

Exemple d'application des travaux de l'« US Salinity Laboratory » (1963-1968) sur l'alcalinisation de sols soumis à l'action d'eaux bicarbonatées

C. CHEVERRY

Pédologue de l'ORSTOM, S.S.C. - Bondy

RÉSUMÉ

Les travaux de l'« US Salinity Laboratory » sur le problème de l'irrigation avec des eaux contenant des bicarbonates sont résumés et appliqués au cas des polders des bordures du lac Tchad. Le processus d'alcalinisation secondaire de sols irrigués est rapproché de celui de l'alcalinisation primaire, observé lorsque ces mêmes sols de polders étaient soumis uniquement à l'action d'eaux bicarbonatées remontant par capillarité à partir d'une nappe phréatique peu profonde.

ABSTRACT

The work of the U.S. Salinity Laboratory on the irrigation problem with waters containing bicarbonates are summed up and applied to the case of the polders of Lake Chad's borders. The process of secondary alkalisation of irrigated soils is compared to that of the primary alkalisation - observed when these very polder soils were submitted uniquely to the action of bicarbonated waters moving up by capillary action from a not too deep phreatic sheet.

1. INTRODUCTION

L'irrigation avec des eaux salées peut entraîner la fixation de sodium sur le complexe adsorbant du sol, donc un processus d'alcalinisation, avec ses conséquences éventuelles pour les propriétés du sol : tendance à la dispersion des argiles, à la dégradation de la structure, à la perte de perméabilité, à l'asphyxie du milieu. L'intensité du processus d'alcalinisation dépend des caractères du sol que l'on veut irriguer, de la qualité des eaux utilisées, des conditions de leur emploi et en particulier du drainage. On se propose de présenter ici les travaux menés entre 1963 et 1968 par l'« US SALINITY LABORATORY » sur le problème particulier de l'irrigation avec des eaux riches en bicarbonates, puis d'appliquer ces travaux au cas des polders de bordure du lac Tchad (Afrique Centrale).

Ces terres, argileuses et humifères, gagnées sur le lac Tchad depuis une vingtaine d'années grâce à l'édification de barrages, vont en effet être irriguées avec des eaux où l'anion bicarbonate joue un grand rôle, qu'il s'agisse des eaux du lac lui-même, ou de celles de la nappe phréatique des polders. L'alcalinisation « secondaire » que l'on peut ainsi prévoir par le calcul, en régime d'irrigation, sera comparée à l'alcalinisation mesurée dans ces mêmes sols lors de la phase initiale de poldérisation.

Lors de cette première phase, les polders n'ont pas été irrigués, ou seulement très localement et l'alcalinisation « primaire » a été liée au processus de remontée capillaire d'eaux bicarbonatées à partir de la nappe phréatique peu profonde, donc à partir d'eaux du même type que celles que l'on projette d'utiliser pour l'irrigation.

2. LA MÉTHODE CLASSIQUE D'APPRÉCIATION DE LA QUALITÉ D'UNE EAU D'IRRIGATION

C'est la méthode de l'US Salinity Laboratory de 1954, qui met en avant deux caractéristiques de l'eau : *sa salure globale*, estimée par une mesure de conductivité, et *indicatrice des risques de salinisation secondaire*, et *son caractère plus ou moins alcalinisant vis-à-vis du sol qu'elle irriguera*, exprimé par la valeur du SAR, « sodium adsorption ratio ». La classification des eaux par « qualités » découle directement de la combinaison de ces deux critères par l'utilisation de tableaux à double entrée : conductivité en abscisse, SAR en ordonnée, avec délimitation sur le graphique, et d'après des données d'expérience, de secteurs ($C_1S_1...$).

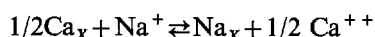
2.1. Relation entre la valeur du coefficient SAR des solutions du sol et le degré d'alcalinisation du sol, exprimé par Na/T %

$$\text{Rappelons l'expression de SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}}{2}}}$$

(données en mé/l).

Le choix de ce coefficient s'appuie sur l'équation de GAPON (1933) qui peut se résumer ainsi (RUELLAN, DELETANG, 1967) :

Soit une argile saturée en ions Ca^{++} et mise en présence d'ions Na^+ ; on peut écrire (X : argile) :



et

$$\frac{(\text{Na}_x)(\text{Ca}^{++})^{1/2}}{(\text{Ca}_x)^{1/2}(\text{Na}^+)} = K \quad (\text{les quantités mises entre parenthèses sont exprimées en mé pour les ions adsorbés et en millimoles pour les ions en solution}).$$

Il est donc concevable d'exprimer le degré d'alcalinisation du sol en fonction des valeurs du SAR des solutions du sol. Différentes relations ont été proposées localement, à partir de l'étude de périmètres irrigués. Deux seront citées :

$$\text{Na/T sol} = \frac{100(-0,0126 + 0,01475 \text{ SAR})}{1 + (-0,0126 + 0,01475)} \quad (1)$$

(US Salinity Laboratory, 1954 ; relation valable pour $\text{Na/T} < 50 \%$)

ou

$$\text{Na/T} \% \text{ sol} = 0,988 \text{ SAR} - 0,61 \quad (\text{Tunisie, CRUESI, 1970}). \quad (2)$$

avec Na : sodium échangeable, T : capacité d'échange, en mé/100 g de sol ; dans les deux cas, le SAR est celui de l'extrait du sol à saturation, considéré comme l'extrait se rapprochant le plus, à partir d'échantillons rapportés en laboratoire, des solutions du sol.

2.2. Relation entre le SAR des eaux d'irrigation et le degré d'alcalinisation du sol

Le problème est celui de l'existence d'une relation entre le SAR des eaux d'irrigation, symbole SAR_{iw} , et le SAR des solutions du sol, car cette relation permettrait de poser

$\text{Na/T}_{\text{sol}} = f(\text{SAR}_{iw})$, en s'appuyant sur des relations type (1) ou (2).

Or cette relation existe lorsqu'un « régime permanent » des sels est atteint dans le sol. L'expression « régime permanent », commode quoiqu'approximative, signifie qu'il n'y a plus d'accumulation supplémentaire de sodium échangeable sur le sol lors des irrigations successives. Lorsque ce régime est atteint, la valeur du SAR des eaux de drainage est elle-même stabilisée.

2.3. Difficulté d'établir une telle relation dans le cas d'eaux d'irrigation bicarbonatées

L'existence d'une relation directe entre le SAR_{iw} et le SAR des solutions du sol suppose aussi qu'il n'y ait des échanges d'ions qu'entre les eaux, les solutions du sol, et le complexe adsorbant et *qu'il n'y ait pas de nourrissage de cristaux lors de la percolation des eaux à travers le profil*. Ceci est le cas, en « régime permanent » pour les eaux à chlorures, et dans une moindre mesure à sulfates. Les sels correspondants sont en effet relativement solubles.

Il en va différemment pour les eaux bicarbonatées, car le carbonate de calcium est très peu soluble. On observe fréquemment que de telles eaux perdent au contact du sol une partie de leur calcium, qui précipite à l'état de carbonate. La conductivité des eaux diminue, mais leur SAR augmente.

Dans ce cas, la recherche d'une relation Na/T sol = $f(SAR_{iw})$ doit donc comporter une première étape consistant à corriger le SAR_{iw} par un facteur tenant compte de la précipitation éventuelle de $CaCO_3$ au contact du sol.

Dans le but de pallier cet inconvénient, plusieurs chercheurs ont introduit un troisième facteur pour caractériser une eau d'irrigation. C'est le cas d'Eaton qui avait proposé en 1950 la notion de « Na_2CO_3 résiduel »

$$\begin{aligned} \text{« } Na_2CO_3 \text{ résiduel »} \\ = (CO_3 + HCO_3) - (Ca + Mg). \text{ (mé/l)} \end{aligned}$$

Cette notion suppose que les anions CO_3 et HCO_3 sont quantitativement précipités dans le sol jusqu'à la limite du calcium et du magnésium présents dans l'eau. Cette approche ne rend qu'imparfaitement compte des faits observés, ce qu'ont signalé WILCOX *et al.* (1954), PRATT *et al.* (1960).

Le problème a été repris par l'équipe de Riverside : BOWER, assisté de WILCOX, Mc NEAL, RHOADES... L'exposé de leurs travaux ne sera pas présenté ici de façon exhaustive. Ces travaux américains ont d'ailleurs évolué en plusieurs étapes, entre 1963 et 1968, et se sont appuyés sur des considérations théoriques (équilibres carboniques, échanges, ...), sur des expériences menées en lysimètres, sur des expériences en laboratoire, sur des expériences de mise en valeur (dans la vallée de l'Indus, et aux Etats-Unis).

3. LES TRAVAUX DE L'« US SALINITY LABORATORY »

3.1. Le principe de la méthode. Les premières relations proposées

La méthode consiste à affecter le SAR des eaux d'irrigation (SAR_{iw}) d'un coefficient de correction tenant compte du devenir probable de ces eaux au contact du sol. Ce coefficient s'écrit : $1 + (pH_a - pH_c)$

pH_a étant le pH actuel de l'eau et pH_c le pH théorique qu'aurait cette eau si elle était en équilibre avec $CaCO_3$. C'est donc là une application de l'index de LANGELIER (1936), $I = (pH_a - pH_c)$. Si l'index I a une valeur positive, l'eau aura tendance à précipiter du $CaCO_3$ (eau « incrustante ») ; s'il est négatif l'eau sera « agressive » et pourra dissoudre une quantité supplémentaire de $CaCO_3$.

Le terme pH_c peut être calculé par la formule :

$$pH_c = (pK'_2 - pK'_c) + pCa + pAlK \quad (3)$$

avec :

pK'_2 et pK'_c : logarithmes négatifs, respectivement de la deuxième constante de dissociation de H_2CO_3 et du produit de solubilité de $CaCO_3$ (en tenant compte de la force ionique de l'eau).

pCa et $pAlK$: logarithmes négatifs des concentrations molaires du calcium et de la somme ($HCO_3^- + CO_3^{--}$).

BOWER proposa en 1963 une série d'approximations simplifiant ou modifiant l'expression de ce coefficient de correction :

a) il considère que les réactions du calcium et du magnésium sont proches et il remplace dans le calcul de pH_c , pCa par $p(Ca + Mg)$; soit pH_c^* ,

b) il substitue au pH de l'eau d'irrigation le pH actuel du sol, ce dernier étant considéré comme un milieu mieux tamponné que l'eau,

c) enfin, le pH d'un sol en équilibre avec du $CaCO_3$ est posé égal à 8,4.

Dans ces conditions, l'index de Langelier s'écrit $I = 8,4 - pH_c^*$ et le coefficient de correction du SAR : $1 + (8,4 - pH_c^*)$.

En 1963, à partir d'une étude menée sur la vallée de l'Indus, BOWER proposait une relation entre le Na/T du sol irrigué et le SAR des eaux d'irrigation

$$Na/T \% = 2SAR_{iw}[1 + (8,4 - pH_c^*)]. \quad (4)$$

Il s'agit d'une formule empirique, du même type donc que les relations (1) et (2), mais faisant intervenir le coefficient de correction liant SAR_{iw} au SAR des solutions du sol, et par ailleurs avec un coefficient 2 plus élevé que dans les relations (1) et (2), valable localement.

REMARQUES

— BOWER *et al.* s'appuient sur la méthode de LANGELIER, donc sur une méthode, parmi d'autres, traitant des équilibres carboniques, et de l'agressivité des eaux vis-à-vis du carbonate de calcium. Le problème général est de résoudre un système à 7 variables avec 5 équations connues (constantes de dissociation, d'équilibre). La résolution complète du système ne peut se faire que pour chaque cas particulier, en posant deux équations supplémentaires (GARRELS et CHRIST, 1967).

Aussi les formules globales proposées, telles que celles permettant de calculer pH_c (3) supposent toujours une série d'approximations, surtout lorsque les eaux sont assez fortement minéralisées.

— Il est traditionnel de rapprocher Ca^{++} et Mg^{++} du point de vue de leur influence sur les propriétés physiques des sols, alors que du point de vue salure proprement dite, les auteurs russes (BAZILEVICH, 1968) opposent les sels de magnésium (sulfates en particulier) considérés comme toxiques aux sels de calcium (gypse...), peu toxiques.

Ces remarques faites, l'intérêt et la validité du coefficient de correction calculé à partir de l'index de LANGELIER ainsi simplifié ont été confirmés en 1965 par une série d'expériences sur des sols (BOWER *et al.*, 1965) : il est apparu que si l'index I était négatif, il n'y avait effectivement pas de précipitation de CaCO_3 dans le sol à partir de l'eau apportée, et que si I était positif, la fraction des bicarbonates qui précipitait était hautement corrélée avec la valeur de l'index. Le facteur de correction $[1 + (8,4 - \text{pH}_c^*)]$ a donc été conservé pour l'établissement des relations proposées ultérieurement par cette équipe de Riverside.

3.2. Le rôle de la « fraction lessivante » (LF). L'établissement d'une relation plus générale :

$$(\text{Na}/\text{T})_{\text{sol}} = f(\text{SAR}_{i_w})$$

La relation (4) ne faisait pas intervenir une donnée essentielle : la fraction de l'eau d'irrigation apportée qui percole et est drainée hors des profils. Cette donnée est la « leaching fraction » de la littérature américaine, ou « fraction qui lessive » en français ; elle sera désignée par son symbole : LF dans la suite de cette note. LF est exprimée en dixièmes d'unités. $LF = 0,1$ signifie que 10 % des eaux apportées sont évacuées par drainage hors du profil. Cette donnée est essentielle car le degré d'alcalinisation qu'il est intéressant de connaître est celui qui sera atteint lorsqu'un régime permanent sera établi.

Or, cet équilibre dépend de LF , ce qu'ont montré des expériences en lysimètres menées en 1968. Les courbes obtenues ont été reproduites ci-dessous. Il apparaît que dans les sols régulièrement irrigués de ces lysimètres, les courbes de distribution de la salure (fig. 1) et de la teneur en sodium échangeable (fig. 2) en fonction de la profondeur ont des formes régulières, décalées les unes par rapport aux autres suivant la valeur de LF .

Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. X, n° 2, 1972 : 193-203.

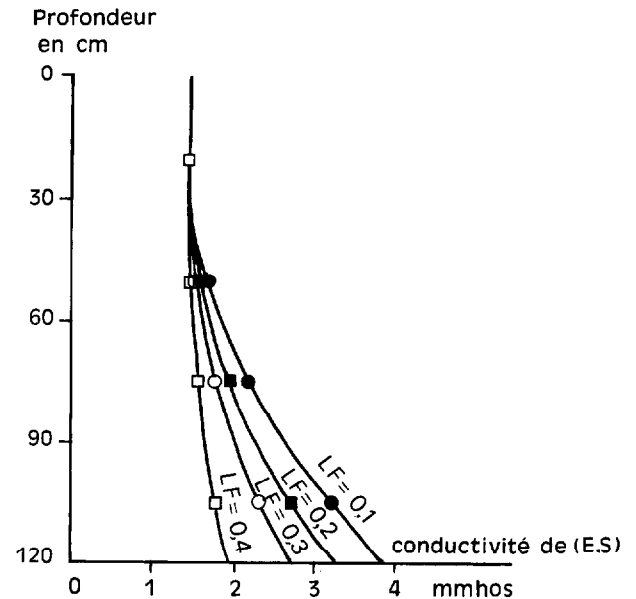


FIG. 1. — Distribution des sels dans les lysimètres, suivant la profondeur et la valeur de LF (dessin extrait de BOWER *et al.*, 1968).

Ces résultats mettent en évidence une certaine augmentation de la salure et de l'alcalinisation à la base du sol et confirment d'ailleurs ceux de BABCOCK *et al.* (1959). Ils permettent un raisonnement par étapes :

a) Les SAR des eaux de drainage (SAR_{d_w}) et de la solution du sol à la base du profil peuvent être considérés comme proches.

b) Or le SAR de la solution du sol à ce niveau du profil traduit directement le risque d'alcalinisation maximum que court le profil sous irrigation, dans sa zone racinaire en particulier. On peut donc admettre une relation directe entre (Na/T) zone racinaire, (SAR) solution du sol à sa base, SAR_{d_w} .

Reste à exprimer SAR_{d_w} en fonction de SAR_{i_w} et de LF . En supposant qu'il n'y ait pas de précipitation de sels ou de mise en solution de cations à partir des constituants du sol durant les cycles d'irrigation, on peut admettre que, du point de vue dimension, la relation est du type :

$$\text{SAR}_{d_w} = \frac{1}{\sqrt{LF}} \text{SAR}_{i_w}, \quad (5)$$

puisque la valeur de SAR augmente avec la racine carrée de la concentration, qui augmente elle-même, dans l'eau de drainage, proportionnellement à $1/LF$ (BOWER, 1968 ; RHOADES, 1968).

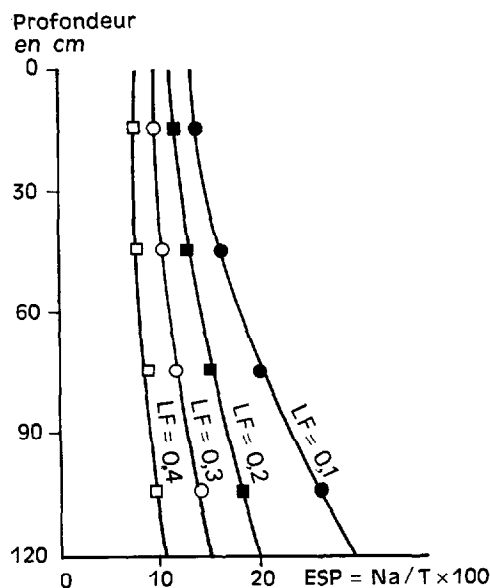


FIG. 2. — Distribution du sodium échangeable dans les lysimètres, suivant la profondeur et la valeur de LF (dessin extrait de BOWER *et al.*, 1968).

La relation générale reliant le niveau d'alcalinisation du profil (par l'intermédiaire du SAR des eaux de drainage), au SAR des eaux d'irrigation (SAR_{iw}), au devenir probable de ces eaux au contact du sol (coefficient de correction) et à LF , s'écrit alors :

$$SAR_{dw} = \sqrt{\frac{1}{LF}} SAR_{iw} [1 + (8,4 - pH_c^*)]. \quad (6)$$

C'est cette relation dont la validité a été vérifiée dans les lysimètres. RHOADES (1968) a poursuivi ces travaux sur plusieurs plans :

1) Les eaux d'irrigation bicarbonatées peuvent perdre une partie de leur calcium au contact du sol. C'est le problème précédemment traité. Mais l'irrigation peut porter sur des sols contenant encore des minéraux silicatés riches en Ca et en Mg, sous un état assez aisément altérable. L'irrigation répétée risque alors de libérer ces ions et le problème inverse est posé :

la richesse de la solution du sol en ions alcalino-terreux est *sous-estimée*. Ce problème ayant présenté une importance notable dans certaines régions arides du Sud des Etats-Unis (plagioclases, hornblende), RHOADES l'a traité.

2) La formule (6) fait intervenir la fraction lessivante. Il peut-être intéressant de remplacer ce coefficient par un coefficient de même dimension : LR (« leaching requirement » ou « besoin de lessivage »). LR est la fraction de l'eau d'irrigation apportée qui devrait percoler et drainer pour empêcher une accumulation saline excessive dans la zone racinaire. LR est donc fonction de la culture pratiquée. RHOADES propose une forme modifiée de la relation (6),

$$SAR_{dw} = \frac{y^{(1+2LR)}}{\sqrt{LR}} SAR_{iw} [1 + (8,4 - pH_c^*)], \quad (7)$$

formule dont on ne résumera pas ici le mode d'établissement ; y est un coefficient traduisant la capacité des minéraux du sol considéré de libérer, par altération, des ions, alcalino-terreux en particulier.

4. L'ÉVALUATION DES RISQUES D'ALCALINISATION SECONDAIRE DANS LE CAS DES POLDERS DU LAC TCHAD

4.1. Conditions d'utilisation de la relation $Na/T = f(LF, SAR_{iw}, pH_c)$

Il a paru intéressant d'utiliser la relation (6) pour évaluer les risques d'alcalinisation secondaire que faisait courir aux sols argileux, humifères, très fertiles, des polders une irrigation avec des eaux modérément minéralisées, bonnes ou acceptables d'après la valeur de leur conductivité et de leur SAR, selon la méthode classique (1954), mais où l'anion bicarbonate est bien représenté. Les conditions locales d'utilisation de la relation (6) sont les suivantes :

— Dans les sols à irriguer, on observe à faible profondeur, vers 10 cm, et sur une épaisseur variable, 5 à 30 cm, un horizon riche en carbonate de calcium avec une teneur en carbonates totaux de 10 à 40 %. Cette réserve en carbonates alcalino-terreux est héritée d'une phase de sédimentation lacustre antérieure, et a été datée par le radiocarbène à 500 ans B.P. Les eaux d'irrigation seront donc en contact avec un horizon

dont le pH est de 8,3 - 8,4, ce qui justifie l'application du facteur de correction : $1 + (8,4 - \text{pH}_c)$.

— La relation (6) n'est par contre pas valable, et ne sera pas utilisée, pour les profils de sols de polders contenant du carbonate de sodium. Ces sols ont en effet un pH nettement supérieur à 8,4. Ces sols ne couvrent que des surfaces restreintes dans les deux polders que l'on projette d'irriguer.

— Les sols ne contiennent pas en quantités notables de minéraux altérables susceptibles de libérer aisément du calcium. Les facteurs correctifs de RHOADES, relation (7), n'ont par suite pas été pris en considération.

Deux cas assez distincts seront traités :

— irrigation avec les eaux du lac Tchad ;

— irrigation avec les eaux de la nappe phréatique que l'on envisage de pomper, localement et temporairement, pour alimenter le réseau.

Les calculs sont effectués en prenant en considération soit le calcium seul (pH_c) soit calcium + magnésium (pH_c^*) et en envisageant deux degrés de lessivage possible : $LF = 0,1$ (10 % des eaux apportées sont drainées) ou $LF = 0,25$. WILCOX a proposé en 1966 des tables permettant de calculer rapidement pH_c .

4.2. Utilisation pour l'irrigation des eaux du lac Tchad

L'analyse suivante rend compte du type de composition chimique de l'eau du lac Tchad dans la zone où il est prévu de la pomper : (en mé/l).

Ca^{++} : 0,56	HCO_3^- : 1,40
Mg^{++} : 0,36	Cl^- , SO_4^{--} : traces
K^+ : 0,13	
Na^+ : 0,36	

somme des cations : 1,41

$$\text{SAR} = \frac{0,36}{\sqrt{\frac{0,56 + 0,36}{2}}} = 0,53$$

$$\begin{aligned} \text{pK}'_2 - \text{pK}'_c &= f(\text{somme cations}) \\ &= 2,14 && 2,14 \\ \text{pCa}^{++} &= 3,55 \text{ ou } \text{p}(\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}) \approx 3,34 \\ \text{pAlK} &= 2,85 && 2,85 \\ \text{pH}_c &= 8,54 && \text{pH}_c^* = 8,33 \end{aligned}$$

L'index de LANGELIER $I = 8,4 - \text{pH}_c$ est donc légèrement négatif ou légèrement positif suivant que l'on considère pH_c (Ca) ou pH_c^* (Ca + Mg), mais dans ce second cas l'eau n'apparaît que très faiblement

incrustante. La relation (6) permet de calculer le SAR des eaux de drainage dans un tel sol :

$$\text{SAR}_{dw} = \frac{1}{\sqrt{LF}} 0,53 \cdot 1,07 = 1,1 \text{ pour } LF = 0,25$$

et 1,8 pour $LF = 0,1$.

D'après le raisonnement présenté précédemment, ce SAR est aussi celui de la solution du sol dans sa partie la plus salée et la plus alcaline. Le degré d'alcalinisation du sol peut alors être calculé par une relation du type (1) ou (2). Exemple avec $LF = 0,1$:

Relation (1) :

$$\text{Na}/T = \frac{100(-0,0126 + 0,01475 \cdot 1,8)}{1 + (-0,0126 + 0,01475 \cdot 1,8)} = 1,37\%$$

Relation (2) :

$$\text{Na}/T \% = 0,988 \cdot 1,8 - 0,61 = 1,17\%.$$

Dans le cas de ces eaux du lac Tchad, il y a donc convergence entre l'évaluation portée à partir du diagramme de 1954 (l'eau appartient à la classe C_1S_1 : conductivité et SAR bas) et celle selon la méthode de calcul plus longue présentée ici. Mais il n'en est pas toujours ainsi.

4.3. Utilisation pour l'irrigation d'eaux faiblement minéralisées de la nappe phréatique

Trois analyses d'eaux de la nappe, de salure croissante mais restant faible à modérés, seront présentées :

	Eau n° 1	Eau n° 2	Eau n° 3
Ca^{++}	2,4	5,3	4,1
Mg^{++}	0,8	1,6	2,8
K^+	0,3	0,35	0,8
Na^+	1,8	2,9	8,5
HCO_3^-	3,6	5,1	16,1
SO_4^{--}	2,0	5,9	0,2
Conductivité	0,51	0,92	1,65
SAR_{dw} pour $LF = 0,25$			
avec : pH_c	5,1	7	23,9
pH_c^*	5,4	7,3	26,2
SAR_{dw} pour $LF = 0,1$			
avec : pH_c	8	11	37,7
pH_c^*	8,5	11,5	41,2
Classification selon le diagramme de 1954	$C_2 S_1$	$C_3 S_1$	entre $C_3 S_1$ et $C_3 S_2$

Les données ioniques sont exprimées en mé/l ; la conductivité en mmhos · cm à 25° C.

Dans le diagramme classique de 1954, ces trois eaux appartenaient à la classe S_1 correspondant à un SAR bas, à un pouvoir alcalinisant réduit (l'eau n° 3 étant à la limite de la classe S_2). La relation tenant compte du facteur de correction semble indiquer que le risque d'alcalinisation évalué par le diagramme de 1954 est nettement sous-estimé, en particulier pour l'eau n° 3.

Pour cette eau, avec $LF = 0,1$ donc $SAR_{dw} = 41,2$, on peut calculer :

Relation (1) :

$$Na/T \% = \frac{100(-0,0126 + 0,01475 \cdot 41,2)}{1 + (-0,0126 + 0,01475 \cdot 41,2)} = 37,3 \%$$

Relation (2) :

$$Na/T \% = 0,988 \cdot 41,2 - 0,61 = 40,1 \%$$

Ces trois eaux de nappe se comporteront lors de l'irrigation comme des eaux « incrustantes ». Suivant les conditions de pompage, de temps de séjour dans le réseau, la précipitation des carbonates alcalino-terreux se produira soit dans les canalisations, soit dans le sol, et les eaux auront vis-à-vis du complexe absorbant du sol un pouvoir d'alcaliniser le sol plus fort que ne le laissait prévoir l'analyse chimique de l'eau. On doit en particulier renoncer à utiliser l'eau n° 3 à des fins d'irrigation dans un réseau.

5. LE ROLE DES EAUX DE CETTE MÊME NAPPE PHRÉATIQUE LORS DE LA PHASE DE REMONTÉE CAPILLAIRE (ALCALINISATION « PRIMAIRE »)

Les degrés d'alcalinisation des sols présentés au chapitre précédent étaient *calculés*. On les rapprochera de données *mesurées*, sur ces mêmes sols, lors de la phase de remontée capillaire à partir de la nappe et en absence d'irrigation. Contrairement à l'hypothèse de base qui avait permis l'établissement des relations (5) et (6), le régime salin du sol n'est pas alors stabilisé. En saison sèche, le régime hydrique est exudatif et les sels s'accumulent dans la partie supérieure des profils. Durant la courte saison des pluies, on peut observer un lessivage partiel des sels. Le bilan annuel et inter-annuel des sels est très variable suivant le secteur de

polder considéré et suivant la profondeur de la nappe en particulier.

Il n'est donc plus ici question de raisonner à l'échelle d'un profil, traversé dans son ensemble par des eaux bicarbonatées, comme dans le cas précédent, mais à l'échelle d'un horizon, plus ou moins proche du niveau de la nappe, donc plus ou moins directement touché par la remontée capillaire.

5.1. Méthode de travail

L'étude (CHEVERRY, 1969) porte sur 38 profils, avec des prélèvements effectués en saison sèche, dans la tranche de sol de 30 cm d'épaisseur immédiatement au-dessus de la nappe phréatique. A ce niveau des profils et en cette saison, la composition des eaux de la nappe jouera un rôle important sur la composition des solutions du sol.

Les déterminations sont faites sur des échantillons séchés à l'air, tamisés à 2 mm. Le sodium échangeable est calculé par différence entre le sodium extrait par une percolation à l'acétate d'ammonium à pH 7 et le sodium à l'extrait aqueux à saturation. La capacité d'échange est mesurée sur le même échantillon en saturant le sol par du chlorure de calcium, puis en déplaçant le calcium par du nitrate de potassium. Dans le percolat, le chlore est dosé.

Cette méthode, satisfaisante pour la détermination du sodium échangeable, risque de sous-estimer la capacité d'échange dans le cas de sols à pH élevé. En effet, si les cations absorbés à un pH élevé sont, eux, déplacés à pH 7, il n'y a pas pour cela absorption d'une quantité équivalente de Ca^{++} lors de l'échange ultérieur (KELLEY, 1957, cité par RUELLAN-DELETANG, 1967). Cette méthode permet cependant de s'attacher à l'allure du phénomène. Les sols étudiés ont une capacité d'échange de 30 à 60 mé/100 g de sol.

5.2. Relation entre le degré d'alcalinisation des horizons imprégnés par capillarité et la proportion de sodium dans l'eau de la nappe sous-jacente (fig. 3)

Dans la population des 38 profils considérés, la gamme de conductivité des eaux de la nappe s'étale de 0,2 mmhos/à 20 mmhos/cm⁻¹ à 25 °C, celle des valeurs du rapport Na/Somme des cations % de ces mêmes eaux de 5 à 92 %, celle du degré d'alcalinisation des sols, Na/T %, de 2 à 40 %. On note que :

— pour toutes les valeurs Na/S de la nappe inférieures à 60 %, le degré d'alcalinisation du sol est

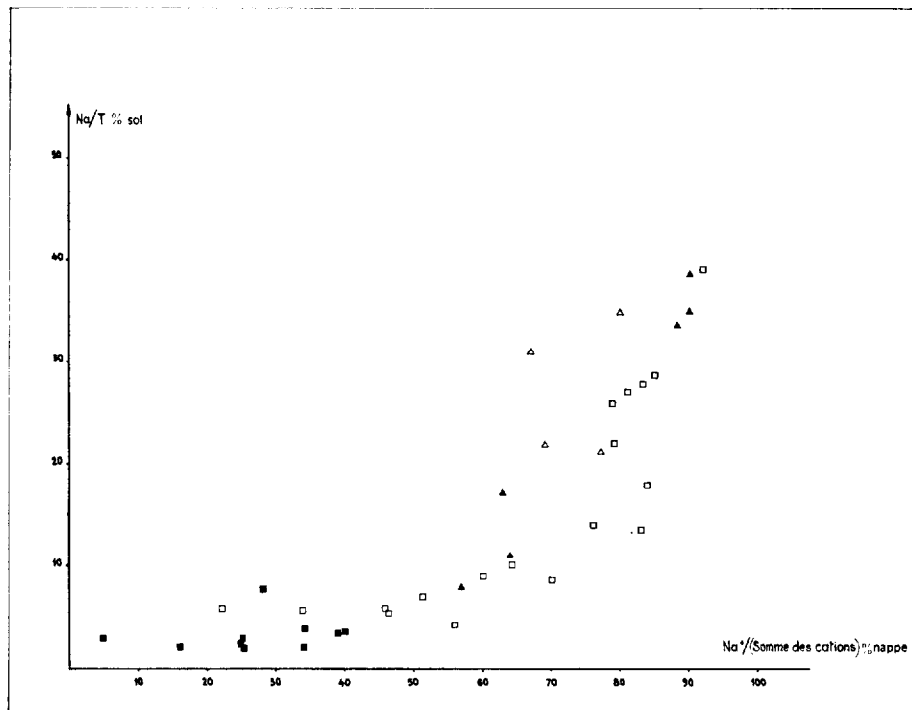


Fig. 3. — Relation entre le degré d'alcalinisation du sol et la proportion de sodium dans la nappe sous-jacente. Conductivité de la nappe en $\text{mmhos}\cdot\text{cm}^{-1}$: ■ $< 1,5$; □ $1,5 < L < 5$; ▲ $5 < L < 10$; △ > 10 .

faible, inférieur à 10 %. Ceci traduit le fait bien connu que l'énergie de rétention du calcium et du magnésium sur le complexe absorbant est élevée.

— les points ont tendance à s'ordonner en fonction de leur conductivité, de leur concentration saline globale. Ceci également est classique : dans des eaux à sulfates et bicarbonates, il y a augmentation simultanée de $(\text{Na}/\text{Somme cations})$ et de la conductivité, par suite des limites faibles de solubilité des sels de calcium correspondants.

— les points restent assez dispersés, en particulier pour les profils dont la nappe sous-jacente a une proportion de sodium supérieure à 60 %.

5.3. Rôle de l'anion auquel est associé le sodium dans les eaux de la nappe sur le degré d'alcalinisation des sols (fig. 4)

L'analyse de la figure 3 a été reprise par un autre biais, en utilisant la relation liant le SAR des solutions

du sol au degré d'alcalinisation, relation déjà citée (1) (US. Salinity Laboratory, 1954)

$$\text{Na}/T = \frac{100(-0,0126 + 0,01475 \text{ SAR})}{1 + (-0,0126 + 0,01475 \text{ SAR})} \quad (1)$$

Mais dans le cas présent, le *SAR des solutions du sol a été remplacé par le SAR de la nappe immédiatement sous-jacente*. Sur la figure 4, le Na/T ainsi calculé d'après la simple composition cationique de la nappe est représenté en fonction du Na/T réellement mesuré. On constate que :

— pour les valeurs de Na/T inférieures à 10 %, la valeur calculée est presque toujours inférieure à la valeur mesurée.

— pour les valeurs supérieures, les points se partagent en deux nuages de part et d'autre de la droite de pente 1. Le nuage des 11 points à Na/T réel supérieur à Na/T calculé est caractérisé par la forte dominance

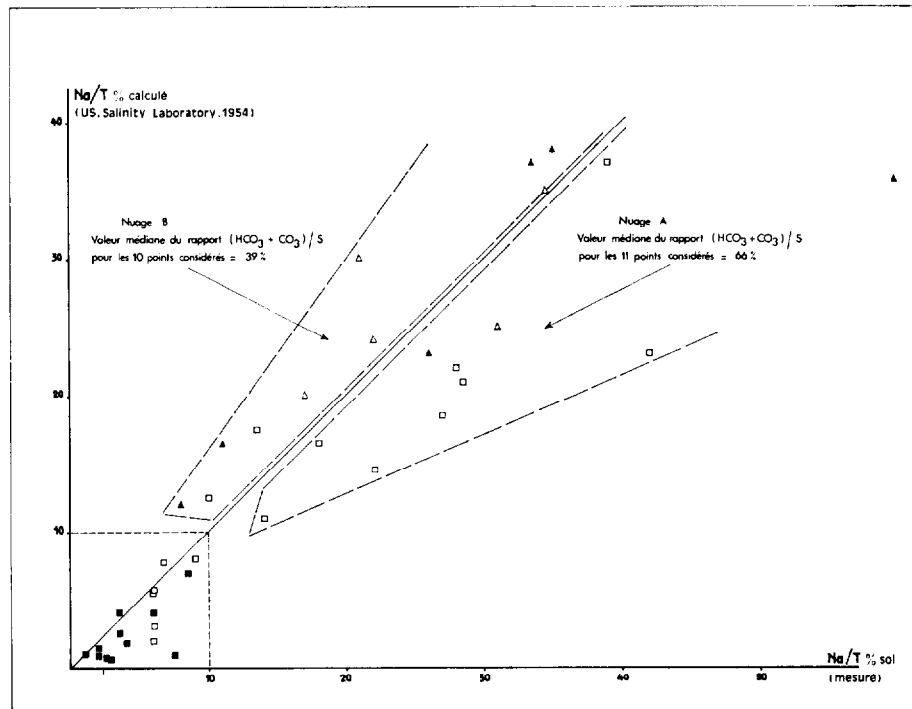


Fig. 4. — Comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées du degré d'alcalinisation du sol. Conductivité de la nappe en $\text{mmhos}\cdot\text{cm}^{-1}$: ■ $L < 1,5$; □ $1,5 < L < 5$; ▲ $5 < L < 10$; △ $L > 10$.

dans les eaux de la nappe des ions bicarbonates et carbonates (médiane du rapport $\text{HCO}_3 + \text{CO}_3/S$ = Somme anions en $\text{mé}/l = 66\%$). Le nuage des 10 points à Na/T réel inférieur à Na/T calculé est caractérisé au contraire par la dominance des ions sulfates sur les bicarbonates et carbonates [médiane $(\text{HCO}_3 + \text{CO}_3)/S = 39\%$], les chlorures étant très peu représentés.

— aucun des horizons de sols considérés ne contenait du carbonate de sodium, donc n'avait de pH supérieur à 8,5. Le risque de sous-estimer la capacité d'échange, risque évoqué au § 6.1., paraît donc réduit.

Il apparaît donc par ces résultats que les eaux de la nappe provoquent dans la tranche de sol directement imprégnée par la capillarité, et pour une même valeur du coefficient SAR, une alcalinisation plus forte lorsque les cations sont associés à l'anion bicarbonate que lorsqu'ils le sont à l'anion sulfate. Cette constatation rejoint les préoccupations de l'équipe de RIVERSIDE.

6. CONCLUSION : L'ALCALINISATION DE SOLS SOUMIS A L'ACTION D'EAUX BICARBONATÉES : REMARQUES SUR LE MODE D'APPROCHE COMMUN DU PROBLÈME

Le chapitre précédent met en évidence, dans le cas des polders de bordure du Lac Tchad, le risque de sous-estimer le pouvoir qu'ont les eaux de la nappe phréatique d'alcaliniser les horizons de sols touchés par la remontée capillaire, ceci lorsque l'on ne prend en considération que les caractéristiques cationiques de la nappe. Dans ce milieu argileux, très humifère (10 % de matière organique), favorable à une activité biologique « productrice de CO_2 », les eaux de la nappe, riches originellement en bicarbonates, sont en équilibre avec des pressions partielles de CO_2 assez élevées et peuvent localement se révéler « agressives » vis-à-vis des réserves en carbonates alcalino-terreux des sédiments.

Lors de la phase de remontée capillaire des solutions à travers le profil, plusieurs facteurs vont concourir à rendre ces eaux « incrustantes » et par suite plus dangereuses du point de vue de l'alcalinisation ; trois facteurs seront cités ; de la base vers la surface des profils :

— la pression partielle de CO_2 dans l'atmosphère du sol a tendance à diminuer, en fonction de la structuration de plus en plus développée des horizons, de l'influence grandissante de l'atmosphère proprement dite ; et ceci indépendamment de la localisation de l'enracinement.

— en saison sèche, la température du sol augmente de la nappe jusqu'à la surface du sol, soumise à une forte insolation. La solubilité du gaz CO_2 diminue et du carbonate de calcium précipite. PLET, (1970) a récemment précisé ce facteur par une expérimentation.

— les solutions se concentrent par évaporation et les produits de solubilité des carbonates alcalino-terreux sont les premiers atteints.

Le problème est donc de même nature que celui qu'a traité l'US. Salinity Laboratory de 1963 à 1968. Evidemment, la relation proposée, $\text{Na}/T = f(LF, \text{SAR}, \text{pH}_c)$ n'est pas transposable pour des sols fonctionnant en régime exudatif, non stabilisé. Un facteur équivalent à la « fraction lessivant », LF , devrait en effet tenir compte des cristallisations de

sels, éliminant certains ions des solutions du sol, et des apports en Ca^{++} et Mg^{++} par échange avec le sodium sur le complexe (JABER, 1970).

Par ailleurs, lorsque l'on raisonne à l'échelle d'un horizon, en régime de remontée capillaire, il n'est plus possible d'attribuer systématiquement à cet horizon un pH de 8,4. C'est le pH réel et *in situ* qui doit être pris en considération, ce qui n'a pu être fait dans la population des 38 horizons considérée ici. Le pH du sol séché à l'air enregistre déjà, en effet, la précipitation des carbonates alcalino-terreux.

Ces limites posées, il apparaît que le mode de raisonnement, le type de relation proposés par le laboratoire de Riverside pour traiter des problèmes d'irrigation, s'avèrent également intéressants pour le problème plus général de l'action d'eaux bicarbonatées sur des sols. En particulier, le facteur correctif proposé : $1 + (\text{pH}_{\text{sol}} - \text{pH}_c)$ apparaît comme très utile d'emploi en ce domaine.

Note.

Alors que cet article était sous presse, l'auteur a eu connaissance d'un article récent d'un membre de l'équipe de Riverside (Rhoades, J.D., 1972. Quality of water for irrigation ; *Soil Sci.*, 113, n° 4, 227) auquel il est conseillé de se référer pour avoir une vision synthétique du problème de la caractérisation des eaux d'irrigation.

Manuscrit reçu au S.C.D. le 26 juin 1972

BIBLIOGRAPHIE

- BABCOCK (K.L.), CARLSON (R.M.), SCHULZ (R.K.), OVERSTREET (R.), 1959. — A study of the effect of irrigation water composition on soil properties. *Hilgardia*, 29 : 155-164.
- BAZILEVICH (N.I.), PANKOVA (Ye I.), 1968. — Tentative classification of soils by salinity. *Soviet Soil Sci.*, n° 11 : 1477-1488.
- BOWER (C.A.), MAASLAND (M.), 1963. — Sodium hazard of Punjab ground waters. West Pakistan Engineering Congress Proc. : 49-61.
- BOWER (C.A.), WILCOX (L.V.), 1965. — Précipitation and solution of calcium carbonate in irrigation operations. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 29 : 93-94.
- BOWER (C.A.), WILCOX (L.V.), AKIN (G.W.), KEYES (Mary G.), 1965. — An index of the tendency of CaCO_3 to precipitate from irrigation waters. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 29 : 91-92.
- BOWER (C.A.), OGATA (G.), TUCKER (J.-M.), 1968. — Sodium hazard of irrigation waters as influenced by leaching fraction and by precipitation or solution of calcium carbonate. *Soil Sci.*, 106, n° 1 : 29-34.
- CHEVERRY (C.), 1968. — Rôle original de la pédogenèse sur la nature et le mode de l'accumulation saline dans certains milieux confinés en région subaride (Polders des bordures du lac Tchad) *Sci. Sol*, n° 2 : 33-53.
- CHEVERRY (C.), 1969. — Le genèse de sols salés à alcalis dans les polders des rives Nord-Est du Lac Tchad. *Agrokém. és Talajtan*, 18, supplémentum : 238-242.
- CHEVERRY (C.), 1969. — Salinisation et alcalinisation des sols des polders de Bol. Conséquences sur la fertilité et l'aptitude à l'irrigation de ces sols. ORSTOM, Centre de Fort-Lamy, 110 p. *multigr.*
- EATON (F.M.), 1950. — Significance of carbonates in irrigation waters. *Soil Sci.*, 69 : 123-133.
- GARRELS (R.M.), CHRIST (C.L.), 1967. — Equilibres des minéraux et de leurs solutions aqueuses. Gauthier-Villars, Paris, XVI, 336 p.
- GREFFARD (J.), 1970. — Equilibres carboniques et corrosion. *Bull. BRGM* (deuxième série), section III, n° 4 : 23-44.
- JABER (A.), 1970. — Contribution à l'étude expérimentale des mouvements, ascendant et descendant, des solutions de sel de sodium (carbonate, sulfate et chlorure) et de certains aspects de leur action physique, sur un sol soumis à l'influence d'une nappe peu profonde dans laquelle ils sont dissous. ORSTOM, Paris, II, 124 p. *multigr.*
- LANGELIER (W.F.), 1936. — The analytical control of anticorrosion water treatment. *J. Amer. Water Works Ass.*, 28 : 1500-1521.

- PLET (C.), 1969. — Introduction à l'étude expérimentale de la formation des encroûtements. Application au cas des encroûtements gypseux. (Thèse 3^e cycle, Sc. Paris, 1969) S.P., 74 p. *multigr.*
- PRATT (P.F.), BRANSON (R.L.), CHAPMAN (H.D.), 1960. — Effect of crop, fertilizer and leaching on carbonate precipitation and sodium accumulation in soil irrigated with water containing bicarbonate. Intern. Congr. Soil Sci., 1960. Madison, vol. 2 : pp. 185-192.
- RHOADES (J.D.), KRUEGER (D.B.), REED (M.J.), 1968. — The effect of soil - mineral weathering on the sodium hazard of irrigation waters. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 32, 5 : 643-647.
- RHOADES (J.D.), 1968. — Leaching requirement for exchangeable sodium control. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 32 : 652-656.
- RHOADES (J.D.), 1968. — Mineral-weathering correction for estimating the sodium hazard of irrigation waters. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 32 : 548-652.
- RUELLAN (A.), DELETANG (J.), 1967. — Les phénomènes d'échange de cations et d'anions dans les sols. Init. Doc. tech. ORSTOM, n° 5, Paris, 123 p.
- TANJI (K.K.), DONEEN (L.D.), FERRY (G.V.), AYERS (R.S.), 1972. — Computer simulation of salt-affected soils in San Joaquin Valley. California. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, 36 : 127-133.
- TUNISIE, 1970. — Recherche et formation en matière d'irrigation avec des eaux salées, 1962-1969. Rapport technique. Unesco, Paris. UNESCO UNDP (SF), TUN 5, PARIS, 243 p. *multigr.*
- United States Salinity Laboratory Staff, 1954. — Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. U.S. Dept. Agric. Handb. 60, Wahington, VIII-160 p.
- WILCOX (L.V.), BLAIR (Y.), BOWER (C.A.), 1954. — Effect of bicarbonate on suitability of water for irrigation, *Soil. Sci.*, 77 : 259-266.