

Modélisation des transferts d'eau et de solutés dans l'étude des processus de dégradation des sols irrigués dans les régions soudano-sahéliennes

Claude HAMMECKER (1)

(1) IRD, Laboratoire de Pédologie, BP 1386, Dakar, Sénégal

RESUME

Le risque de salinisation et /ou d'alcalinisation est toujours concomitant à l'irrigation des sols dans les régions soudano-sahéliennes. Cependant, l'évolution de ce phénomène de dégradation des sols étant souvent lente, le recours à la simulation numérique est souvent nécessaire pour essayer de prévoir l'évolution d'un système eau-sol dans le cadre de l'agriculture irriguée sur une période décennale. Dans la vallée du fleuve Sénégal, la variété de conditions physico-chimiques rencontrées est très vaste. L'usage de modèles numériques a permis dans certains cas de définir le type de dégradation auquel les sols sont soumis et de définir les conditions hydriques (niveau de la nappe, fréquence d'irrigation) qui influent directement sur cette évolution. Dans la vallée du fleuve Sénégal, les simulations numériques indiquent en général la présence d'un processus de salinisation et écartent tout risque d'alcalinisation. Cependant, on voit aussi en particulier dans le cas de Donaye, que l'écart entre les résultats expérimentaux et simulés est important. En effet, l'évolution saline du milieu sur ces sols argileux est compliquée par différents processus physico-chimiques non pris en compte dans les modèles couplés classiques (écoulements biphasiques et piégeage d'air, phénomènes d'oxydoréduction). Il est donc nécessaire de déterminer clairement et de quantifier l'incidence des différents processus identifiés afin de pouvoir construire un nouvel outil de prédiction de l'évolution des sols irrigués dans cette région.

SUMMARY

The risks of salinity and/or alkalisation are always accompanied by soil irrigation in the Sudan-Sahel regions. However, evolution of the soil degradation phenomenon is often slow. The resort, therefore, to numerical simulation is often necessary in forecasting over a ten-year period, the evolution of a water-soil system in the framework of irrigated agriculture. In the valley of the Senegal River, the different physico-chemical conditions observed are numerous. The use of numerical models has, in certain cases, led to the definition of the type of degradation, which the soil is subjected to, as well as the water conditions (water table level, irrigation frequency), which directly influences this evolution. In the valley of the Senegal River, the numerical simulations generally indicate the presence of a salinity process and exclude all risks of alkalisation. However, it is noticed, especially in the case of Donaye, that the difference between the experimental and simulated results is high. In effect, the saline evolution of these clayey soils is complicated by different physico-chemical processes, which were not taken into account in the classical coupled models (biphasic flow and air trappings, oxidation-reduction phenomena). It is, therefore, necessary to determine clearly, and quantify the impact of the different processes identified so as to construct a new forecasting tool for the evolution of irrigated soils in this region.

INTRODUCTION

Dans les régions arides comme la zone sahélo-soudanienne, l'irrigation est devenue indispensable pour permettre d'assurer une production agricole suffisante. Cependant, dans des conditions évaporatoires si intenses (jusqu'à 12mm/j), l'irrigation peut également devenir néfaste pour les cultures dans la mesure où elle est susceptible de déclencher des processus de dégradation des sols, par accumulation des sels dans la rhizosphère. En plus des risques de stress osmotiques liés à la salinisation, des risques d'alcalinisation ont également été suspectés dans la vallée du fleuve Sénégal et à l'Office du Niger au Mali. (Boivin *et al*, 1995 ; Boivin, 1995 ; Boivin *et al*, 1999a ; Bertrand, 1995 ; Ndiaye, 1987). Dans le cadre de cette étude, nous nous intéresserons principalement à l'exemple du Sénégal où la gamme de risques potentiellement encourus par les sols est plus vaste et où les risques d'alcalinisation sont moins tranchés qu'au Mali. Dans le but d'illustrer un maximum de situations rencontrées dans la vallée du fleuve Sénégal, 4 sites ont été sélectionnés : dans le Delta, sur la bordure du lac de Guiers et dans la moyenne vallée. L'eau d'irrigation présente invariablement une alcalinité résiduelle calcite (Van Beek et Van Bremen, 1973) et parfois, une alcalinité résiduelle calcite + silicate magnésien positive.

Il existe donc théoriquement un risque d'alcalinisation. Bien que ces sols aient subi des irrigations relativement intenses durant plusieurs décennies, hormis une élévation du pH, on ne discerne aucun signe d'alcalinisation exprimé de manière évidente. Pour comprendre les différents mécanismes physico-chimiques mis en jeu dans l'évolution des sols sous culture ainsi que pour essayer de prévoir cette évolution à plus long terme, nous avons eu recours à la simulation numérique des transferts d'eau et de solutés.

PRINCIPE DE LA MODELISATION

La modélisation numérique des transferts d'eau et de solutés est un outil largement utilisé en science du sol permettant de tester certaines hypothèses sur les mécanismes physico-chimiques affectant l'évolution de la solution du sol et le sol lorsqu'il est soumis à un régime hydrique donné. Elle est basée sur la résolution numérique de plusieurs relations mathématiques décrivant au mieux un certain nombre de processus physiques et chimiques identifiés dans la plupart des cas. Il s'agit des processus de transfert d'eau et de solutés dans les sols, des équilibres chimiques entre la solution du sol, le complexe d'échange des minéraux argileux et l'état de saturation par rapport à différents minéraux susceptibles de cristalliser ou de se dissoudre.

- Pour les transferts d'eau dans un milieu poreux à saturation variable (ce qui est le cas des sols), c'est l'équation de Richards (1954) qui est le plus souvent utilisée :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \right] - U$$

où :

θ :	teneur en eau	K :	conductivité hydraulique
t :	temps	U :	prélèvement d'eau par les plantes
z :	profondeur	H :	potentiel matriciel

Cette équation établit la relation entre les flux d'eau ($\partial\theta/\partial t$), les gradients de pression ($\partial H/\partial z$) dans le sol et la conductivité hydraulique du sol $K(\theta)$ (liés à son état de saturation en eau).

- Pour le transfert des solutés dans les milieux poreux, on utilise l'équation de convection-dispersion qui décrit le décalage entre les vitesses de migration de l'eau et des éléments dissous :

$$\frac{\partial C}{\partial t} \theta = \frac{\partial}{\partial z} \left[\theta \cdot D \frac{\partial C}{\partial z} - q \right]$$

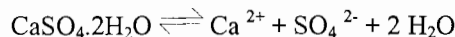
où :

C :	concentration de la solution	θ :	teneur en eau
	en différents éléments dissous		
t :	temps	D :	coefficient de dispersion
z :	profondeur	q :	flux de la solution

D est un terme global qui renferme le coefficient de diffusion moléculaire et le coefficient de dispersivité mécanique.

- La quantification des équilibres chimiques entre la solution et les phases solides (adsorption de cations sur le complexe d'échange et saturation par rapport à différents minéraux) est opérée à partir du calcul de l'activité des différentes espèces chimiques à partir des relations de Debye-Hückel. Les interactions entre la solution et les cations échangeables fixés à la surface des minéraux argileux sont ensuite calculées à partir de l'équation de Gapon (1953), qui prédit la proportion de cations adsorbés en fonction de leur activité en solution et des coefficients de sélectivité qui eux, décrivent les affinités de chaque cation pour le complexe d'échange.

Dans le processus de dégradation des sols évoqués, la nature des cations adsorbés à la surface des minéraux argileux est particulièrement importante. Ainsi, la proportion de sodium adsorbée sur le complexe d'échange qui est déterminante sur la qualité structurale du sol. En effet, le sodium a la propriété de disperser les argiles (Abu-Sharar T.M. and Salameh A.S., 1995) et par conséquent, de contribuer à l'effondrement de la structure du sol qui devient alors « incultivable ». Ce phénomène, associé à l'alcalinisation est appelé la sodisation. C'est pourquoi, on suit particulièrement le pourcentage de sodium échangeable sur les argiles (ESP). Par ailleurs, l'état de saturation de la solution est testé par rapport à différents minéraux susceptibles de précipiter ou de se dissoudre dans le profil étudié. Pour ceci, on compare le produit de solubilité K_{min} du minéral que l'on veut tester au produit ionique Q_{min} . Pour chaque minéral comme pour le Gypse par exemple, on a une équation de dissociation :



avec un produit de solubilité connu pour une température donnée : $K_{\text{gypse}} = 1.024 \cdot 10^{-2}$ à 25°C.

On calcule alors le produit ionique à partir des activités des différents ions en solution :

$$Q_{\text{gypse}} = \frac{(\text{Ca}^{2+}) \cdot (\text{SO}_4^{2-}) \cdot (\text{H}_2\text{O})^2}{(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O})}$$

où les valeurs entre parenthèses représentent les activités des espèces chimiques considérées.

On compare alors cette valeur au produit de solubilité du gypse : lorsque Q_{gypse} est inférieur à K_{gypse} , la solution est sous-saturée par rapport à ce minéral, elle peut donc potentiellement dissoudre un stock de gypse présent dans le sol. Au contraire lorsque $Q_{\text{gypse}} > K_{\text{gypse}}$, la solution est sursaturée et le minéral précipite. La solution est à l'équilibre avec une éventuelle réserve de gypse lorsque $Q_{\text{gypse}} = K_{\text{gypse}}$.

Pour cette étude, nous avons utilisé le modèle LEACHM (Hutson and Wagenet, 1992) qui permet de modéliser une infiltration monodimensionnelle dans le sol en fonction de différentes conditions d'irrigation et de calculer les équilibres chimiques entre la solution et la phase solide. Les données de base à introduire dans le modèle sont d'une part, des données décrivant les propriétés intrinsèques des différents horizons de sols comme leurs propriétés physico-chimiques (courbes de rétention, conductivité hydraulique à saturation, granulométrie etc..) et d'autres part, des données caractérisant les facteurs externes (fréquence et quantité des irrigations, composition de l'eau d'irrigation, climat, variation de la nappe etc..).

Le modèle a été utilisé sur quatre sites soumis à des contraintes hydriques et chimiques très différentes :

- A N'Diaye dans le delta, le site est caractérisé par la présence d'une nappe salée à très faible profondeur (30 cm, parfois affleurante) et par la présence d'un stock de calcite et de gypse très important dans le sol (Samba, 1998).
- A Fanaye dans la moyenne vallée, le sol ne contient ni calcite ni gypse au départ et le site est caractérisé par une absence de nappe (au moins jusqu'à 6 m de profondeur), (Samba, 1998)
- A Gnith sur la bordure ouest du lac de Guiers, sur sol sableux très filtrant présentant une nappe salée en profondeur.
- A Donaye, le sol est très lourd et peu perméable et le site présente une nappe à 2 m de profondeur.

DETERMINATION DES PROPRIETES PHYSIQUES DU SOL

Les principaux paramètres nécessaires pour renseigner ce type de modèle, hormis les paramètres physiques, sont généralement facilement mesurables. La détermination des propriétés physiques du sol comme la courbe de rétention décrivant la relation entre la pression capillaire (h) et la teneur en eau (θ) ainsi que la conductivité hydraulique à saturation (K_s) est par contre plus problématique. Ces propriétés sont d'une part, sujettes à une très forte variabilité dans le temps et dans l'espace et d'autre part, elles ont une importance primordiale dans la modélisation. Les courbes de rétention sont habituellement déterminées sur de petits cylindres (50-100 cm³) suivant la méthode de Wind (1968) et la conductivité hydraulique à saturation par une mesure sur le terrain à l'aide d'un perméamètre à succion (Perroux and White, 1988 ; Smetten and Clothier, 1989). Ceci pose souvent le problème de la représentativité du volume étudié par rapport au profil. Pour s'en affranchir, ces paramètres ont été déterminés sur des colonnes de sol non remanié de 70 cm de hauteur et 25 cm de diamètre prélevées à Ndiaye, Fanaye et Niono (Office du Niger, Mali). Sur ces colonnes équipées de dispositif de mesure tensiométrique (bougies poreuses et capteurs de pression) et de la teneur en eau (sonde TDR), des expériences

d'infiltration et de séchage ont permis de déterminer les propriétés de transfert ($h-\theta$ et $K-\theta$) et les paramètres hydrodynamiques nécessaires pour la modélisation. Par ailleurs, des expériences de traçage au CaCl_2 ont permis de déterminer les coefficients de dispersion (Hammecker *et al*, 1999b).

Pour le cas de Donaye, la détermination des paramètres hydrodynamiques, en particulier la conductivité hydraulique avec le perméamètre à succion s'est avérée infructueuse pour modéliser les transferts d'eau. En effet, un processus de piégeage d'air se produisant entre le front d'infiltration descendant et le front d'infiltration ascendant lié à la nappe (Hammecker *et al*, 1999a) limite très fortement l'infiltration vers 40 cm de profondeur (figure 2). En utilisant le modèle LEACHM avec les paramètres hydrodynamiques obtenus expérimentalement, il est impossible de simuler une évolution du profil hydrique (en particulier à 40 cm) telle que celle observée lors de la mise en eau. En effet, le modèle utilisé n'étant pas prévu pour quantifier les transferts biphasiques (eau et air), il est compréhensible que l'évolution du profil hydrique simulée soit très différente de celle du profil hydrique observé. Cet écart peut être considéré comme un argument supplémentaire étayant l'hypothèse du piégeage d'air. Dans ce cas, le modèle a été utilisé comme un outil permettant de quantifier l'écart de processus théoriques par rapport à la réalité et d'établir un diagnostic par rapport à l'ensemble des processus mis en jeu dans la situation étudiée. Pour contourner ce problème et essayer de modéliser l'évolution hydro-saline du profil, le modèle a été utilisé pour déterminer des paramètres «artificiels» permettant de retrouver le profil hydrique observé. Dans ce cas, une conductivité hydraulique à saturation de 0.25mm/j a été déterminée pour l'horizon à 40 cm. Ces paramètres ainsi rétro-déterminés ont ensuite été utilisés pour simuler l'évolution du système sur une décennie.

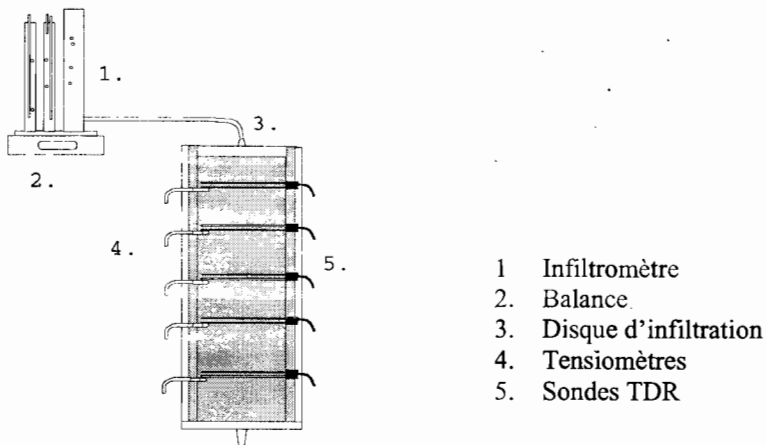


Figure 1. Dispositif expérimental

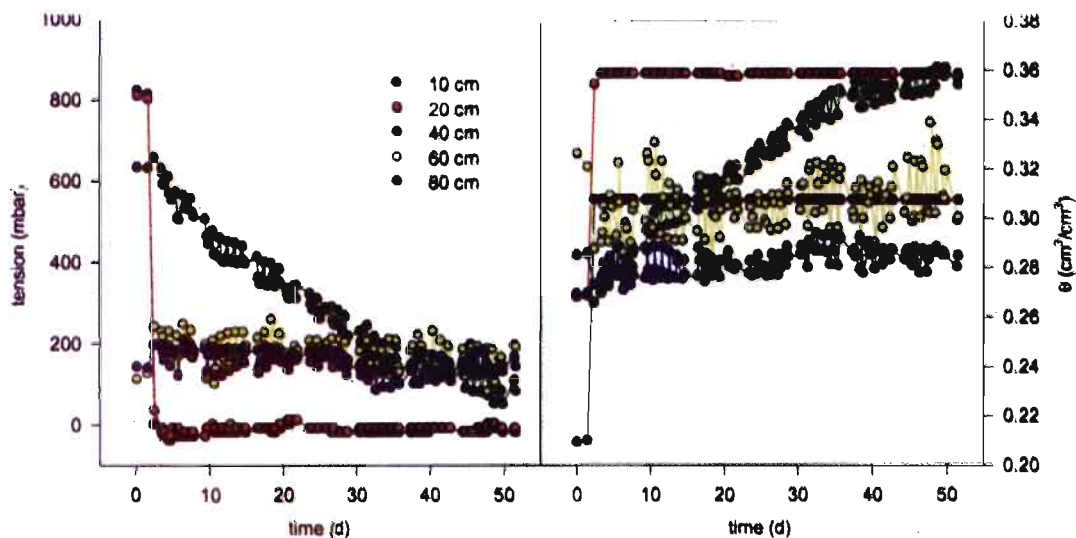


Figure 2. Evolution du potentiel matriciel et de la teneur en eau (θ) sur le profil de Donaye lors de la mise en eau pendant la contre saison 1998

RESULTATS

Sur le site de Ndiaye, la composition de l'eau d'irrigation pompée dans le Lampsar varie d'un faciès chloruré calci-magnésien à bicarbonaté calci-magnésien. L'eau de la nappe quant à elle présente un faciès chloruré sodique à sulfaté calcique très net. Dans le cas du lac de Guiers, la composition de l'eau d'irrigation ainsi que l'eau de la nappe présente un faciès chloruré sodique. Dans les deux cas, les eaux de la nappe sont nettement plus concentrées que l'eau d'irrigation. Les eaux du Ngallanka et du Doué utilisées respectivement pour l'irrigation à Fanaye et à Donaye varient peu et gardent toujours un faciès bicarbonaté calci-magnésien, parfois sodique, présentant systématiquement une alcalinité résiduelle calcite positive ($Alc > Ca \times 2$) et dans certains cas, une alcalinité calcite + magnésium positive ($Alc > 2 \times (Ca + Mg)$). Il existe donc potentiellement un risque d'alcalinisation majeur sur ces deux sites (Eaton, 1950 ; Droubi 1976). L'eau de la nappe sous Donaye présente quant à elle un faciès sulfaté chloruré sodique franc, témoignant de la présence de dépôts d'origine marine lors des dernières transgressions.

Les simulations ont été réalisées sur des périodes correspondant au cycle cultural de riz (une centaine de jours d'immersion avec un apport de 2 à 2.5 m d'eau) sur les sites de Ndiaye, Fanaye et Donaye alors que sur le site de Gnith, le cycle cultural de la tomate a été simulé (180mm d'eau en 4 apports sur 90 jours). Les résultats de la simulation numérique ont été comparés aux résultats expérimentaux du suivi tensiométrique et de la solution du sol (bougies poreuses). Les tendances générales sont respectées bien que dans le détail, il existe des écarts parfois très importants entre les valeurs mesurées et simulées. Le modèle a ensuite été utilisé dans le but d'essayer de prévoir l'évolution du système eau-sol sur une période plus importante de l'ordre de la décennie.

Sur le site de Ndiaye, les apports d'eau lors de l'irrigation n'ont que peu d'incidence sur le faciès chimique de la solution du sol. En effet, du fait de la concentration extrêmement élevée de l'eau de la nappe et de sa proximité de la surface (60 cm au plus bas), les apports d'eau lors de l'irrigation n'ont qu'un rôle hydraulique contribuant à la remontée de la nappe. La simulation sur 10 ans montre clairement une concentration de la solution du sol dans les niveaux superficiels, principalement pendant les saisons d'interculture pendant lesquelles la nappe salée vient se concentrer en surface au profit des remontées capillaires. Cependant, au-delà des variations «saisonnnières», la solution du sol se concentre régulièrement mais d'un autre côté, le sodium échangeable (ESP) diminue et globalement le pH reste constant. Cette évolution suggère un processus de salinisation mais d'après le comportement du pH et de l'ESP, aucun phénomène d'alcalinisation ne peut être détecté sur ce site. En effet, le faciès chimique prédominant est salin neutre chloruré sulfaté sodique. Grâce aux possibilités prospectives de la simulation, il a été possible de tester l'évolution du système sous différentes conditions hydriques. Il a ainsi été possible de déterminer qu'un rabattement de la nappe sous une profondeur de 2 m permettrait de stopper l'accumulation de sels et de désaliniser le profil. Par ailleurs, il a également été montré que lors d'une année de culture, la quantité de sels accumulés dans les 20 premiers cm du profil et potentiellement évacués par un drainage de surface correspond aux apports de 5 ans d'irrigation en double culture (Hammecker *et al*, 1998)

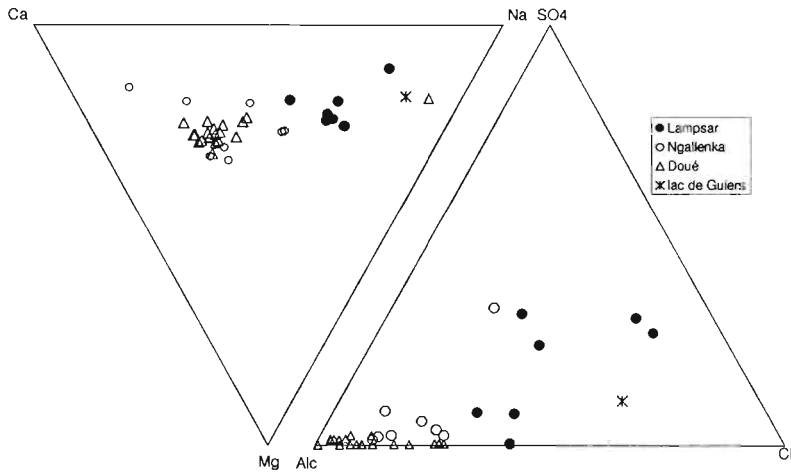


Figure 3. Diagramme de Piper des eaux d'irrigation

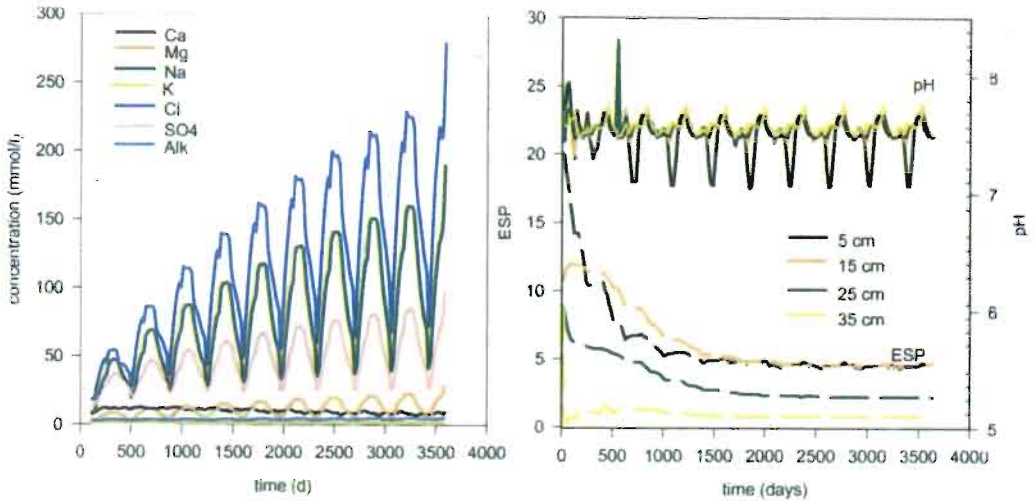


Figure 4. Simulation de l'évolution de la solution du sol à Ndiaye

Sur le site de Fanaye, la solution du sol dans l'horizon superficiel (0-35cm) se concentre légèrement au début mais reste ensuite au même niveau pendant toute la période simulée. Le sodium échangeable (ESP) s'infléchit légèrement en surface alors que le pH de la solution du sol reste constant. La simulation de l'évolution du sol à Fanaye pour une décennie montre une légère concentration de la solution du sol, mais on ne peut déceler aucun processus de salinisation majeur ou d'alcalinisation, malgré la composition souvent très alcaline de l'eau d'irrigation. En effet, l'absence de nappe permet un écoulement vers le fond du profil limitant ainsi la concentration de la solution du sol en surface et ainsi un éventuel processus de sodification. Par ailleurs sur ce site, le sol de nature très argileuse est doté d'une capacité d'échange cationique très importante (de l'ordre de 15 mmol/100g de sol) largement dominée par le calcium et le magnésium. Le complexe d'échange de ce sol est donc doté d'un pouvoir tampon par rapport à la sodification. Cependant, en faisant apparaître une nappe dans les simulations, le système évolue vers une tendance à la salinisation (Hammecker *et al*, 1998).

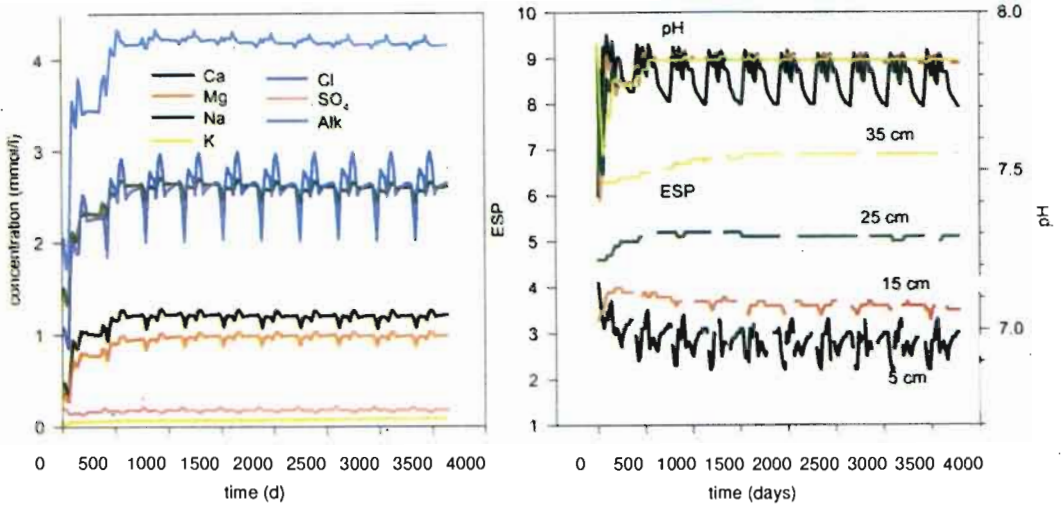


Figure 5. Simulation de l'évolution de la solution du sol à Fanaye

A Donaye, il apparaît que lors de la simulation la concentration de la solution du sol augmente régulièrement dans les horizons superficiels ainsi que le sodium échangeable. Cependant, bien qu'ils présentent des valeurs importantes au début de simulation, le pH et l'alcalinité baissent notablement tous les deux. Cette baisse de l'alcalinité correspond à la précipitation de calcite. Cependant, d'après la théorie sur l'alcalinité résiduelle calcite qui est positive dans l'eau d'irrigation, lors de la précipitation de calcite, c'est le calcium qui devrait diminuer dans la solution du sol. Ceci est sans compter avec le complexe d'échange qui fournit d'importantes quantités de calcium à la solution du sol de manière à ce que l'alcalinité résiduelle calcite devienne négative. Ce sont donc les carbonates et bicarbonates (alcalinité) qui diminuent régulièrement lors de la désorption de calcium du complexe d'échange. Par ailleurs, comme la capacité d'échange cationique de ce sol est extrêmement importante et que de récents travaux (Boivin *et al*, 1999b) ont montré qu'elle augmente pendant la saison de riziculture, de faibles variations de la teneur en calcium adsorbé ont une incidence primordiale sur le faciès chimique de la solution. Le calcium désorbé du complexe est remplacé par du sodium comme l'atteste l'évolution de l'ESP. En contrepartie, on observe que la concentration du sodium en solution n'augmente pas aussi rapidement que les autres cations, ce qui atteste de sa contribution au remplacement de calcium désorbé. Les chlorures se concentrent très fortement dans les horizons supérieurs. Cependant, les résultats expérimentaux des suivis de la solution du sol sur plusieurs saisons culturales montrent au contraire une augmentation de la teneur de l'alcalinité lors de la culture et une baisse importante de la teneur en chlorure (figure 7).

La simulation de l'évolution géochimique de la solution du sol montre un processus de salinisation, en particulier à cause de la concentration de l'eau de la nappe ayant un faciès salin neutre. Or, les résultats expérimentaux semblent attester de l'existence de deux compartiments géochimiques distincts séparés à la faveur d'un processus de piégeage d'air. Par ailleurs, l'évolution de la teneur en chlorures ne peut s'expliquer que par leur fixation sur une surface d'échange anionique ou l'assimilation dans une espèce minérale non commune. De récents travaux suggèrent l'éventualité de la précipitation d'une rouille verte chlorurée (Boivin *et al*, 1999b). La modélisation des transferts hydro-salins dans ce cas, montre l'importance des processus physico-chimiques observés sur le terrain et non pris en compte dans les modèles couplés classiques.

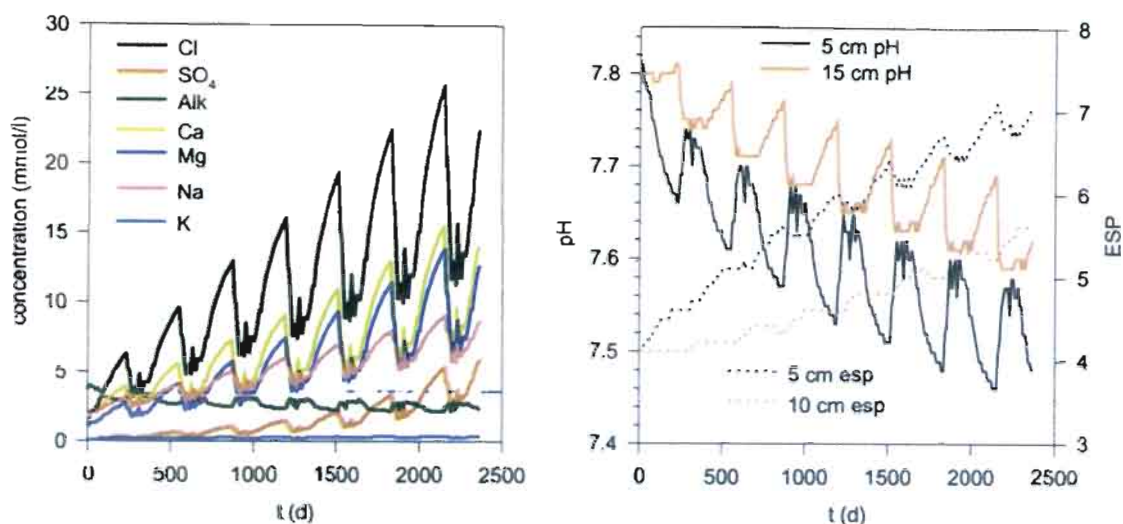


Figure 6. Simulation de l'évolution de la solution du sol à Donaye

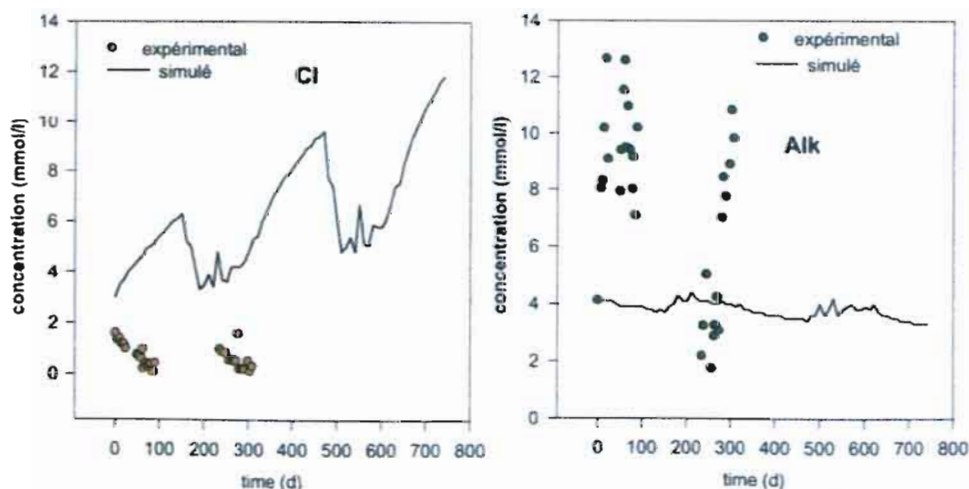


Figure 7. Evolution de la concentration de chlorures et de l'alcalinité à Donaye

A Gnith, le sol présente une texture sableuse en surface et un niveau argileux (attapulgite) à 2m de profondeur. L'évolution de la solution du sol montre une augmentation modérée de la salinité du sol, en particulier des chlorures et du sodium. Du fait de ce faciès fortement chloruré sodique, on n'observe aucune précipitation de calcite ni de gypse. Les faibles apports d'eau lors de la culture maraîchère (qu'il s'agisse de tomates ou d'oignons) n'ont qu'une incidence très limitée, voire aucune incidence sur la remontée de la nappe. Celle-ci est avant tout liée aux variations de hauteur du lac. Lors des simulations sur de longues périodes, de l'ordre de la décennie, le niveau de salinité dans l'horizon de surface se maintient à une valeur constante relativement peu élevée. En effet, l'absence de nappe à proximité de la surface ainsi qu'une conductivité hydraulique importante (210 cm/j) permettent le drainage d'une partie de l'eau d'irrigation évitant ainsi une augmentation de la salinité en surface. Le pH reste constant et l'ESP tend à diminuer légèrement en surface. Le risque de salinisation lié à la culture semble donc mineur sur le site de Gnith avec cette qualité d'eau d'irrigation et tant que le niveau de la nappe ne vient pas à proximité de la surface du sol, pouvant alimenter une remontée capillaire de celle-ci jusqu'à la surface du sol et favoriser la concentration de celle-ci.

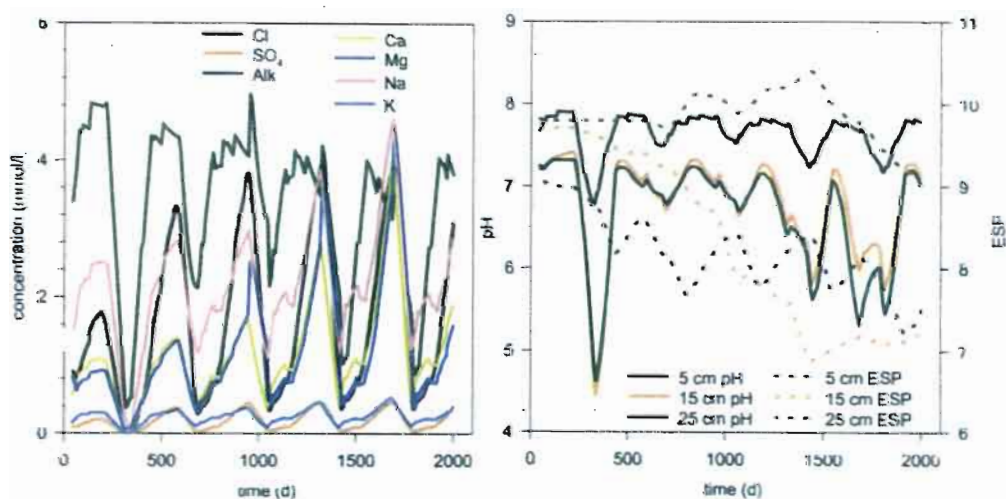


Figure 8. Simulation de l'évolution de la solution du sol à Gnith

CONCLUSIONS

Le risque de salinisation et/ou d'alcalinisation est toujours concomitant à l'irrigation des sols dans les régions soudano-sahéliennes. Cependant, l'évolution de ce phénomène de dégradation des sols étant souvent lent, le recours à la simulation numérique est souvent nécessaire pour essayer de prévoir l'évolution d'un système eau-sol dans le cadre de l'agriculture irriguée sur une période décennale. Dans la vallée du fleuve Sénégal, la variété de conditions physico-chimiques rencontrées est très vaste. L'usage de modèles numériques a permis dans certains cas, de définir le type de dégradation auquel les sols sont soumis et de définir les conditions hydriques (niveau de la nappe, fréquence d'irrigation) qui influent directement sur cette évolution. Dans la vallée du fleuve Sénégal, les simulations numériques indiquent en général la présence d'un processus de salinisation et écartent tout risque d'alcalinisation. Cependant, on voit aussi en particulier dans le cas de Donaye que l'écart

entre les résultats expérimentaux et simulés est important. En effet, l'évolution saline du milieu sur ces sols argileux est compliquée par différents processus physico-chimiques non pris en compte dans les modèles couplés classiques (écoulements biphasiques et piégeage d'air, phénomènes d'oxydoréduction). Il est donc nécessaire de déterminer clairement et de quantifier l'incidence des différents processus identifiés afin de pouvoir construire un nouvel outil de prédiction de l'évolution des sols irrigués dans cette région.

BIBLIOGRAPHIE

Abu-Sharar T.M. and Salameh A.S., 1995. Reductions in hydraulic conductivity and infiltration rate in relation to aggregate stability and irrigation water turbidity, *Agricultural Water Management* **29**:53-62.

Boivin P., 1995. Soil degradation in irrigation schemes in the Senegal river middle valley: mechanisms, characterization methods and actual situation. *In Irrigated Rice in the Sahel: Prospects for sustainable development.* K.M. Miézan, M.C.S. Wopereis, M. Dingkuhn, J. Deckers and T.F. Tandolph, WARDA publication, ADRAO Ndiaye, Senegal. pp. 37-50.

Boivin P., I. Dia I., A. Lericollais, J.C. Poussin, C. Santoir et S.M. Seck, 1995. Nianga laboratoire de l'agriculture irriguée dans la vallée du fleuve Sénégal. Collection colloques et séminaires, Ed. ORSTOM, 562 pages.

Boivin P., M.C.S. Wopereis, S. Schiess, and JL Maeght, 1999a. Comparing indicators of soil alkalization hazard in irrigation schemes in northern Senegal. SSSAJ. Soumis.

Boivin P., F. Favre, C. Hammecker, A. Saejjew and D. Tessier, 1999b. Ion transfers, iron reduction and mineralogical implications in irrigated fields: new results for soil and water quality management under irrigation. Proceedings of Hydram International Congress, EPF Lausanne, 1-3 septembre 1999.

Bertrand, 1995. *In Irrigated rice in Sahel: Prospects for sustainable development.* International Symposium, WARDA, N'Diaye, Sénégal (27-30 mars 1995).

Favre F. et P. Boivin, 1998. Evolution physico-chimique des sols irrigués en moyenne vallée du fleuve Sénégal. Compte rendu de la réunion de comité de pilotage.

Droubi A., 1976. Géochimie des sels et des solutions concentrées. Modèle thermodynamique de simulation. Application au lac Tchad. Thèse de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg. 175 p.

Eaton F.M., 1950. Significance of carbonates in irrigation waters. *Soil Sci.* **69**:123-133.

Gapon E.N., 1953. Theory of exchange adsorption in soils. *Zhur. Obshch. Khim.* **3**:144-152.

Hammecker C., L. Barbiéro, P. Boivin and R. Samba Diene, 1998. Contribution of modelling solute and water transfer to the irrigation of saline soils in the valley of River Senegal. Congrès International de Sciences du Sol AISS Montpellier.

Hammecker C. et J.L. Maeght, 1998. Rapport d'activité PSI 1998.

Hammecker C., A.C. Dantas Antonino, J.L. Maeght et P. Boivin, 1999. Experimental study and numerical modelling of the water transfers in an irrigated plot in Northern Senegal: evidences of air entrapment. *Soil Science.* En préparation.

Hammecker C., N. Condom, J.L. Maeght, and P. Boivin, 1999. Determination of unsaturated soil hydraulic and solute transfer parameters on soil monolith, *Soil Science.* En préparation.

Hutson J.L. and Wagenet R.J., 1992. LEACHM, Leaching estimation and chemistry model. A process-based model of water and solute movement, transformations, plant uptake and chemical reactions in the unsaturated zone. Version 3, New York State College of Agriculture and Life Sciences, Cornell University, Ithaca, New-York.

- Ndiaye, M.K. 1987.** Evaluation de la fertilité des sols de l'Office du Niger au Mali. Contribution à la recherche des causes et origines de la dégradation des sols dans le Kouroumari. Thèse de l'Institut Polytechnique de Toulouse, France. 134 p.
- Samba Diene R, 1998.** Riziculture et dégradation des sols en vallée du fleuve Sénégal : analyse comparée des fonctionnements hydro-salins des sols du delta et de la moyenne vallée en simple et double riziculture. Thèse de doctorat de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 221 p
- Perroux K.M. and I. White, 1988.** Design for Disc Permeameters. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* **52**:1205-1215.
- Reynolds W.D. and D.E. Elrick, 1991.** Determination of hydraulic conductivity using a tension infiltrometer. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* **55**:633-639.
- Smettem K.R.J. and B.E. Clothier, 1989.** Measuring unsaturated sorptivity and hydraulic conductivity using multiple disc permeameters. *J. Soil Science* **40**:563-568.
- Van Beek C.G.E.M. and N. Van Breenen, 1973.** The alkalinity of alkali soils. *Journal of soil Science*, **24**(1):129-136.
- Wind G.P., 1968.** Capillary conductivity data estimated by a simple method. *In* P.E. Rijtema and H. Wassink (Editeurs), *Water in the unsaturated zone. Proceedings of the Wageningen symposium, June 1966, IASH Gentbrugge/Unesco Paris, vol. 1., pp.181-191.*



Pour un Développement Durable de l'Agriculture Irriguée dans la Zone Soudano-Sahélienne



Synthèse des Résultats du Pôle Régional de Recherche sur
les Systèmes Irrigués (PSI/CORAF)

JC.Legoupil, C.Dancette, P.Godon, IM.Maïga et KM.Ndiaye



Pour un Développement Durable de l'Agriculture Irriguée dans la Zone Soudano-Sahélienne

Synthèse des Résultats du Pôle Régional de Recherche
sur les Systèmes Irrigués (PSI/CORAF)

Editeurs

JC.Legoupil

C.Dancette, P.Godon, IM.Maïga et KM.Ndiaye

avec la collaboration de N. Dupuy pour l'édition scientifique

© PSI/WECARD-CORAF
Tous droits de traduction et de reproduction réservés
Crédit photographique : PSI/WECARD-CORAF
Edition WECARD-CORAF, juin 2000
ISSN 0851-0296