

SMSS : un logiciel de simulation du mouvement de sels dans le sol

M. Lahlou, M. Badraoui et B. Souidi

Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, B.P. 6202, Rabat-Instituts, Rabat MAROC

RÉSUMÉ

La dégradation de la qualité des sols et des eaux constitue un danger sérieux pour la durabilité des systèmes irrigués. Pour prévenir cette dégradation, il est devenu absolument nécessaire de développer des modèles de simulation en vue d'évaluer les effets à long terme des pratiques agricoles modernes sur la qualité des sols et des eaux. Le modèle de simulation du mouvement des sels dans le sol développé par Laudelout et al. (1994) a été repris sous forme d'un programme informatique plus simple d'utilisation sous l'environnement Windows. Le modèle postule un mouvement de l'eau à régime constant à travers un sol partiellement saturé. Il prédit les effets des doses d'irrigation sur la concentration des effluents et sur la distribution de la salinité dans le sol. La modélisation de la salinisation et / ou la sodification des sols suite à l'apport d'eau d'une qualité donnée fait intervenir (1) les équilibres physico-chimiques du sol ; (2) l'échange ionique qui s'opère entre la solution du sol et le complexe argilo-humique ; et (3) les mouvements des solutés dans le sol. La description du modèle et de son logiciel d'application constitue l'objet de cet article.

Mots clés

Modélisation, salinité, alcalinité, échange ionique, mouvement des solutés, logiciel.

SUMMARY

A SOFTWARE OF SIMULATION OF SALT MOVEMENT IN THE SOIL

Soil and water quality degradation following irrigation is a serious danger for the sustainability of agricultural production in arid and semi-arid regions. Thereby, it has become absolutely necessary to develop simulation models in order to evaluate the long-term effects under intensive cropping. The model developed by Laudelout et al. (1994) was rewritten under Windows environment in the form of an easier program for the users. The model assumes the movement of the water in constant regime through a partially saturated soil. It predicts the effects of irrigation on the concentration of the effluents and the distribution of salts in the soil. The modeling of salinization and / or alcalinisation of the soil following the irrigation with a water of given quality takes into consideration (1) soil physic-chemical equilibrium, (2) ionic exchange that operate between the solution of the soil and the surface charge, and (3) movements of salts with the soil solution. The description of the model and its software of application are presented in this paper.

Key-words

Modeling, salinity, Alkalinity, ion Exchange, solute Movement, software.

RESUMEN

SMSS : UN PROGRAMA DE SIMULACIÓN DEL MOVIMIENTO DE LAS SALES EN EL SUELO.

La degradación de la calidad de los suelos y de las aguas constituye un peligro serio por la sostenibilidad de los sistemas de irrigación. Para prevenir esta degradación, es necesario desarrollar modelos de simulación para evaluar los efectos a largo plazo de las prácticas agrícolas modernas sobre la calidad de los suelos y de las aguas. El modelo de simulación del movimiento de las sales en el suelo desarrollado por Laudelout et al. (1994) se utilizó en forma de un programa informático más simple bajo Windows. El modelo postula un movimiento del agua en régimen constante a través de un suelo parcialmente saturado. Este predice los efectos de las dosis de irrigación sobre la concentración de las soluciones y sobre la distribución de la salinidad en el suelo. La modelización de la salinización y / o de la sodización de los suelos seguida al aporte de agua de una calidad dada hace intervenir (1) los equilibrios físico-químicos del suelo; (2) el intercambio iónico que se opera entre la solución del suelo y el complejo arcillo-húmico; (3) y los movimientos de las soluciones en el suelo. La descripción del modelo y de su programa de aplicación constituye el objetivo del artículo.

Palabras claves

Modelización, salinidad, alcalinidad, intercambio iónico, movimiento de soluciones, programa informático

Dans les zones arides et semi-arides du Maroc, la salinisation suite à l'irrigation est le processus de dégradation des sols le plus rapide (Laudelout et Chiang, 1995; Badraoui et al., 1998). On distingue deux types de problèmes de salinité très différents, ceux qui sont associés à la salinité totale et ceux qui sont associés au sodium (sodicité). Les sols peuvent être affectés soit par la salinité ou par la combinaison de la salinité et de la sodicité (S.W.T.L. 1998).

La salinité de l'eau d'irrigation est habituellement mesurée par le TDS (total des sels dissous) ou la CE (Conductivité Électrique). Cette conductivité électrique est fonction de la garniture ionique de l'extrait de la pâte saturée. Plusieurs relations ont été proposées pour estimer la CE à partir des mesures de concentrations des éléments en solution. A titre d'exemples, citons celle de Richard (1954) :

$$CE \approx \frac{[Ca^{++}] + [Mg^{++}] + [Na^+]}{10} \quad [] : \text{még/l} \quad (1)$$

ou celle de McNeal et al. (1970) :

$$\begin{aligned} CE \approx & ((0.05641*[Ca]^{0.9202} + 0.05099*[Mg]^{0.9102} \\ & + 0.04748*[Na]^{0.9495} + 0.07263*[K]^{0.9706} \\ & + 0.06900*[SO_4]^{0.8973} + 0.07330*[CO_3]^{0.8719} \\ & + 0.04143*[HCO_3]^{0.9501} + 0.07206*[CL]^{0.9671} \\ & + 0.11330*[(Ca+Mg)SO_4]^{0.8463} \\ & + 0.07206*[EN]^{0.9671}) + I(0.013)/2 \end{aligned} \quad (2)$$

Avec :

$$\begin{aligned} [] : & \text{ még/l;} \\ |EN| : & \text{ valeur absolue de l'électroneutralité;} \\ I : & \text{ force ionique} \quad I = \left(\sum m_i Z_i^2 \right) / 2 \quad (3) \\ Z_i : & \text{ est la charge de l'espèce chimique } i; \\ m_i : & \text{ molarité de l'espèce chimique } i; \end{aligned}$$

ou encore celle de Griffin and Jurinak (1973) qui a établi une relation linéaire entre la force ionique I et la conductivité électrique CE :

$$I \approx 0.013 \times CE \quad (4)$$

La sodicité est habituellement exprimée en termes de SAR (taux d'adsorption du sodium) ou de ESP (Pourcentage de Sodium Échangeable). Le SAR représente la proportion relative du sodium par rapport au calcium et magnésium. Ces deux cations tendent à contrecarrer l'effet dispersif du sodium.

L'irrigation avec une eau de SAR élevé tend à dégrader la

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{++}] + [Mg^{++}]}{2}}} \quad [] : \text{még/l} \quad (5)$$

structure physique du sol. Quand le sol est sec, il devient alors dur et compact et de plus en plus imperméable à l'eau. Les sols à texture fine, spécialement ceux avec une haute teneur en argile gonflante, sont plus sensibles à ce problème.

Le taux de sodium échangeable est défini par la relation : avec :

$$ESP = \frac{[Na^+]}{CEC} \times 100 \quad (6)$$

[Na⁺] : sodium adsorbé en még/100 g de sol.

CEC : capacité d'échange cationique en még/100 g de sol.

THÉORIE

Les bases de la modélisation de la salinisation et de la sodification des sols, suite à l'apport d'eau d'une qualité donnée, ont été présentées par Laudelout et al. (1994) et Laudelout et Chiang (1995). La démarche suit les étapes schématisées dans la figure 1 : (i) les équilibres physico-chimiques entre les différentes espèces présentes dans le sol, (ii) l'échange ionique s'opérant entre la solution du sol et les colloïdes à charge négative (argiles) et (iii) les mouvements des solutés dans le sol.

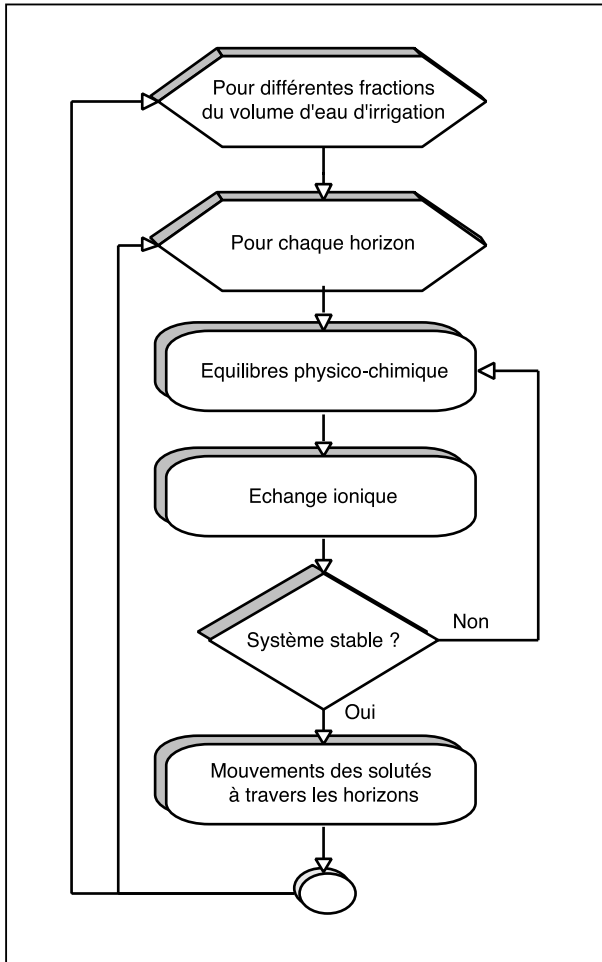
Équilibres Physico-chimiques

Le calcul des équilibres physico-chimiques dans le sol doit prendre en compte toutes les réactions d'échange cationique, de précipitation et de solubilisation du gypse et de la calcite. En supposant que les divers équilibres impliqués dans ces réactions soient atteints, on pourra calculer la concentration des divers ions qui se trouvent dans la solution du sol et définir ainsi le milieu ionique auquel seront exposées les racines de la plante ainsi que la composition qui va quitter les couches superficielles du sol.

Il est nécessaire d'alterner l'utilisation des activités pour l'application des conditions d'équilibres et l'utilisation des concentrations pour l'application des équations de conservation de masse (Laudelout et al., 1994). Le passage des concentrations aux activités (ou vice-versa) se fera par l'utilisation des coefficients d'activité. Ces derniers seront calculés soit par la relation de Davis (Butler, 1964) qui est dérivée de la loi de Debye et Hückel élargie (Garels and Christ, 1965) :

Figure 1 - Ordinoigramme de simulation du processus de salinisation et de sodification des sols suite à une irrigation par une eau d'une qualité donnée.

Figure 1 - Schematic representation of the simulation process of salinization and sodification of soils due to irrigation with a given water quality.



A : constante qui vaut 0.511 ;
 B : constante qui vaut 0.33 ;
 a_i : est un paramètre propre à l'ion (rayon hydraté).

Les espèces chimiques prises en considération dans les calculs des équilibres physico-chimiques sont : la pression partielle de CO₂ ou pH, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺, Cl⁻, SO₄²⁻.

Les paires d'ions et leurs constantes de stabilité correspondantes prises en compte sont données dans le tableau 1 (log décimal de la valeur à 25 °C sous 1 atmosphère et à force ionique infiniment faible).

Le schéma des équilibres physico-chimiques utilisé est le suivant :

Étape 1 :

Équilibrage des espèces chimiques suivantes :

- (a) Mg⁺⁺ + SO₄²⁻ MgSO₄
- (b) Mg⁺⁺ + CO₃²⁻ MgCO₃
- (c) Ca⁺⁺ + SO₄²⁻ CaSO₄
- (d) Ca⁺⁺ + CO₃²⁻ CaCO₃
- (e) H⁺ + HCO₃⁻ H₂CO₃
- (f) 2H⁺ + CO₃²⁻ H₂CO₃

Étape 2 :

Équilibrage du gypse : en fonction de la quantité de gypse solide présent et de la concentration de CaSO₄ résultante de l'équation (c), on réajuste ces quantités en fonction du produit de solubilité du gypse.

Étape 3 :

Équilibrage de la calcite : en fonction de la quantité de calcite solide présente et de la concentration en CaCO₃ résultante de l'équation (d), on réajuste ces quantités en fonction du produit de solubilité de la calcite.

Étape 4 :

Si après équilibrage du gypse et de la calcite les concentrations de CaSO₄ et de CaCO₃ ont changé de façon

Relation de Davis (I• 0.5) :

$$-\log(\gamma_i) = Az_i^2 \left(\frac{\sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}} - 0.3I \right) \quad (7)$$

Loi de Debye et Huncel élargie :

$$-\log(\gamma_i) = \frac{Az_i^2 \sqrt{I}}{1 + a_i BI} \quad (8)$$

avec :

I : la force ionique

Z_i : est la charge de l'espèce chimique i ;

Tableau 1 - Constantes de stabilité des principales paires d'ions (Stumm et Morgan, 1981)

Table 1 - Stability constants of the main ion pairs (Stumm et

Ion	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	SO ₄ ²⁻
Na ⁺	-0,3	0,77	0,70
K ⁺	-	-	0,85
Mg ⁺⁺	0,69	2,88	2,23
Ca ⁺⁺	1,0	3,15	2,31
H ⁺	6,35	10,33	2,00

appréciable, alors on retourne à l'étape 1 pour rééquilibrer les différentes espèces chimiques; sinon on passe à l'étape 5.

Échange ionique

Étape 5 :

Équilibre d'échange ionique où on considère les échanges suivants :

- (a) l'échange entre Ca^{++} et Mg^{++} .
- (b) l'échange entre Na^+ et la somme des divalents Ca^{++} et Mg^{++} ;

Les coefficients de sélectivités relatifs à ces réactions d'échange doivent être déterminés en fonction de la garniture du complexe d'échange en sodium. Des relations polynomiales de 3^{ème} degré sont généralement utilisées à cet effet (Laudelout et al., 1994; Aniba, 1997)

Étape 6 :

Si l'évolution de la concentration de Ca^{++} est supérieure à une valeur critique (0.01 %), le système n'est pas encore stable. Alors on retourne à l'étape 1 pour rééquilibrer les différentes espèces chimiques. Sinon on considère que le système est équilibré et on obtient ainsi la composition à l'équilibre de l'horizon étudié.

Mouvements des solutés dans le sol

Le mouvement des solutés à travers le sol se fait, soit par diffusion dans sa solution, soit par transport convectif par l'eau qui percole à travers le profil. Ce mouvement de l'eau peut être à vitesse constante ou, le plus souvent, variable. Le soluté peut réagir avec la phase solide du sol dans des réactions de solubilisation, de précipitation ou d'échange ionique.

Le programme procède au calcul de la modification de la composition de la solution du sol lors de son passage à travers le profil, mais à chaque nœud du maillage établi on procède à une rééquilibration de la concentration de la solution. Le principe mis en œuvre dans cette programmation réside en une simple solution numérique de diffusion avec convection.

L'équation générale de diffusion par convection, lorsque D et v sont indépendants de x , est la suivante (Laudelout et al. 1994) :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x} \quad (9)$$

avec :

- c : concentration de la solution à la distance x ;
- D : coefficient de diffusion;
- t : temps;
- v : la vitesse de déplacement de l'eau dans les pores;
- x : coordonnée dans une section droite d'une colonne de sol comptée du haut en bas.

Cette équation peut être réécrite en utilisant des variables adimensionnelles que nous définissons ci-dessous :

$$\zeta \text{ La longueur réduite : } X = \frac{x}{L}$$

où L est la longueur d'une colonne de sol.

$$\zeta \text{ Le temps réduit : } N = \frac{vt}{L} = \frac{Vt}{\phi L}$$

équivalent au nombre de volumes poreux qui ont traversé la colonne de longueur L et de porosité ϕ , au temps t .

$$\zeta \text{ Le nombre de Péclet ou de Brenner } P = \frac{vL}{4D}$$

$$\zeta \text{ La concentration réduite : } C = \frac{c}{c_0}$$

La forme la plus générale est $C = \frac{(c - c_i)}{(c_0 - c_i)}$ avec :

c_i : concentration initiale dans la colonne de sol, et c_0 la concentration du soluté à l'entrée de la colonne. Cette expression évite de redéfinir la concentration réduite comme si c est nul à $t=0$. On a ainsi, si c_0 n'est pas fonction de x :

$$\frac{\partial C}{\partial N} = \frac{1}{4P} \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} - \frac{\partial C}{\partial X} \quad (10)$$

Le programme utilise la solution numérique de cette équation (Laudelout et al., 1994) :

$$C_{i,j} = \frac{1}{2} [C_{i,j-1} + C_{i-1,j}] \quad (11)$$

où :

ζi indique l'indice espace,

ζj indique l'indice temps.

PRÉSENTATION DU LOGICIEL

Classes et procédures

Sur la base du modèle présenté et des solutions numériques retenues on a élaboré un logiciel de simulation de la salinisation et de la sodification des sols suite à l'apport d'une quantité d'eau de qualité donnée. Ce logiciel a été développé avec le langage "Pascal" sous l'environnement "Windows 95". A la base du logiciel nous avons défini trois classes d'objets. La première classe nommée "Région" désigne un objet qui représente une région donnée et qui contient la liste des profils de sols étudiés.

La deuxième classe nommée "Profil" désigne un objet qui représente un profil donné et contient la liste des horizons étudiés; en plus il contient une propriété en lecture seule et qui indique si le profil a atteint un niveau de salinité et / ou de sodicité donné.

Figure 2 - Fenêtre d'exécution du programme SMSS*

Figure 2 - Window for executing SMSS program

* : Nom du logiciel : Simulation du Mouvement des sels dans le Sol (SMSS)

La troisième classe nommée "Horizon" désigne un objet qui représente un horizon donné et contient les composantes suivantes : la procédure "Init" d'initialisation qui initialise les propriétés d'un horizon donné, la procédure "Équilibre" d'équilibre physico-chimique et d'échange ionique s'opérant dans l'horizon en cours et enfin la procédure "Mouvement" de simulation de la diffusion avec convection de la solution dans le sol.

Ainsi le programme peut traiter plusieurs profils à la fois, et pour chaque profil, effectuer des simulations sur l'ensemble de ses horizons. Cette technique nous permet par la suite d'établir des cartes d'évolution de la salinisation et / ou de la sodification pour une région donnée, en assimilant plusieurs points géo-référencés à des profils.

Utilisation du Programme

Le programme se présente sous forme d'une fenêtre (figure 2) comportant 6 pages, les quatre premières pour entrer les données et la dernière pour afficher les résultats :

Page 1 : Information : accepte un texte qui servira de titre pour les sorties.

Page 2 : Paramètres : accepte les paramètres suivants :

- (a) Produit de solubilité de Gypse.

- (b) Produit de solubilité de la Calcite.

- (c) Constante de sélectivité $\text{Ca}^{++} - \text{Mg}^{++}$.

- (d) Coefficients de la régression polynomiale (d'ordre 3) du coefficient de sélectivité $\text{Na}^{+} - \text{Divalent}$ sur la fraction de divalent adsorbé.

- (e) Nombre de couches théoriques.

- (f) Option de calcul :

- ½ Simulation pour un volume d'eau d'irrigation exprimé en nombre de volumes poreux.

- ½ Calcul du volume d'eau nécessaire pour atteindre un seuil de Conductivité électrique et / ou de ESP (sodicité) données.

Page 3 : Eau d'irrigation : accepte les paramètres suivants :

- (a) La pression partielle de CO_2 (ATM) ou le pH de l'eau.

- (b) La concentration de Ca^{++} en méq/l.

- (c) La concentration de Mg^{++} en méq/l.

- (d) La concentration de Na^{++} en méq/l.

- (e) La concentration de Cl^{-} en méq/l.

- (f) La concentration de SO_4^{-} en méq/l.

Page 4 : Horizons : accepte le paramètre global suivant :

- (a) L'unité de mesure de la solution du sol :

½ méq/l;

½ ou meq/100 g.

Et pour chaque horizon les paramètres suivants :

- (b) Le nombre de couches.
- (c) rapport sol sec/solution en g/l.
- (d) La pression partielle de CO₂ (ATM) ou le pH de la solution.
- (e) Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺, Cl⁻, SO₄^{- -} en solution.
- (f) Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺ adsorbés sur le complexe d'échange en meq/100 g.
- (g) Le contenu en Gypse et Calcite en meq/100 g.

Page 5 : Résultats : page où s'affiche les résultats.

Page 6 : Graphique : page où s'affichent les graphiques montrant par horizon l'évolution de la conductivité électrique, de l'ESP et du SAR.

Le programme offre aussi un système de menus pour effectuer diverses opérations :

ζ Fichier :

- ρ Nouveau : annule les données en cours.
- ρ Ouvrir : ouvre un fichier de données.
- ρ Sauver données : sauvegarde les données en cours.
- ρ Sauver Résultats : sauvegarde sous forme de fichier texte les résultats obtenus.

ζ Saisie des données : permet d'accéder à une page de données.

ζ Calculs : lance les procédures d'initialisations et de calculs.

ζ Graphiques : ouvre une autre fenêtre d'affichage graphique.

ζ Fin : termine l'application.

Exemple d'utilisation

Le Tadla est une des régions d'agriculture irriguée du Maroc, elle dispose d'un périmètre irrigué à l'eau du barrage Bine AL Ouidane (peu chargée en sels) ou utilisant l'eau de nappe (plus chargée en sels) (tableau 2). L'exemple suivant

illustre l'utilisation de ce modèle pour comparer l'impact de l'irrigation avec les deux types d'eaux sur le sol. L'unité du volume d'eau d'irrigation utilisé est le volume poral (VP). 1 VP correspond à la quantité d'eau nécessaire pour remplir le réservoir sol. Nous avons sélectionné une simulation avec 7 VP qui correspond en général à l'équivalent des irrigations qui s'effectuent durant une campagne agricole.

Paramètres généraux.

Produit de solubilité du Gypse=4,8 (Laudelout et al., 1994)

Produit de solubilité de la Calcite=8,4(Laudelout et al., 1994)

Constante de sélectivité Ca-Mg=1 (Badraoui 1998)

Coefficients de la régression polynomiale du coefficient de sélectivité 'Na-divalent' sur la fraction de divalents adsorbés : $-11.5+X*328.1-X^2*1910+X^3*3674.4$ (Aniba K. 1997)

Nombre de couches théoriques=5. La composition initiale de chaque horizon est reportée dans le tableau 3.

Résultats de la simulation

Les résultats de la simulation sont illustrés dans les figures 3 et 4 et dans le tableau 4. Ils montrent que l'irrigation avec l'eau de barrage tend à améliorer la salinité et la sodicité du sol (baisse de la conductivité électrique de ESP et du SAR). Par contre, l'irrigation avec l'eau de la nappe augmente la salinité

Tableau 2 - Composition brute de l'eau d'irrigation

Table 2 - Composition of the irrigation water

	Eau de barrage	Eau de la nappe
pH	8,6	7,4
Ca ⁺⁺ (méq/l)	2,4	14,4
Mg ⁺⁺ (méq/l)	1,4	22,6
Na ⁺ (méq/l)	1,2	21,5
Cl ⁻ (méq/l)	2,25	23,0
SO ₄ ^{- -} (méq/l)	0,20	26,0

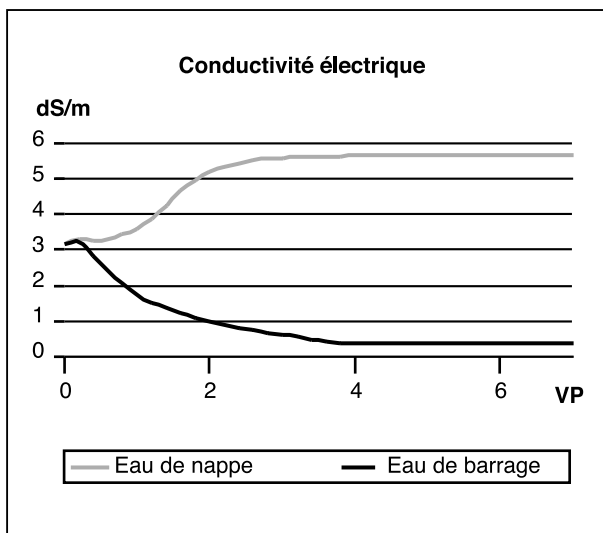
Tableau 3 - Composition brute des horizons du sol

Table 3 - Total composition of the soil horizons

Horizon	Nb	Rapp.	pH	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ^{- -}	Ca surface	Mg surface	Na surface		
Gypse	Calcite												
	couches	Sol sec/	solution	solution	solution	solution	(méq/100 g)	(méq/100 g)	(méq/100 g)	(méq/100 g)	(méq/100 g)	(méq/100 g)	
		solution	(méq/100 g)	(méq/100 g)	(méq/100 g)	(méq/100 g)	(méq/100g)	(méq/100g)					
1	1	8,4	2326	2,62	1,38	5,2	4,5	2,7	21,2	11,2	1,0	0	271,4
2	1	8,3	2128	3,0	6,0	8,1	11,0	4,7	20,8	5,2	1,2	0	289
3	1	8,2	2128	9,0	9,0	10,7	18,0	8,3	14,4	18,4	2,0	0	377,6
4	1	8,2	1370	12,75	17,25	12,8	17,5	21,9	17,6	4,0	2,6	0	560,6

Figure 3 - Évolution de la conductivité électrique en fonction du volume d'eau d'irrigation.

Figure 3 - Evolution of the electrical conductivity as a function of irrigation water volume.



du sol (augmentation de la conductivité électrique) tout en diminuant sa sodicité (diminution de la sodicité).

CONCLUSION

L'objectif ultime de cette étude est de développer un système expert sur le problème de la salinisation et de la sodification des sols. Ce système expert devrait être capable de mesurer les risques de dégradation des sols à moyen et à long terme en fonction des doses d'irrigations avec une eau d'une qualité donnée.

Le modèle développé jusqu'à présent peut servir pour des besoins didactiques et pour réaliser des prédictions du devenir de la qualité du sol sous aménagement hydro-agricole. Toutefois, certaines améliorations sont à envisager afin d'augmenter la précision du modèle. Nous citons à titre d'exemple quelques-unes de ces améliorations :

ζ Ajout d'une équation d'estimation des coefficients de sélectivité en fonction de la composition du sol en minéraux argileux et de la température.

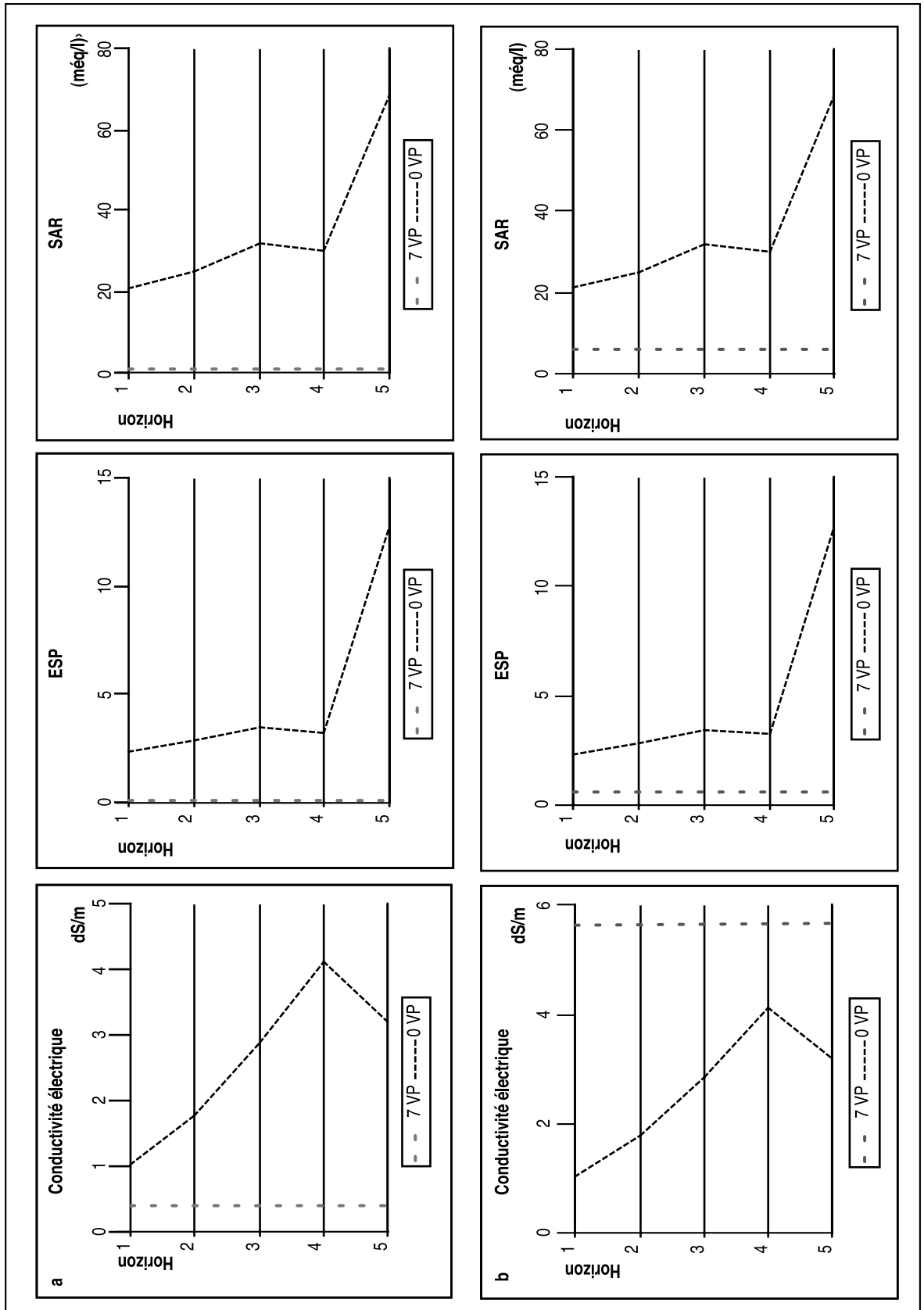
ζ Inclure l'effet de la température sur la solubilité des

Tableau 4 - Tableau de sortie du programme. Évolution des paramètres de sol après un apport de 7 volumes poraux.

Table 4 - Output table of the program. Evolution of the soil parameters after supplying 7 pore volumes.

		Solution (méq/l)				Bases échangeables (méq/100 g)									
Horizon	CE	ESP	SAR		pH	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺		Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	Gypse
Calcite	(dS/m)		(méq/l)											(%)	(%)
Avant irrigation															
1	1,03	2,36	21,11	8,4	0,36	0,1	10,09	4,5		2,7	21,36	11,26	0,79	0	0,58
2	1,77	2,86	25,02	8,3	0,79	0,14	17,07	11,0		4,7	20,95	5,48	0,78	0	0,68
3	2,87	3,42	31,83	8,2	0,87	0,68	27,95	18,0		8,3	14,82	18,79	1,19	0	0,89
4	4,12	3,23	30,0	8,2	2,49	0,67	37,7	17,5		21,9	18,21	5,21	0,78	0	2,05
5	3,19	12,71	68,46	8,4	0,4	0,06	32,57	9,5		17,4	15,8	4,98	3,02	0	1,93
Irrigation avec eau de barrage															
1	0,41	0,09	1,09	8,4	1,59	0,82	1,2	2,25		0,2	21,03	12,34	0,03	0	0,57
2	0,41	0,09	1,09	8,3	1,93	0,48	1,2	2,25		0,2	21,19	5,99	0,02	0	0,65
3	0,41	0,1	1,09	8,2	1,27	1,15	1,2	2,25		0,2	16,74	18,03	0,03	0	0,84
4	0,41	0,09	1,09	8,2	1,82	0,59	1,2	2,25		0,2	17,83	6,35	0,02	0	2,03
5	0,41	0,1	1,09	8,4	1,94	0,47	1,2	2,25		0,2	18,54	5,23	0,02	0	1,82
Irrigation avec eau de nappe															
1	5,65	0,57	5,73	8,4	9,42	18,76	21,5	23		26	11,28	21,93	0,19	0	0,79
2	5,66	0,59	5,73	8,3	13,88	14,29	21,5	23		26,01	13,78	13,26	0,16	0	0,68
3	5,67	0,6	5,73	8,2	15,09	13,08	21,5	23		26,01	18,37	16,22	0,21	0	0,88
4	5,67	0,59	5,73	8,2	16,15	12,01	21,5	23		26,01	13,67	10,39	0,14	0	2,05

Figure 4 - Évolution des paramètres de salinité après un apport de 7 volumes poreux d'eau du barrage (a) ; 7 volumes poreux d'eau de nappe (b)
 Figure 4 - Evolution of salinity parameters after supplying 7 water pore volumes from : the dam (a) and the ground water (b)



espèces chimiques telles que le gypse et la calcite.

ζ Prendre en considération les remontées capillaires dans le cas de sols à drainage déficient.

ζ Prendre en compte le système sol-plante dans le bilan des sels, en particulier l'absorption du sodium (Na^+), du calcium (Ca^{++}) et du magnésium (Mg^{++}) par les cultures.

ζ Prendre en compte l'évapotranspiration dans le bilan d'eau.

BIBLIOGRAPHIE

- Aniba K., 1997 – Effet de l'irrigation sur la salinisation des sols dans le périmètre irrigué des Doukkala. Mémoire de troisième cycle, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, 113 p.
- Badraoui M., Soudi B., Merzouk A., Farhat A. et Mhamdi A., 1998 - Changes of soil qualities under pivot irrigation in Bahira region of MOROCCO : Salinization. *Advances in Geocology* 31, 503-508
- Badraoui M., 1998 – Notes de cours, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II.
- Butler J. N. 1964 – Ionic equilibrium, A mathematical approach. Addison-Wesley Co., Reading Mass. P. 438.
- Garrels R. M. and Christ C. H. 1965 – Solutions minerals, and equilibria. Harper and Row, New York. Chapter 2.
- Griffin R. A. and Juinak J. J., 1973 – Estimation of activity coefficients from the electrical conductivity of natural aquatic systems and soil extracts. *Soil Sci.* 116 : 26-30.
- Laudelout H. et Chiang C., 1995 - Modélisation du mouvement des sels dans les sols du Maroc. *Homme Terre et Eaux*, Vol. 25, 100 : 57-61.
- Laudelout H., Cheverry C. et Calvet R. 1994 - Modélisation Mathématique Des Processus Pédologiques, Actes Éditions, 264p.
- McNeal B. L., Oster J. D., and Hatcher J. T., 1970 - Calculation of electrical conductivity from solution composition data as an aid to in-situ estimation of soil salinity. *Soil Sci.* 110 : 405-414.
- Richard L., 1954 – Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USSL., USDA, Handbook 60.
- Stumm W. et Morgan J.J, 1981 – Aquatic Chemistry. An introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters. 2nd Edition, John Wiley et sons, 780 p.
- The Soil and Water Testing Lab (S.W.T.L.), 1998 - Irrigation water quality standards and salinity management. Site Web, Texas A&M University, <http://agnews.tamu.edu/drought/drghtpak/salinity.htm>