. La surestimation du lessivage dans la méthode

TABLEAU III

Fractions de lessivage calculées pour l'Euphrate et le Chari

	EUPHRATE		CHARI	
	M. classique	M. géochimique	M. classique	M. géochimique
Salure	3,2	1,0	0,50	0,10
Perméabilité	3,7	5,0	0,15	7,40
Toxicité Na	2,4	3,9	0,07	5,50
Toxicité Cl	2,2	2,1	0,05	0,04

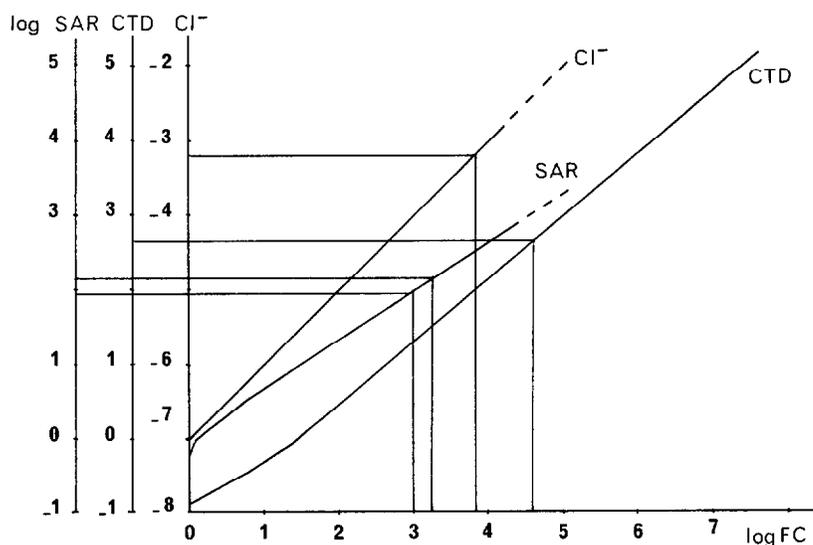


FIG. 2.

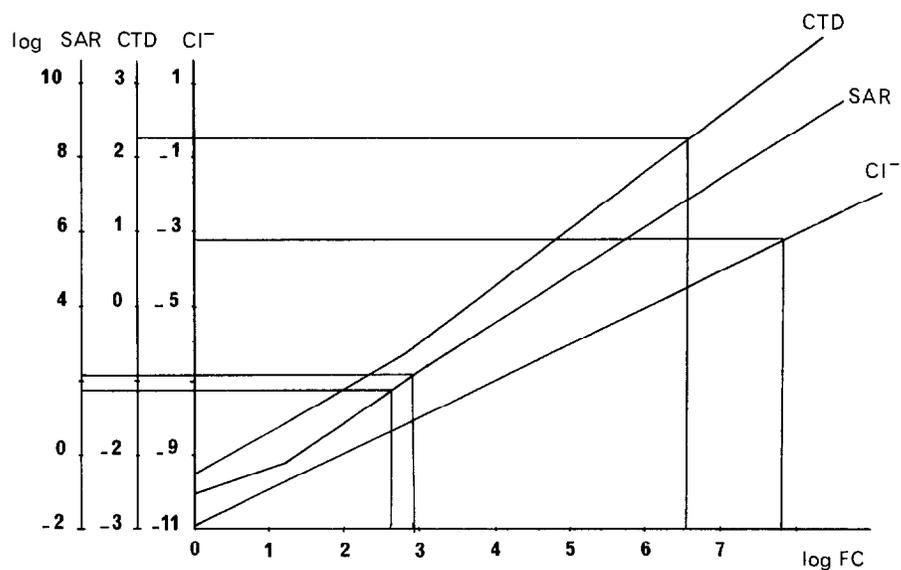


FIG. 3.

classique pour lutter contre la salinité s'explique par la précipitation de la calcite, de même celle-ci entraîne une sous-estimation quant aux risques d'alcalinisation. En effet, lorsque la teneur en calcium de la solution diminue, la valeur du SAR augmente et celle de CTD diminue. La méthode classique qui ne tient pas compte de la diminution de la teneur en calcium de la solution due à la précipitation de la calcite aboutit donc à une valeur du SAR trop faible et CTD trop élevée.

En ce qui concerne la charge totale dissoute (CTD) représentée sur la figure 4, l'écart s'accroît avec le facteur de concentration. Pour $FC = 20$ ($FL = 5\%$) la méthode classique laisse prévoir une concentration des sels en solution 2 à 3 fois plus élevée que la méthode géochimique. Sur la figure 5 apparaît la différence entre le SAR calculé suivant la méthode classique et le SAR calculé suivant la méthode géochimique. Comme pour la charge totale dissoute, l'écart se manifeste dès le début de la concentration. La précipitation de calcite magnésienne ne peut être négligée pour les deux exemples choisis car elle commence dès le début de la concentration. (DROUBI *et al.*, 1976 a ; GAC *et al.*, 1978 ; TARDY *et al.*, 1979, AL DROUBI *et al.*, 1980).

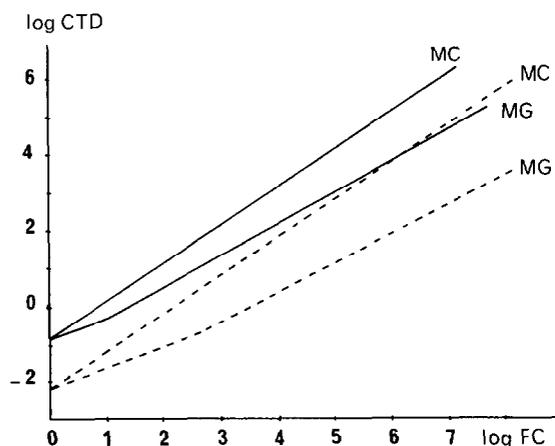


FIG. 4. — Évolution de la charge totale dissoute en fonction du facteur de concentration

Le SAR ajusté : $SAR_{aj} = SAR_i [1 + (8,4 - ph_c)]$ a été établi pour prendre en compte la mise à l'équilibre de la solution avec la calcite. Or les équilibres carbonatés sont complexes (AL DROUBI *et al.*, 1978).

Le facteur $1 + (8,4 - ph_c)$ correspond à un indice de sursaturation de la solution par rapport à la calcite, découlant de l'indice de Langelier (VALLES *et al.*, 1979). On ne peut lui accorder qu'une valeur d'indice, son usage en tant que facteur multiplicatif n'est pas justifiable.

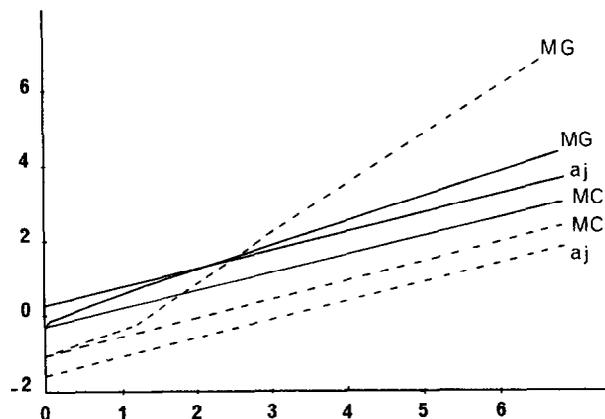


FIG. 5. — Évolution des différents SAR (en ordonnée) en fonction du facteur de concentration (log FC en abscisse)

— Euphrate MC méthode classique
 - - - Chari MG méthode géochimique

Pour les exemples présentés, le SAR ajusté réduit l'écart entre les deux méthodes dans le cas des eaux du Chari (fig. 5).

4. CONCLUSION

Au vu des résultats obtenus à la station de Cherfech, la validité des estimations fournies par la méthode classique doit être remise en question.

La faiblesse de la méthode tient non seulement aux hypothèses trop simples, mais aussi à l'utilisation de paramètres globaux tels que la conductivité électrique (CE), la charge totale dissoute (CTD) et le SAR.

La méthode géochimique que nous proposons doit permettre d'améliorer considérablement la précision du calcul de la fraction lessivante par la prise en compte des phénomènes d'interactions entre les minéraux et la solution du sol.

Il paraît néanmoins nécessaire de tester cette méthode sur des parcelles expérimentales.

D'autre part la méthode géochimique doit exprimer des résultats en fonction des limites de tolérance des végétaux. Or à l'heure actuelle ces limites de tolérance sont exprimées en terme de conductivité électrique ou SAR, qui sont les paramètres retenus par la méthode classique. Le calcul de la charge totale dissoute ou de la conductivité électrique à partir des ions présents dans la solution constitue une grande perte d'information. Aussi conviendrait-il également de conduire des expérimentations dans différentes conditions pédoclimatiques afin de préciser de nouvelles normes de tolérance des végétaux.

Manuscrit reçu au Service des Éditions de l'O.R.S.T.O.M.
 le 13 juillet 1983

BIBLIOGRAPHIE

- AL DROUBI (A.), GRONDIN (J. L.), FRITZ (B.) et TARDY (Y.), 1978. — Calcul des équilibres dans le système $\text{Ca CO}_3\text{-H}_2\text{O-CO}_2$. Rappel des conditions de dissolution et de précipitation de la calcite. *Sci. Géol. Bull.*, 31 : 195-202.
- AL DROUBI (A.), FRITZ (B.), GAC (J.-Y.) and TARDY (Y.), 1980. — residual alkalinity concept ; application to prediction of the chemical evolution of natural waters by evaporation. *Ann. J. Sci.*, 280 : 560-572.
- CHEVERRY (C.), 1974. — Contribution à l'étude pédologique des polders du lac Tchad. Dynamique des sels en milieu continental subaride dans des sédiments argileux et organiques. *Thèse Sciences*. Strasbourg, O.R.S.T.O.M., 275 p.
- Dosso (M.), 1980. — Géochimie des sols salés et des eaux d'irrigation. Aménagement de la basse vallée de l'Euphrate en Syrie. *Thèse UPS*. Toulouse, 181 p.
- DROUBI (A.), 1976. — Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermodynamique de simulation. Application aux sols salés du Tchad. *Thèse Doct. Ing. Strasbourg et Mém. Sci. Géol.*, 46, 177 p.
- DROUBI (A.), CHEVERRY (C.), FRITZ (B.) et TARDY (Y.), 1976 a. — Géochimie des eaux et des sols dans les sols des polders du lac Tchad : application d'un modèle thermodynamique de simulation de l'évaporation. *Chem. géol.*, 17 : 163-177.
- DROUBI (A.), FRITZ (B.) et TARDY (Y.), 1976 b. — Équilibres entre minéraux et solutions. Programmes de calcul appliqués à la prédiction de la salure des sols et des doses optimales d'irrigation. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, XIV : 13-38.
- FAO, 1975. — Bulletin d'irrigation et de drainage n° 24. Les besoins en eau des cultures, 198 p.
- FAO, 1976. — Soils bulletin n° 31. Prognosis of salinity and alkalinity : 268.
- FAO, 1976. — Bulletin d'irrigation et de drainage n° 29. La qualité de l'eau en agriculture, 82 p.
- FRITZ (B.), 1975. — Étude thermodynamique et simulation des réactions entre minéraux et solutions. Applications à la géochimie des altérations des eaux continentales. *Thèse Doct. Ing. Strasbourg et Mém. Sci. Géol.*, 41, 152 p.
- FRITZ (B.), 1981. — Étude thermodynamique et modelisation des réactions hydrothermales et diagénétiques. *Thèse Sci. et Mém. Sci. Géol.* 65, 197 p.
- GAC (J. Y.), BADAUT (D.), AL DROUBI (A.), et TARDY (Y.), 1978. — Comportement du calcium, du magnésium et de la silice en solution. Précipitation de calcite magnésienne, de silice amorphe et de silicates magnésiens au cours de l'évaporation des eaux du Chari (Tchad). *Sci. Géol., Bull.*, 31 : 185-193.
- PERRET (D.), 1982. — Calcul d'équilibres géochimiques par minimisation d'énergie libre. *Thèse Doct. Ing. Rennes*, 120 p.
- RHOADES (J. D.), 1971. — Quality of water for irrigation. *Soil Science*, vol. 113, n° 4 : 227-284.
- TARDY (Y.) et GAC (J. Y.), 1979. — Contrôle de la composition chimique des solutions par la précipitation des minéraux dans les sols. Ébauche d'un modèle thermodynamique pour la formation des argiles. *Sci. Sol, Bull. AFES*, 2-3 : 107-123.
- UNESCO, 1970. — Tunisie. Recherche et formation en matière d'irrigation avec des eaux salées. Tech. Rpt. UNESCO UNDF (5F). TUN5, Paris, 243 p.
- VALLES (A. M.) et VALLES (V.), 1979. — Rapport de stage ENSA Toulouse, *multigr.*
- 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.) et Dosso (M.), 1982. — Méthodes actuelles d'étude des problèmes de salinité liés à l'irrigation. Publication O.R.S.T.O.M., Tunis, 71 p., *multigr.*