

ONZIÈME RÉUNION DU GROUPE DE RÉFLEXION
SUR L'ÉTUDE DE LA SOLUTION DU SOL
EN RELATION AVEC L'ALIMENTATION DES PLANTES
(GRESSAP)

IRD Montpellier - 14 septembre 1999

**Compte rendu de la 11^{ème} réunion
du Groupe de Réflexion sur l'Etude de la Solution du Sol
en relation avec l'Alimentation des Plantes**

Mardi 14 Septembre 1999 - Montpellier

Après une année d'interruption due au Congrès National de Science du Sol de Montpellier, cette 11^{ème} réunion du GRESSAP a été l'occasion de renouer avec nos habitudes : Salle du Conseil d'Agropolis Internationale, pluie diluvienne, pauses café et petits gâteaux...

Le thème proposé cette année concernait *Les sols salés ou alcalins irrigués, leur fonctionnement et leur gestion*. Les exposés proposés dans ce cadre ont émané de deux groupes travaillant le sujet, l'équipe de Pascal BOIVIN, Fabienne FAVRE, Claude HAMMECKER et Jean-Christophe POUSSIN, qui propose de se rassembler au sein d'une Unité de Recherche IRD appelée ARIANE (*Interactions entre constituants, transferts et systèmes de culture dans les sols salés ou acides*) dans le cadre de la restructuration de l'IRD, et le laboratoire SOLTROP du CIRAD représenté par Alain AVENTURIER, Nicolas CONDOM, Serge MARLET, Florence OUVRY et Michel PUARD. Les exposés ont été regroupés par équipe pour plus de cohérence. Les exposés de l'IRD, qui ont concerné les périmètres irrigués du fleuve Sénégal, ont été les suivants :

- *Salinité et irrigation : les questions posées à la recherche par le couple infernal*, exposé introductif de Pascal BOIVIN.
- *Effets du système de culture sur la variabilité des rendements dans les sols irrigués en voie de salinisation*, de Jean-Christophe POUSSIN.
- *Évaluation et simulation des transferts hydro-salins dans les sols argileux : quelques questions et perspectives*, de Claude HAMMECKER.
- *Réduction du fer structural dans les sols à engorgement temporaire et conséquences sur la solution du sol*, de Fabienne FAVRE.

SOLTROP n'était physiquement représenté que par Serge MARLET, qui a donc présenté l'ensemble des résultats obtenus par le groupe sur un périmètre irrigué de l'Office du Niger. Son intervention, *Alcalinisation des sols en riziculture sous submersion à l'Office du Niger*, a compris les exposés suivants :

- *Fonctionnement hydrologique et évolution des sols sous irrigation*, signé Serge MARLET, Mamadou Kabirou NDIAYE et Florence OUVRY.
- *Influence des processus biochimiques sur l'évolution des sols et l'impact de la dégradation*, signé Serge MARLET, Alain AVENTURIER, Mohamed Koulam DICKO, Nicolas CONDOM et Michel PUARD.
- *Influence des processus à l'interface entre la lame d'eau et le sol sur la désalcalinisation des sols*, signé Nicolas CONDOM et Serge MARLET.

Cette session thématique s'est avérée d'un grand intérêt, du simple fait de la présentation des résultats de travaux déjà très avancés (Fabienne FAVRE et Nicolas CONDOM sont en train d'achever la rédaction de leur thèse), mais aussi et surtout du fait de la convergence de l'ensemble des résultats obtenus indépendamment et dans le même temps par les deux groupes sur deux sites différents, Sénégal et Niger. Ces observations peuvent être résumées comme suit : au cours d'un cycle cultural de riz pluvial, la concentration en cations de la solution du sol augmente dans le même temps que la concentration en Cl^- diminue, l'alcalinité augmente et le potentiel rédox diminue. Une telle convergence étaye évidemment la solidité des observations rapportées.

En revanche, les interprétations actuellement proposées par les deux groupes divergent fondamentalement. Pour les uns, ces observations suggèrent une modification des propriétés de la phase solide du sol au cours du cycle cultural, liée à la réduction du fer constitutif des argiles (augmentation de la CEC, formation transitoire de "rouille verte", ...), pour les autres, ces observations seraient liées à la diffusion des solutés vers une lame d'eau superficielle de composition différente de celle du sol. Affaire à suivre donc...

La session libre était réduite à une communication:

- *Comparison between three soil solution samplers in a sandy soil of Northeast Thailand*, par Roland POSS, Didier BRUNET et Nijaporn KUNKLANG, présenté par Jean PETARD en l'absence de Roland POSS.

La réunion s'est terminée sur les traditionnelles *Questions diverses*. Les participants ont en particulier présenté les restructurations en cours à l'IRD, au CIRAD et à l'INRA.

Enfin, Roland MOREAU notant que la composition du bureau du GRESSAP n'avait pas varié depuis 1995, a suggéré de le renouveler et a sollicité Pascal BOIVIN, responsable du projet d'UR ARIANE, pour lui succéder. Pascal BOIVIN a accepté. Que Roland trouve ici nos plus vifs remerciements pour sa contribution à l'animation scientifique et à la gestion financière de notre groupe.

Pascal BOIVIN
IRD
BP 5045
34032 Montpellier Cedex

Téléphone : 04 67 41 64 07
Télécopie : 04 67 54 71 06
EMail : pboivin@melusine.mpl.ird.fr

Benoît JAILLARD
UMR Sols, Symbiose
et Environnement
2 place Viala
34060 Montpellier Cedex
04 99 61 23 82
04 67 63 26 14
jaillard@ensam.inra.fr

Roland Poss
Dpt of Land Development
Division of Soil Analysis
Paholyothin Road
Chatuchak,
Bangkok 10900
tel/fax: (66 2) 579 5523
poss@ksc15.th.com

Montpellier et Bangkok, Octobre 1999

Salinité et irrigation: quelques questions posées à la recherche par le couple infernal

Pascal Boivin, IRD, BP 5045, 34032 Montpellier Cedex 1

1. Introduction

L'irrigation a été l'enfant chéri des projets de développement à grande échelle depuis plusieurs décennies. Objet de tous les soins, elle s'est étendue dans toutes les zones arides (ou à déficit hydrique temporaire) d'une façon spectaculaire. Ce n'est évidemment pas sans raison. A l'échelle planétaire, à celle des nations à faible niveau de développement, mais aussi dès que les précipitations naturelles sont insuffisantes et/ou aléatoires, l'irrigation paraît être le seul moyen de sécuriser et intensifier les productions agricoles.

Les prospectives des grandes instances internationales vont plus loin. Dans nombre de pays, l'autosuffisance alimentaire repose déjà sur les productions irriguées. Les ressources agricoles dégagées en zones pluviales, soumises aux aléas climatiques, ne sont pas intensifiables et sont incertaines. Les besoins alimentaires augmentent et leur satisfaction passe obligatoirement par une augmentation drastique des surfaces irriguées dans le futur : 80% des besoins à venir en dépendent (source FAO, voir aussi les sites de l'IRRI, du PNUE, ou de l'IWMI).

Mais les résultats de l'irrigation frustrant les ingénieurs, angoissent les économistes et irritent les écologistes... C'est de l'aspect environnemental que nous parlerons essentiellement ici, c'est-à-dire de la dégradation des ressources en sols et eaux causée par l'irrigation, tout en essayant de montrer que les liens entre les différentes composantes existent et ne sont pas toujours ceux que l'on croit.

2. L'irrigation et ses enjeux

L'irrigation est au confluent de trois débats essentiels de cette fin de millénaire : le partage de la ressource en eau, la sécurité alimentaire et la conservation de l'environnement. On rappelle ici quelques données générales à ces problèmes, à l'aide de chiffres diffusés notamment sur les serveurs cités plus haut. Ils ne sont pas obligatoirement à jour ou incontestables, mais reflètent néanmoins la situation.

Le partage de la ressource en eau

On considère ainsi que l'agriculture consomme 6 fois plus d'eau que les autres activités humaines. Or, parmi les activités agricoles, l'irrigation est le 'mauvais élève' pointé du doigt : moins de 1m³ sur 2 serait 'utile', c'est-à-dire évapotranspiré pour permettre la croissance de la culture. Nous confirmons pour notre part ces chiffres pour la riziculture sahélienne (Raes et al, 1992; Salvignol, 1993). Naturellement, irriguer est surtout nécessaire dans les pays pour lesquels l'eau est une ressource rare, et beaucoup de ces pays consomment plus de 100% de leurs ressources renouvelables, des conflits pour le partage de la ressource en eau se profilent entre pays voisins (Israël et ses voisins; Syrie/Turquie /Irak; USA/Mexique; Inde/Pakistan...).

Importance de l'agriculture irriguée pour la sécurité alimentaire

L'agriculture irriguée représente 237 millions d'hectares dans le monde (8 millions en 1800, 48 millions à la fin du 19^{ème} siècle), soit environ 15% des terres cultivées et elle augmente d'environ 2 millions d'hectares par an. Elle fournit un tiers de la production alimentaire mondiale (dont 55% de la production totale de blé et de riz) et assure des emplois, des vivres et des revenus pour 2,4 milliards de personnes. L'irrigation joue un rôle déterminant dans l'augmentation de la production agricole mondiale: on estime que la moitié de cette augmentation dans les 25 dernières années est due à l'expansion des surfaces irriguées. Dans les 30 prochaines années, 80% des disponibilités vivrières supplémentaires nécessaires pour nourrir le monde résulteront de l'irrigation.

L'échec de l'agriculture irriguée

Partout dans le monde, des grands barrages ont été édifiés, la maîtrise de l'eau a été assurée, avec, entre autres, l'objectif d'irriguer. Partout, les pouvoirs publics et les économistes dressent le même constat : rendements très éloignés des espérances, non rentabilité des investissements, désintérêt des paysans, non compétitivité des productions, abandon des aménagements et désastres écologiques... Depuis les années 90, les décideurs sont suspendus à un paradoxe angoissant : il serait impossible de développer l'irrigation, cela « ne marche pas », et pourtant, c'est le seul moyen de nourrir la planète.

Si l'échec technique et économique est une généralité peu contestable, certaines des causes généralement admises (désintérêt des paysans, problèmes environnementaux) relèvent de raisonnements parfois simplistes que nous ne partageons pas. En particulier, les conditions d'émergence de systèmes irrigués durables correspondent à des critères économiques, sociaux et institutionnels stricts, comme le rappelle très clairement A. Ostrom (1993), ce que les 'décideurs' ignorent ou feignent d'ignorer.

Irrigation et salinisation

Le phénomène de base est simple : on apporte de l'eau, parfois énormément (jusqu'à 70 000 m³/ha pour une culture de riz !). Si la totalité de l'eau s'évapore (parfois plus de 2500 mm d'évaporation annuelle au Sahel), les sels dissous dans cette eau s'accumulent dans le sol. Si le sol est filtrant, on risque secondairement de remonter les nappes (parfois de plus de 40m !), qui une fois affleurantes alimentent en sels la surface du sol sous l'effet de l'évaporation. Les pratiques d'irrigation mal comprises sont effectivement facteurs de remontées des nappes, de salinisation, d'érosion et de pollution de l'eau. Les remontées salines et la salinisation des sols sont citées parmi les principales causes de la perte de productivité de nombre de périmètres irrigués dans le monde. 20% des surfaces irriguées seraient déjà affectées de façon sensible. Le PNUE estime que le taux de perte de terres irriguées en raison de l'engorgement et de la salinité des sols est de 1,5 million d'hectares par an, soit pratiquement autant que l'accroissement annuel des superficies irriguées estimé à 2 millions d'hectares. Les superficies touchées par la salinisation sont évaluées, en % de la surface irriguée totale, à 10% au Mexique, 11% en Inde, 21% au Pakistan (16% selon la FAO), 23% en Chine et 28% aux Etats-Unis.

Face aux efforts de développement de la riziculture en Afrique Sahélienne, l'extension de la salinité fait craindre un échec total et une dégradation irréversible des terres (Madeley J, 1993). De telles prédictions alarment les décideurs et mobilisent les écologistes. Fort de son ingénierie, l'Occident a conçu et réalisé des projets qui se révèlent inappropriés. La recherche est bien sûr interpellée.

Nous introduirons d'entrée de jeu un point de vue personnel : la dégradation des sols endosse beaucoup. Son diagnostic est souvent sommaire, et surtout la relation de causalité entre dégradation des sols et chute des rendements n'est pas correctement établie (cf. exposé de J.C. Poussin). Bien souvent, la dégradation (saline ou non) de la qualité du sol n'est que l'un des multiples signes du désintérêt des exploitants, désintérêt qui résulte de situations « indépendantes » des contraintes édaphiques.

3. Les processus de salinisation

Rappelons simplement que :

- différentes voies salines peuvent être distinguées, selon que les sels qui s'accumulent sont neutres, alcalins ou même acides ;
- la présence de sodium en excédent (par rapport surtout au calcium) entraîne une destruction de la structure du sol par dispersion des argiles et une destruction du complexe organo-minéral, ceci conduisant à des sols sodiques et alcalins qui représentent sans doute les pires formes de dégradation ;
- une eau de faciès neutre peut fort bien devenir alcaline en se concentrant, ceci étant en réalité déterminé par le signe de son alcalinité résiduelle (Ribolzi et al, 1993 ; Al Droubi, 1976).

4. La compréhension et la modélisation des processus

La recherche sur les sols salés fait appel à des domaines scientifiques relativement distincts et fort complexes, dont elle doit assurer la synthèse. On citera notamment la modélisation des transferts hydriques et de solutés, la chimie des interfaces, les réactions d'oxydo-réduction, la minéralogie, la chimie des solutions salines (concentrées), l'agronomie, la physiologie végétale. Chacun de ces domaines véhicule son lot d'hypothèses et d'incertitudes, ce qui émerge clairement lorsque l'on tente d'intégrer les connaissances dans un modèle de simulation.

La recherche sur les sols salés s'est largement focalisée sur les solutions salines et leurs équilibres avec les sels solubles. Une vision sommaire du complexe d'échange et du rôle des minéraux primaires y a parfois été jointe, pour permettre de saisir les éléments de dynamique temporelle ou améliorer la prise en compte des contrôles géochimiques. Si des connaissances précises sur les processus et les principales pédogenèses permettent des diagnostic a posteriori, la prévision des phénomènes (nature et chronologie) reste largement inaccessible.

- C'est dans le secteur des minéraux primaires et de leur interaction avec la solution du sol que la connaissance fondamentale semble la plus insuffisante. A ce niveau, on assiste à la remise en cause de nombreux concepts qui semblaient bien établis. Notamment :
- La CEC d'un sol n'est pas constante, loin s'en faut. Les charges variables, pour n'importe quelle argile pour peu qu'elle soit finement divisée, peuvent, pour de grandes variations de pH, faire varier la CEC du simple au double (Tessier et al, 1999). Mais l'engorgement temporaire peut avoir le même effet lorsque du fer structural est réduit (cf. exposé de F. Favre). Les sélectivités d'échange s'en trouvent modifiées...
- La CEC n'est pas un compartiment homogène. Les sites d'échange, selon leur situation dans les domaines argileux (Mc Bride, 1989; Halilat, 1998) ou selon leur nature (Charlet, 1999) réagissent différemment avec les cations.
- Les équilibres entre CEC et solution du sol ne sont pas aussi rapides in situ que dans des suspensions fortement diluées au laboratoire.
- Les échanges anioniques sont moins bien connus, et jamais pris en compte. Pour autant la CEA se manifeste, et parfois dans des quantités considérables. Ceci peut par exemple réduire une teneur en chlorure, en milieu confiné, d'un facteur 10...

Les dynamiques intrasaisonnières sont mal connues. En particulier, le rôle physico-chimique des oxydes de fer et de l'oxydo-réduction (fer et soufre) apparaît dans de nombreux travaux récents. Dans le cas de la dynamique alcaline, il nous semble tout à fait essentiel de comprendre comment les cycles d'oxydo-réduction interviennent sur le bilan de protons. Plus largement, on constate au cours des cycles culturels des évolutions chimiques de grande ampleur comparativement aux évolutions interannuelles. L'interaction entre cycles saisonniers et évolution à long terme des sols salés est un domaine d'étude à peine ébauché.

La modélisation des transferts se trouve devant une multitude de voies nouvelles à explorer. A mesure que les connaissances sur les processus évoluent, leur prise en compte dans les programmes de calcul de transfert est envisagée. On se heurte ici à un ensemble de difficultés et de choix dont nous relèverons certains points:

- Plus les modèles sont complexes, plus les phénomènes décrits sont subtils, plus les paramètres de calage sont nombreux. Ils sont parfois impossibles ou difficiles à déterminer. Leur calage offre en revanche une grande souplesse pour permettre au modèle de 'coller' aux données de validation. Pour autant, on a de moins en moins la possibilité de s'assurer que la bonne correspondance avec des observations démontre que la simulation aura des qualités prévisionnelles, et cette confusion est fréquente. Ajoutons que fassent aux développements de modèles impressionnants de savoir, on dispose de fort peu de données de validation, c'est-à-dire d'une observation *in situ* de qualité des transferts d'eau et solutés, pour des sols argileux et sur des pas de temps courts.
- La simulation des transferts hydriques repose sur des hypothèses de travail et de calcul peu compatibles avec la nature et le fonctionnement des sols argileux (sol non déformable, uniforme, chimiquement inerte, air à la pression atmosphérique..). Les observations mettent en évidence des cinétiques de gonflement / retrait extrêmement rapides, notamment au niveau des fissures (Favre et al, 1997), des piégeages d'air (Linden et Dixon, 1972, voir également l'exposé de C. Hammecker)... soit des phénomènes à dynamique rapide, pour lesquels on ne dispose d'aucune piste théorique vers une modélisation. Dans cette attente, la prise en compte des écoulements préférentiels doit se cantonner à des démarches empiriques relativement arbitraires. Les modèles

se heurtent également aux problèmes de spatialisation. Ceci oriente nettement en faveur de paramètres de calage ayant une relation avec les constituants du sol. On notera ainsi la percée des fonctions de pédotransfert.

- L'interaction entre le sol et les solutions salines est relativement bien définie dans ses composantes théoriques. En revanche les conséquences pratiques d'une sodisation sont à la fois mal abordées expérimentalement (on travaille sur sol remanié ou sur suspension d'argile), mal diagnostiquées (on distingue difficilement les effets de l'augmentation du potentiel de gonflement, de la dispersion des argiles, et de l'explosion des agrégats) (Abu-Sharar et al, 1995; Curtin et al, 1994; Crescimano et al, 1995), et inutilisables en modélisation (ce ne sont que des abaques de chute de perméabilité, non valables in situ. Seul le logiciel UNSATCHEM en propose une prise en compte arbitraire) (Mc Neal, 1969; Simunek et al, 1996).

Face à toutes ces difficultés, il semble que l'on manque fondamentalement de données expérimentales, c'est-à-dire d'observation des processus in situ. Cette recherche doit se développer, afin de disposer d'une capacité de diagnostic sur les processus qui contrôlent le fonctionnement et l'évolution d'un sol. Ceci devrait notamment orienter vers des choix de modèles spécialisés, et non vers des modèles universels.

Le rôle de la modélisation apparaît davantage comme celui d'un outil de réflexion et de discussion de scénarios, à confronter aux observations pour développer un diagnostic, que comme un outil de prédiction sensu stricto. De plus, alors que les modèles sont de mieux en mieux diffusés et interfacés, il apparaît très clairement que leur mise en œuvre non accompagnée de solides compétences conduit à des explorations douteuses.

5. Irrigation, dégradation du sol et potentialité du sol

In fine, ces recherches sont destinées à comprendre et prévoir l'évolution du sol irrigué en fonction des conditions de gestion imposées, particulièrement pour pouvoir préserver sa capacité à produire. On s'intéresse couramment à des formes de 'dégradation', supposées pénalisantes pour les cultures.

Le diagnostic de la pression exercée par le sol sur l'élaboration des rendements est souvent conduit de façon trop sommaire. On verra à travers l'exposé de J.C. Poussin que ceci s'exprime en fonction des pratiques culturales. Ne pas prendre en compte leur diversité aux divers stades d'évolution de la culture conduit à des erreurs d'interprétation. En travaillant en conditions contrôlées, on risque de se focaliser sur des 'facteurs limitants' qui en réalité ne s'expriment pas (ou peu) avec les pratiques paysannes. En analysant mal les pratiques, on ne se donnera pas la possibilité d'interpréter correctement la cause de rendements différents (ou identiques).

Ceci n'est pas anodin. Par exemple, tandis qu'on diagnostique une dégradation sévère des sols de l'Office du Niger, les plans de réhabilitation permettent de doubler les rendements. Il en résulte une incompréhension profonde des risques environnementaux par les décideurs. De fait, les conséquences réelles pour différents systèmes de culture d'une alcalinisation du sol sont méconnues. Inversement, les pédologues ont tendance à se focaliser sur certains processus, qu'ils appellent 'dégradation' au sens pédologique et pensent l'être au sens large, ce qui les conduit à proposer des solutions pour des problèmes dont les producteurs n'ont que faire.

Il y a ici, à notre sens, une rationalisation et un approfondissement des méthodes de travail et des connaissances à conduire.

6. Proposition de méthodes de gestion de l'eau alternatives ?

De ce qui précède, nous retirons la conviction que les recherches fondamentales ne peuvent pas travailler sur de bons questionnements si elles ne se confrontent pas aux problématiques de terrain. La solution universelle à la salinisation est le drainage. Mais le drainage peut être irréalisable dans certains sols argileux (les vertisols rizicultivés par exemple), hors de portée des moyens financiers des exploitants, et encore plus simplement non pratiqué parce que non compatible avec les pratiques et les objectifs des producteurs.

Ce contexte de recherche est indispensable pour nous ouvrir les yeux sur de nouvelles problématiques et de nouveaux processus. L'évacuation des excédents de sels de la parcelle, du périmètre, puis du paysage, sans introduire de charges excessives au niveau de l'aménagement, et tout en garantissant une qualité du sol telle qu'il ne soit pas un facteur d'échec économique de l'entreprise, est la question essentielle. En apportant des solutions acceptables, même temporairement, on offre aux

cultivateurs la possibilité d'évoluer vers une meilleure maîtrise technique, et à terme vers des systèmes irrigués durables (Ostrom, 1993). Cela suppose d'inscrire les recherches dans le cadre d'une approche du système irrigué dans son ensemble.

7. Conclusion

Il nous semble vain de viser à réaliser des modèles universels permettant de décrire toutes les composantes d'évolution d'un sol irrigué. Les recherches doivent se développer vers une meilleure prise en compte de l'expression des processus élémentaires in situ, vers notamment une meilleure prise en compte du rôle des constituants finement divisés (minéraux primaires) et des dynamiques rapides (oxydo-réduction). La modélisation doit se développer comme un outil complémentaire au diagnostic de terrain.

Il faut analyser l'évolution de la ressource en sol dans le cadre des systèmes de culture, et décrire son expression sur les résultats agronomiques relativement aux pratiques culturales. Ceci conduira à proposer des solutions de gestion 'durable' intégrant différentes disciplines dans leur conception.

8. Références

- Abu-Sharar TM et Salameh AS 1995 Reductions in hydraulic conductivity and infiltration rate in relation to aggregate stability and irrigation water turbidity. *Agricultural Water Management* 29, 53-62.
- Charlet M 1999 The exchange capacity of soils. Structure and Charges at the Particle/water Interface. *Comptes Rendus de l'Académie de l'Agriculture, Paris*, in press.
- Curtin D, Steppuhn H et Selles F 1994 Clay dispersion in relation to sodicity, electrolyte concentration and mechanical effects. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 955-962.
- Crescimanno G, Iovino M et Provenzano G 1995 Influence of salinity and sodicity on soil structural and hydraulic characteristics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59, 1701-1708.
- Dixon RM et Linden DR 1972 Soil air pressure and water infiltration under border irrigation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 36, 943-953.
- Droubi (Al-) A 1976 Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermodynamique de simulation. Application aux sols salés du Tchad. Thèse de Doctorat de l'Université Louis Pasteur Strasbourg, mémoire n°46, Sciences Géologiques, 177 p.
- Favre F, Boivin P et Wopereis M 1997 Water Movement and soil swelling in a dry, cracked vertisol. *Geoderma* 78, 113-123.
- Halilat T 1998 Etude expérimentale de sable additionné d'argile. Comportement physique et organisation en conditions salines et sodiques. Thèse de Doctorat de l'Institut National Agronomique de Paris Grignon, Paris, 279 p.
- Madeley J 1993 Will rice turn the Sahel to salt ? *New Scientist*, 9 October 1993, 35-37
- McBride MB 1989 Surface chemistry of clay minerals, in *Minerals in soil Environments*. Chap. 2, SSSA Book series n°1, Soil Sc. Soc. Am., USA
- McNeal BL 1969 Prediction of the effect of mixed-salt solution on soil hydraulic conductivity, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 32, 190-193.
- Ostrom E 1996 Pour des systèmes irrigués et durables : façonner les institutions. *Multigr. Inter-Réseaux, Groupe Irrigation Observatoire des périmètres Irrigués Sahéliens, GRET Paris*, 35 p.
- Raes D, Sy B et van Passel L 1992 The water balance of rice irrigation schemes in the Senegal river Delta. pp. 835-844 in: J. Feyen, E. Mwendera and M. Badji (Eds) *Advances in planning, design and management of irrigation systems as related to sustainable land use*. Center for Irrigation Engineering, K.U. Leuven, Leuven, Belgium.
- Ribolzi O, Valles V et Barbiero L 1993 Contrôle géochimique des eaux par la formation de calcite en milieu méditerranéen et en milieu tropical. Arguments d'équilibre et argument de bilan. *Science du Sol* 31, 1/2, 77-95
- Salvignol C 1993 Gestion de l'eau en riziculture irriguée dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal. Essai de bilan hydrique et salin. Mémoire de fin d'études ESITPA, 34 p.
- Simunek J, Suarez DL et Sejna M 1996 The UNSATCHEM software Package for simulating the one-dimensional variably saturated water flow, heat transport, carbon dioxide production and transport, and multicomponent solute transport with major ion equilibrium and kinetic chemistry. Research report 141, USSL, Riverside.

Effet du système de culture sur la variabilité des rendements dans les sols irrigués sahéliens en voie de salinisation

J.C. Poussin, IRD Dakar / Montpellier

1. Introduction

Au Sahel, l'irrigation permet de lever la principale contrainte pour la production agricole. Mais l'évaporation de l'eau d'irrigation combinée à sa qualité provoque une évolution des sols par salinisation (Bertrand et al., 1999 ; Boivin et al., 1999 ; Marlet et al., 1999), et concomitamment les performances des systèmes irrigués sahéliens restent en deçà des espérances. En effet, la riziculture qui occupe la majeure partie des surfaces aménagées, obtient des rendements bien inférieurs aux potentiels et très variables. Ces résultats ne permettent pas de rentabiliser les aménagements qui par ailleurs se dégradent du fait d'un mauvais entretien.

L'évolution des sols (dégradation par salinisation, baisse de « fertilité » chimique) peut-elle expliquer ces mauvaises performances ? L'analyse des systèmes de cultures (c'est à dire des pratiques des producteurs), associée à une étude pédologique permet d'apporter des éléments de réponse à cette question. L'objet de ce papier est de présenter brièvement la situation des systèmes rizicoles irrigués dans la vallée du Sénégal et à l'Office du Niger, de décrire les méthodes utilisées pour effectuer un diagnostic agronomique et d'exposer les effets des pratiques culturales sur la variabilité des rendements et leur évolution.

2. Quelques caractères des performances agronomiques des systèmes rizicoles irrigués sahéliens

Nos travaux concernent essentiellement les systèmes irrigués dans la vallée du Sénégal (rive sénégalaise et mauritanienne) et secondairement, ceux de l'Office du Niger (Mali).

Au Sénégal, les périmètres irrigués ont été aménagés sur des sols hydromorphes à texture argileuse, contenant 30 à 70% d'argile, et riches en calcium. La présence de nappe ou d'horizon salé à plus ou moins faible profondeur constitue un risque. C'est pourquoi la plupart des « grands aménagements » dispose d'un réseau de collature permettant d'évacuer les eaux concentrées. Par contre, de nombreux périmètres villageois ou privés ne disposent pas d'un tel réseau.

A l'Office du Niger, la situation pédologique est plus risquée du fait de la texture plus sableuse, de la teneur plus faible en calcium, de la qualité des eaux et de l'âge de l'irrigation. L'évolution des sols par alcalinisation est déjà observée (Bertrand et al., 1993 ; PSI-Mali, 1999). L'aménagement dispose d'un réseau de collature, mais son état conjugué à une « mauvaise » gestion de l'eau conduit à un engorgement du réseau à l'aval.

Les rendements potentiels de la riziculture irriguée au Sahel sont très élevés (Dingkuhn, 1996) : ils varient selon la zone, la saison culturale et la variété, entre 6 et 12 t/ha. Compte tenu du climat, il est possible d'effectuer annuellement 2 cycles de culture. Par ailleurs, le riz est une culture relativement tolérante à la salinité (la conductivité électrique peut atteindre 0.30 mS). Néanmoins les variétés améliorées la supportent moins (certaines phases physiologiques sont plus sensibles) et on observe des pertes de rendement pouvant atteindre 50% (ADRAO, 1994).

Les résultats obtenus par cette riziculture dans la vallée du Sénégal sont décevants. Les rendements moyens fluctuent entre 4 et 5 t/ha (SAED, 1998) et de nombreux producteurs sont endettés. En effet, les coûts de productions sont élevés (2,5 tonnes d'équivalent paddy à l'hectare en moyenne) du fait de l'irrigation par pompage, de la mécanisation et de l'emploi d'engrais et d'herbicides.

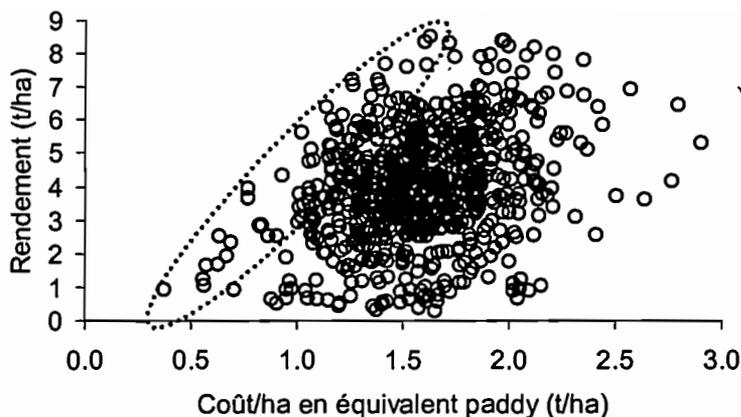


Figure 1 : Rendements obtenus en hivernage 1994, 1995 et 1996 dans les parcelles récoltées de la délégation de Dagana selon le coût/ha hors frais de récolte et de main d'œuvre. (Source : base de données SAED-DPDR). Les coûts sont exprimés en équivalent paddy

Néanmoins, derrière ces « moyennes » se cachent une grande variabilité de situations. Une enquête, effectuée par la SAED entre 1994 et 1996 sur un grand échantillon de producteurs situés principalement dans la zone du delta du Sénégal, montre d'une part que le rendement potentiel peut être atteint (le rendement maximum observé est 9 t/ha), et d'autre part que l'efficacité des coûts de production est extrêmement variable (Fig. 1). En effet, le coût unitaire de production (coût de production d'un kilo de paddy) hors frais de récolte et de main d'œuvre, varie entre 17 FCFA à près de 700 FCFA dans les parcelles récoltées. Néanmoins, dans les parcelles où les coûts sont valorisés au mieux (parcelles situées sur la courbe enveloppe de la relation rendement - coût), ce coût unitaire est inférieur à 30 FCFA par kilo de paddy. Malheureusement, ces parcelles représentent moins de 10% de l'échantillon.

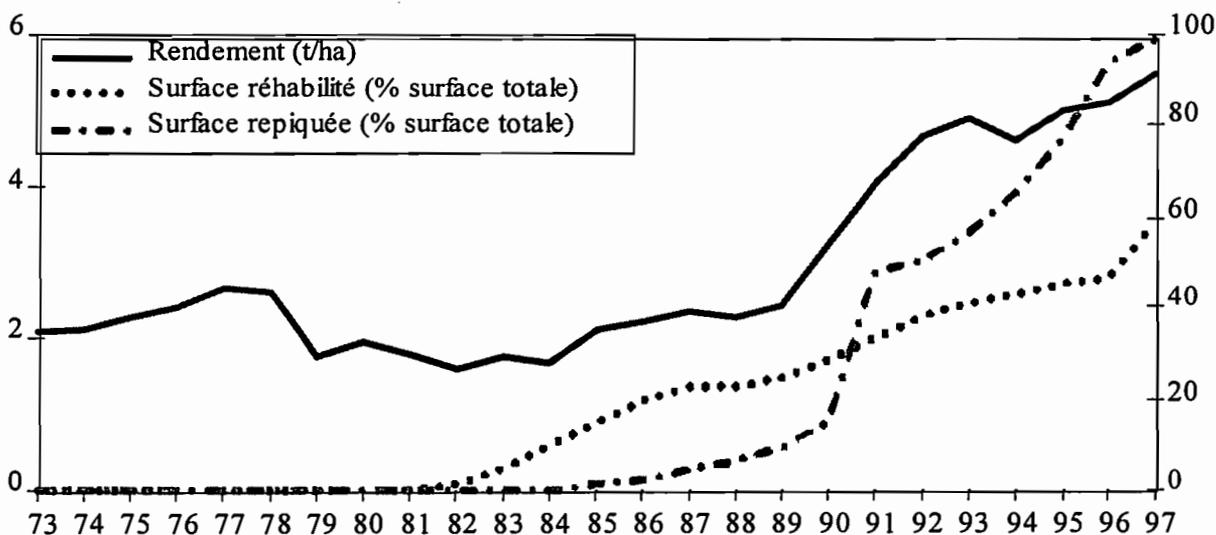


Figure 2: Evolution du rendement moyen pondéré par la surface, des surfaces réhabilitée et repiquée (en % de la surface totale) entre 1973 et 1997 à l'Office du Niger (source : Office du Niger)

A l'Office du Niger, les rendements moyens ont fortement progressé depuis la fin des années 1980 (Fig. 2). Cette forte augmentation est en partie liée aux travaux de réhabilitation des aménagements, mais aussi et surtout à la modification profonde des pratiques culturales avec l'adoption généralisée du repiquage. Cette nette amélioration de la situation (elle est devenue une référence pour les bailleurs de fonds) s'est effectuée malgré une évolution des sols jugée désastreuse. Actuellement, la

« dégradation » des sols est effective, mais elle semble s'exprimer différemment sur la culture selon le mode de conduite de la parcelle (PSI-Mali, 1999).

Par ailleurs, l'intensité culturale, qui est plus forte qu'au Sénégal, peut encore être améliorée : seules 10% des surfaces sont cultivées durant 2 saisons, mais les rendements obtenus sur ces parcelles sont nettement plus faibles.

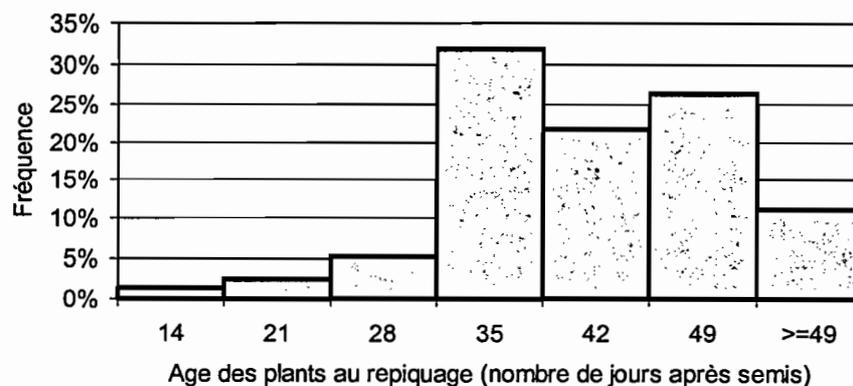


Figure 3 : Histogramme de l'âge des plants au repiquage en hivernage 1998 dans le secteur de Niono (source : F. Ouvry, PSI-Mali)

Nous avons utilisé les résultats d'une enquête effectuée par le PSI Mali concernant toutes les parcelles d'un arroseur du secteur de Niono. Cette enquête indique que plus de 90% des parcelles sont repiquées à plus de 30 jours (Fig. 3). Or un retard sur le repiquage provoque non seulement un allongement du cycle (et donc de la durée d'irrigation) mais aussi une baisse du tallage (et donc de la densité d'épis). On s'aperçoit donc que l'augmentation des rendements observée depuis 1990 peut encore être améliorée.

3. Méthodes utilisées pour le diagnostic agronomique

Le diagnostic agronomique a pour objectif d'identifier les facteurs et conditions (édaphiques ou non) qui limitent le rendement d'une parcelle. Le rendement est le résultat de la croissance de la culture. Il s'agit donc de comparer cette croissance à celle d'une culture conduite « au potentiel ». En pratique, cette comparaison s'effectue pour différents stades phénologiques clés. Les écarts de croissance sont alors attribués à « l'état du milieu » que les pratiques culturales font évoluer.

Les modèles d'élaboration des rendements utilisés classiquement par les agronomes, établissent de manière qualitative les effets des pratiques sur l'état du milieu et la réponse de la culture. La croissance « potentielle » peut être obtenue en utilisant un modèle physiologique. Mais lorsque ce modèle n'existe pas (ce qui est bien souvent le cas), on peut néanmoins comparer la croissance d'une culture sur différentes parcelles, paysannes et expérimentales, dans lesquelles on cherche à conduire « au mieux » la culture.

Nous avons mis en œuvre cette méthode dans la moyenne vallée du Sénégal, où les producteurs attribuaient leurs mauvais rendements à une « fatigue » des sols. Un suivi pédologique a été réalisé sur les mêmes parcelles afin d'identifier une éventuelle « dégradation » du sol (Boivin, 1998). Ne disposant pas de modèle de croissance suffisamment précis (ou ajusté pour la zone de travail et les variétés utilisées), nous nous sommes contentés d'une analyse statistique permettant de comparer l'élaboration du rendement dans les parcelles suivies. La connaissance des pratiques culturales réalisées sur ces parcelles nous permet ensuite d'identifier leurs effets sur l'élaboration des rendements.

Dans certains cas, il n'est pas nécessaire de mettre en place un dispositif de suivi très précis. Il suffit de disposer d'informations fiables quant aux pratiques des producteurs (variétés utilisées, doses d'engrais et d'herbicides appliquées, calendriers culturaux, irrigations) et aux rendements (mesurés et récoltés), complétées par quelques observations qualitatives en cours de culture (infestation par les

adventices, dégâts d'insectes...). C'est ainsi que nous avons procédé pour effectuer un diagnostic sur un périmètre villageois mauritanien.

4. Quelques résultats concernant l'effet du système de culture

La variabilité des rendements observés dans les parcelles paysanne dépasse très largement non seulement celle des sols, mais aussi celle des techniques culturales. En effet, les analyses de sol réalisées dans les parcelles suivies au Sénégal (tab. 1) n'indiquent ni de forte variation de pH, ni de problème de salinité (les sols les plus « légers » sont plus « salés »), ni de carence (forte) en P ou K (les producteurs apportent systématiquement du phosphore en début de cycle). Par ailleurs, le suivi de la solution du sol dans les parcelles suivies indique une concentration en carbonates et corrélativement une élévation du pH en cours de culture, mais pas de forte élévation de la conductivité électrique (Fig. 4).

Type de sol	Nombre de mesures		Arg. (%)	CEC (meq %)	pH eau	CE (mS)	K (meq %)	P total (ppm)	P Olsen-Dabin (ppm)
Holladé	64	Moy.	54.6	24.0	6.4	0.06	0.43	243	15.1
		E.T.	4.4	4.0	0.4	0.03	0.15	56	5.9
Faux Holladé	16	Moy.	42.8	18.9	6.5	0.07	0.39	216	16.4
		E.T.	4.3	5.0	0.6	0.04	0.20	55	9.3
Fondé	46	Moy.	28.2	12.0	6.2	0.09	0.25	198	20.7
		E.T.	4.1	2.5	0.5	0.06	0.21	67	15.2

Tableau 1 : Caractéristiques des sols dans les parcelles suivies. Moyennes et écarts types des teneurs en argile, CEC, pH, CE, K, P total et P Olsen-Dabin mesurées dans la couche 0-20 cm exploitée par les racines.

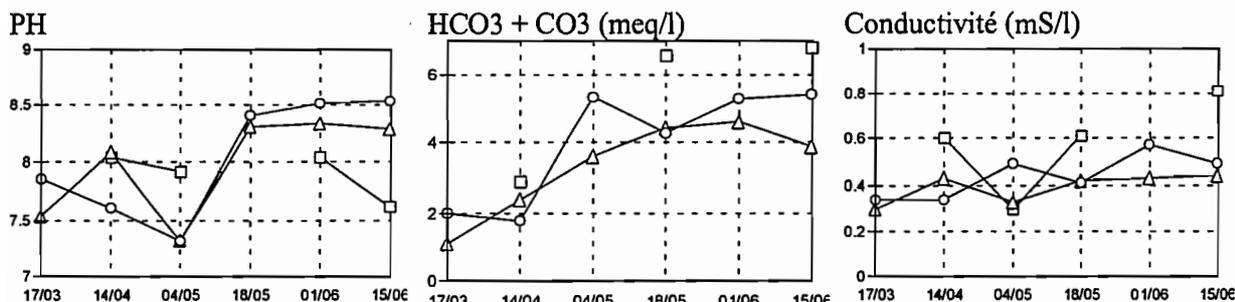


Figure 4 : Evolution de la solution du sol dans l'horizon de surface d'un vertisol irrigué

Au Sénégal et en Mauritanie, 2 types de « paquets techniques » sont utilisés. Ils diffèrent seulement par le mode d'implantation : semis direct dans la parcelle, ou repiquage. Mais, les producteurs mettent en œuvre ces 2 « paquets techniques » de manière extrêmement variée : densité de semis, âge des plants au repiquage, fertilisation, contrôle des adventices, conduite de l'irrigation...

Variabilité des rendements et de ses composantes au Sénégal

Les parcelles expérimentales que nous avons conduites sur les différents types de sols durant ces 2 années (semis direct en 1994 et repiquage en 1995) en cherchant à appliquer au mieux les techniques culturales, ont obtenu les meilleurs rendements. Excepté en saison sèche chaude 1994, l'amplitude de variation des rendements mesurés dans nos placettes (Fig. 5) est extrêmement forte (0 à 13 t/ha, soit le rendement potentiel). Le semis direct permet des rendements équivalents au repiquage en 1994, mais donne de moins bons résultats en 1995. L'analyse des composantes de rendement permet d'aller plus loin pour expliquer cette variabilité.

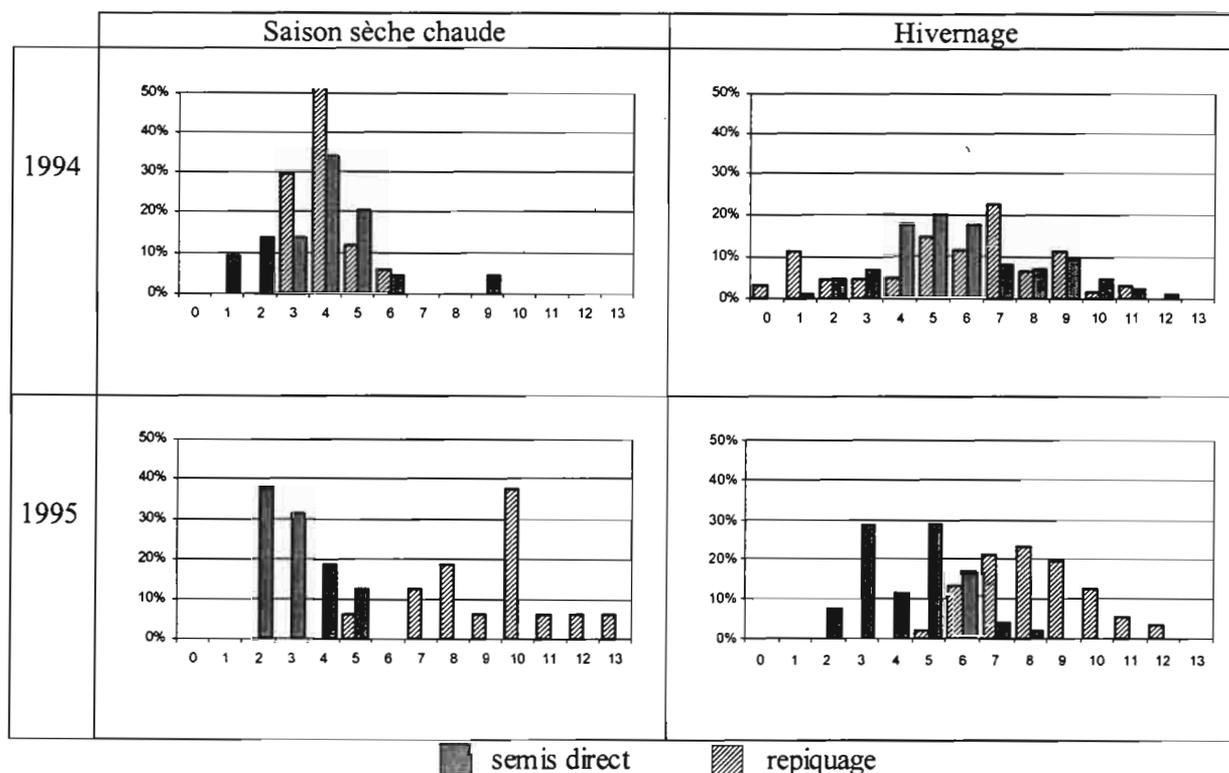


Figure 5 : Histogrammes des rendements mesurés dans les placettes selon l'année, la saison et le mode d'implantation

Notre analyse se fonde sur deux analyses en composantes principales suivies d'une analyse de co-inertie. Les 2 tableaux de données comportent en ligne les placettes, et en colonne l'état de la culture à la fin de l'implantation (densité de plantes, de talles et biomasse aérienne) pour le premier (ACP1), et les composantes de rendements mesurées à maturité (densité d'épis et d'épillets, poids de paille, fertilité des épillets et poids d'un grain) pour le second (ACP2). L'analyse de co-inertie est réalisée entre ces 2 tableaux. Elle permet d'en étudier la co-structure, c'est à dire le lien entre l'état de croissance mesuré à la fin de l'implantation et les composantes de rendement.

La représentation des placettes groupées selon le mode d'implantation dans les plans 1x2 des deux ACP (Fig. 6) montre que :

- La variabilité des densités dans les parcelles semées directement est extrêmement forte. Qualité du lit de semence, semis à la volée et défaut de planage des parcelles sont à l'origine de cette forte variabilité.
- Les densités plus importantes à l'implantation dans les parcelles semées directement ne conduisent pas systématiquement à des densités d'épis et de fleurs plus importantes. En revanche, les fortes densités d'épis et de fleurs dans les parcelles repiquées correspondent aux densités de repiquage les plus fortes.
- Les résultats obtenus dans les parcelles expérimentales sont parmi les meilleurs. Ceci montre l'impact de la qualité des interventions.

Le plan 1x2 de co-inertie (Fig. 7) résume 97% du plan 1x2 de l'ACP1, et 76% du plan 1x2 de l'ACP2. La structure commune aux deux tableaux traduit la forte co-variabilité des densités. Dans ce plan, les trajectoires des placettes, depuis leur position à l'implantation vers celle à maturité, sont différentes selon les pratiques culturales. On distingue 5 cas typiques :

- a) Fertilisation et désherbage corrects permettent de traduire les fortes densités de plantes et de talles en fortes densités d'épis et de fleurs (réalisation des potentiels définis après l'implantation).
- b) Fertilisation et désherbage insuffisants limitent les densités d'épis et de fleurs (réduction des potentiels).
- c) Un premier apport d'azote trop faible ou tardif limite les densités et la biomasse à l'implantation, mais on observe un rattrapage en fin de cycle.

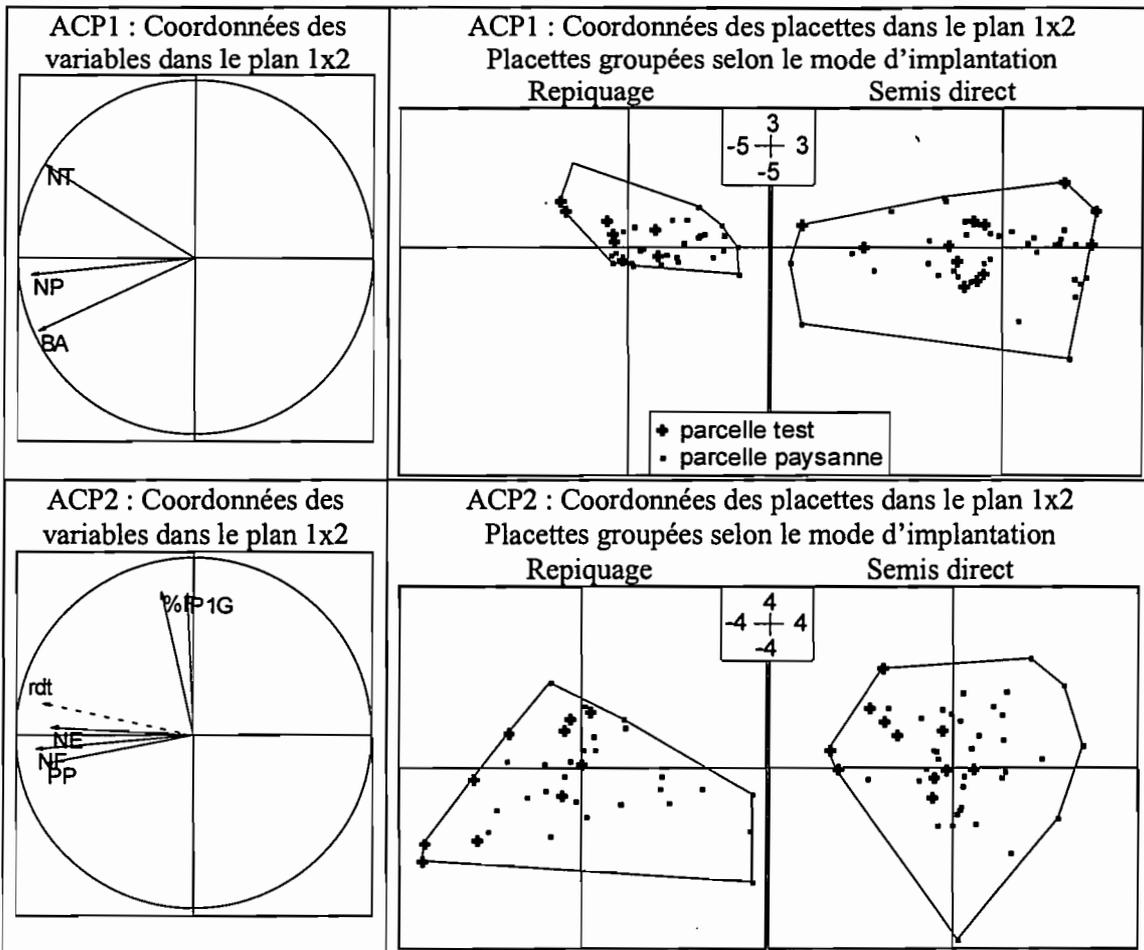


Figure 6 : Résultats des deux ACP.

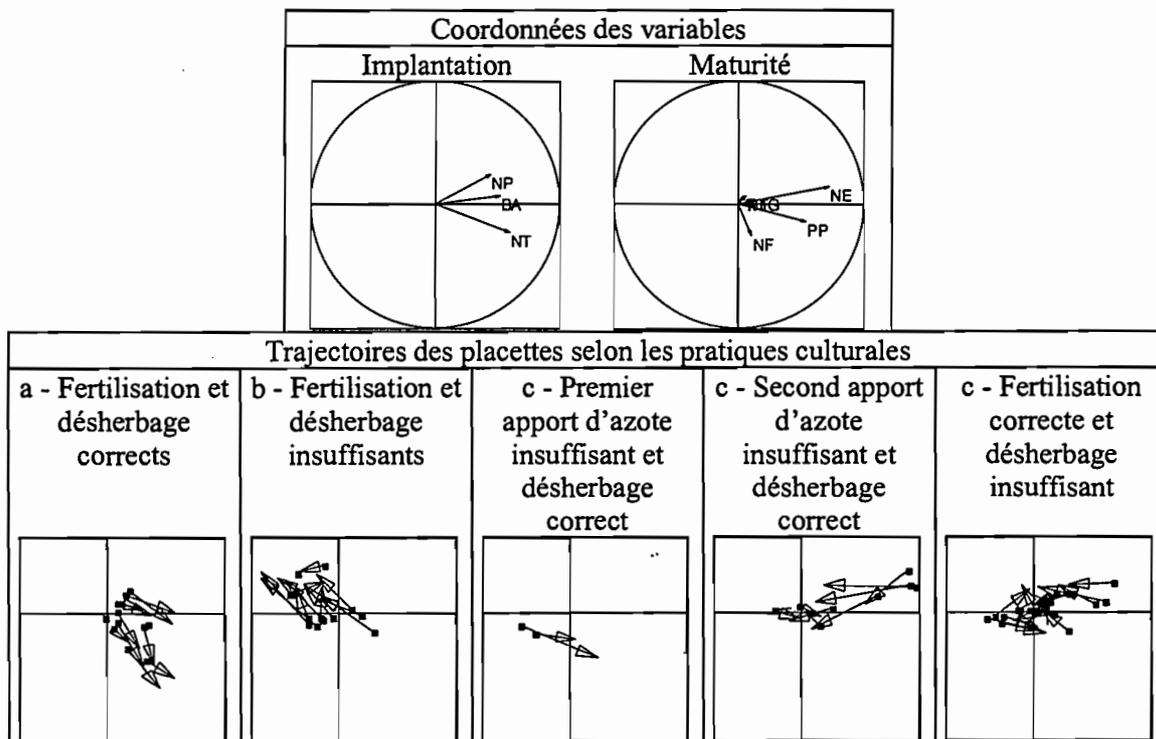


Figure 7 : Analyse de co-inertie - Plan factoriel 1x2

- d) Un second apport d'azote trop faible ou tardif limite la croissance des épis lorsque la densité d'implantation est forte.
- e) Un désherbage insuffisant ne permet pas des densités d'épis et de fleurs importantes.

La variabilité de mise en œuvre des techniques culturales, en influant directement sur la densité et la croissance à l'implantation, et la réalisation de la densité potentielle d'épis permis par cette implantation, explique l'essentiel de la variance des rendements. Dans la vallée du Sénégal, l'évolution des rendements influe directement sur les capacités financières des producteurs : un crédit de campagne n'est octroyé que si le précédent est remboursé. La baisse des rendements s'auto-entretient voire s'aggrave, car les moyens de production diminuent. L'impact de l'évolution du sol, s'il existe, n'est pas direct. En effet, l'élévation du pH observée en cours de cycle peut influencer sur l'efficacité de la fertilisation azotée en augmentant les pertes par volatilisation. Par ailleurs, le type de sol, sans conditionner directement le résultat, peut amplifier l'effet de mauvaises pratiques culturales : sur les sols très argileux, le travail du sol, réalisé généralement en conditions sèches, est plus difficile, tandis que sur les autres, la dégradation du réseau d'irrigation est plus rapide.

Effets du nombre d'irrigation et des retards des interventions culturales sur le rendement (Mauritanie)

Ce diagnostic a été effectué pour la campagne hivernale 1998 sur un petit périmètre irrigué villageois mauritanien, aménagé sur des sols de type hollaldé et faux hollaldé et ne disposant pas de réseau de collature. Nous disposons pour chacune des 120 parcelles de ce périmètre des informations suivantes :

- la position de la parcelle dans l'aménagement ;
- le type de sol (hollaldé ou faux hollaldé) ;
- la date de semis (semis direct) et la variété ;
- les dates, qualité et quantité des engrais apportés ;
- la date et dose d'herbicide appliqué ;
- le nombre d'irrigations (du semis à la maturité) ;
- le rendement de la parcelle mesuré dans un carré de 4 m de côté.

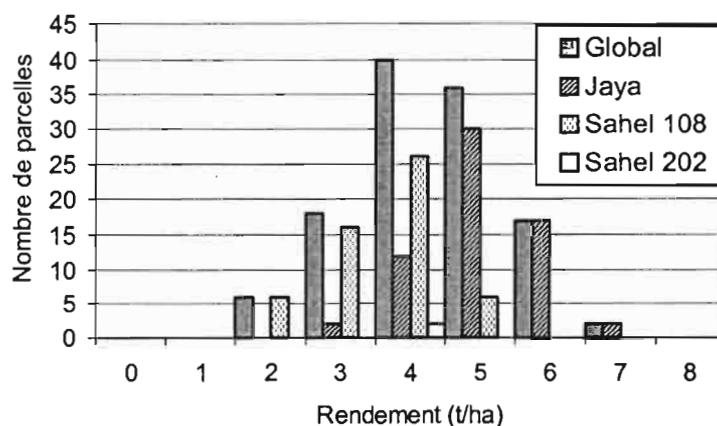


Figure 8 : Histogrammes des rendements

Malgré l'emploi de techniques culturales identiques (mode de semis, travail du sol, fertilisation...) et la faible variété de sols, l'histogramme des rendements indique une forte dispersion (Fig. 8) ainsi qu'une forte influence de la variété semée.

Le nombre d'irrigations sur chaque parcelle varie de 5 à 10, soit un intervalle entre 2 irrigations variant entre 10 et 20 jours. Or la variété Sahel 108 a été semée majoritairement dans les parcelles situées à l'aval du réseau, et qui sont irriguées moins souvent du fait du tour d'eau choisi par les producteurs et de la dégradation des canaux.

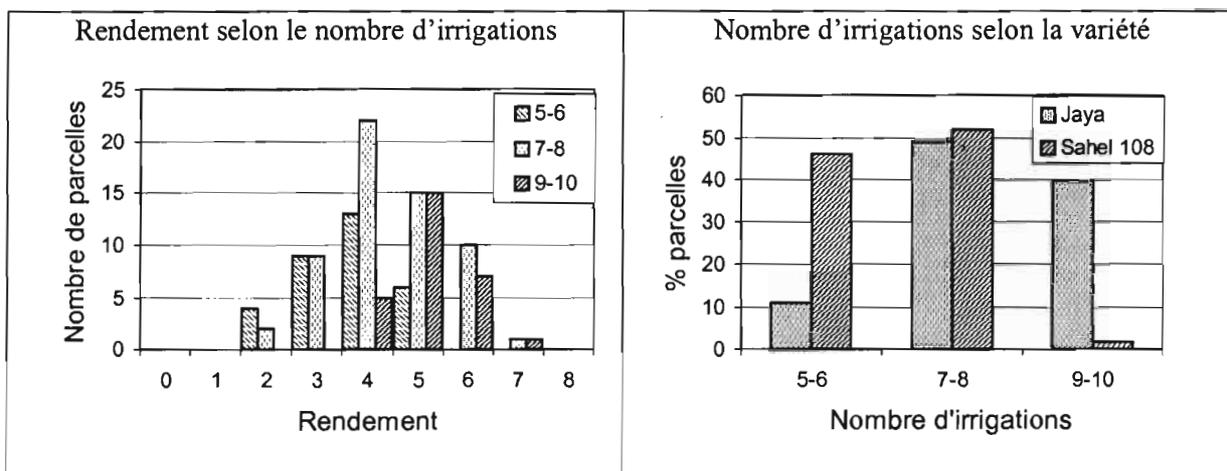


Figure 9 : Fréquence d'irrigation, variété semée et rendement

L'histogramme des rendements selon le nombre d'irrigations (Fig. 9) montre clairement l'influence de la fréquence d'irrigation sur les rendements. La comparaison des rendements (test de Scheffé) selon le nombre d'irrigations (5-6, 7-8, 9-10) est hautement significative. Et l'histogramme du nombre d'irrigation selon la variété confirme une fréquence d'irrigation plus faible dans les parcelles semées avec Sahel 108.

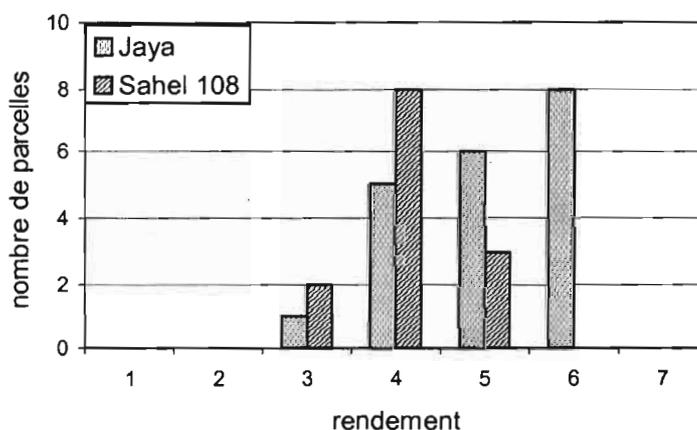
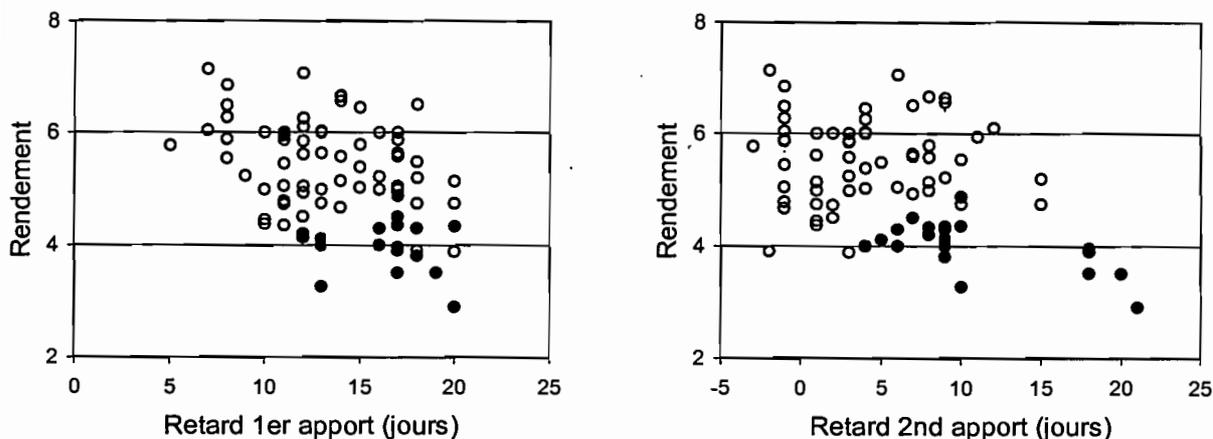


Figure 10 : Histogramme des rendements selon la variété dans les parcelles irriguées 7 ou 8 fois

La très faible fréquence d'irrigation dans près de la moitié des parcelles semées en Sahel 108 explique en grande partie les faibles rendements obtenus avec cette variété. Néanmoins, dans les parcelles irriguées 7 ou 8 fois les rendements obtenus avec Jaya demeurent plus élevés que ceux obtenus avec Sahel 108 (Fig. 10). Les faibles performances de Sahel 108 pourraient alors être liées à la salinité, car ce périmètre ne dispose pas de réseau de collature et la variété Sahel 108 est plus sensible que la variété Jaya. Des mesures de conductivité électrique permettraient de confirmer cette hypothèse.

Comme dans la plupart des périmètres irrigués de la vallée du Sénégal (ou de l'Office du Niger), les interventions culturales sont souvent réalisées en retard. Dans notre cas, les 120 parcelles ont toutes reçu les mêmes doses d'engrais, mais les dates d'apports ne sont pas bien calées sur le stade de la culture (début tallage pour le premier apport, et début montaison pour le second). La figure 11 illustre l'effet du retard de l'apport sur le rendement du riz, selon la variété, dans les parcelles irriguées 7 ou 8 fois. Le rendement maximum obtenu décroît avec l'augmentation du retard.



○ Jaya ● Sahel 108

Figure 11 : Effet du retard d'application d'urée sur le rendement

Ce retard est plus important dans les parcelles semées en Sahel 108. En effet, cette variété récemment diffusée chez les producteurs est plus précoce que Jaya (une dizaine de jours en hivernage). Mais les recommandations techniques concernent des variétés de cycle moyen comme Jaya : « 1^{er} apport 30 jours après semis », « 2nd apport 60 jours après semis ». Les producteurs ont relativement bien respecté des recommandations impropres à la variété Sahel 108 (et impropres également à Jaya lorsqu'elle est cultivée en saison sèche chaude !).

5. Conclusion

Le caractère fertile d'un sol signifie sa capacité à produire, **toutes choses égales par ailleurs**. Bien souvent, les agriculteurs sont capables d'évaluer cette capacité. Comme à l'Office du Niger, leurs pratiques (le « système de culture ») évoluent, et lorsqu'ils ont le choix, les producteurs donnent la priorité aux parcelles les plus « fertiles » et abandonnent celles qui le sont moins. Statuer sur l'état de fertilité des sols et son évolution ne peut donc se faire sans tenir compte des pratiques paysannes, de leurs conséquences et sans doute aussi de leurs causes.

L'évolution des propriétés bio-physico-chimiques des sols a sans nul doute des répercussions sur ses capacités à produire. Ainsi, le développement de l'irrigation au Sahel a profondément modifié le fonctionnement hydrique des sols et génère de graves risques pour leur conservation. Néanmoins, l'impact de cette évolution, tant qu'elle n'a pas atteint de « seuil critique » (et bien souvent irrémédiable) pour la production agricole, n'est pas évident car les pratiques des producteurs, dont la maîtrise technique est encore faible, expliquent l'essentiel de la variabilité des rendements. Ce défaut de maîtrise technique est la principale cause des contre-performances des systèmes irrigués dans la vallée du Sénégal : non-compétitivité du riz local, faible intensité culturale, endettement des producteurs, abandon des aménagements... Il est aussi bien souvent à l'origine de la dégradation de sols (appauvrissement en éléments minéraux par défaut de fertilisation, salinisation par défaut de drainage...).

Nos propositions en matière de conservation des sols doivent converger afin d'éviter d'atteindre ce « seuil critique ». Mais pour être opérationnelles, c'est à dire mises en œuvre par les producteurs, elles doivent être cohérentes avec les stratégies des producteurs. Ainsi, la mise en jachère permet de reconstituer le stock de matière organique d'un sol et constitue un moyen efficace de lutte contre les mauvaises herbes. Cependant, si 5 ans de jachère permettent de doubler le rendement la première année, les producteurs n'omettent pas dans leur calcul l'absence de production durant 5 ans !

Evaluation et simulation des transferts hydro-salins dans les sols argileux.

Claude Hammecker IRD, Dakar

1. Introduction

Dans la vallée du fleuve Sénégal la riziculture irriguée s'est développée ces dernières décennies après la construction de deux barrages permettant de réguler le niveau et la qualité de l'eau du fleuve. Les périmètres irrigués sont aménagés essentiellement dans des cuvettes de décantation sur des sols alluviaux argileux qui par endroit peuvent atteindre des teneurs en argile de 70%. L'irrigation présente un risque de dégradation du sol par salinisation. Ce processus doit théoriquement dépendre en grande partie des flux d'eau et de solutés, et donc des propriétés de transfert des solutions des sols. L'étude présentée ici est située dans la région de Podor, plus particulièrement dans le périmètre irrigué villageois IT1 de Donaye. Sur ce site le sol est caractérisé par un dépôt argileux de deux mètres d'épaisseur surmontant les dépôts sableux du Nouakchottien renfermant l'aquifère. Ce sol renferme de 60 à 70% d'argiles (kaolinite, smectites ferrifères et interstatifiés) et développe des caractères vertiques très nets, dont des fentes de retrait pouvant atteindre 50-60 cm de profondeur et 15 cm de large. Par ailleurs ces parcelles sont caractérisées par l'absence de drainage.

2. Quantification des transferts hydro-salins

Le bilan hydro-salin a été quantifié sur plusieurs saisons de cultures. Un dispositif expérimental de mesure des entrées d'eau, de l'évapotranspiration (cases lysimétriques) et du stockage d'eau dans le sol (mesure de l'humidité pondérale au cours de la culture le long du profil) et de la lame d'eau superficielle a permis de quantifier le bilan hydrique. Par ailleurs deux sites de mesures tensiométriques et de prélèvement de solution du sol par bougies poreuses ont été installés. L'infiltration à l'échelle de la parcelle, déterminée à partir de ces mesures est nulle. Ce résultat est confirmé par l'évolution du profil tensiométrique, pour lequel on observe une saturation extrêmement lente du tensiomètre à 40 cm de profondeur. Pour simuler une évolution équivalente lors de la campagne de culture avec un modèle de transferts hydriques unidirectionnel et monophasique, il faut imposer au sol une conductivité hydraulique à saturation de 0.25 mm/j, qui dans ce cas n'a qu'une valeur de paramètres d'ajustement. En fait il existe un processus de piégeage d'air entre deux fronts d'imbibition qui limite, voire bloque, l'infiltration de l'eau d'irrigation (Hammecker et al., 1999).

L'eau d'irrigation, pompée du fleuve, est très douce et présente un faciès chimique carbonaté calci-magnésien. Cependant elle présente également une alcalinité résiduelle calcite positive ($Alc > Ca \times 2$) et en saison sèche une alcalinité calcite + silicates magnésiens positive ($Alc > [Ca + Mg] \times 2$). L'irrigation avec une eau de cette qualité sous des conditions évaporatoires typiques des régions sahéliennes comporte par conséquent le risque d'un processus d'alcalinisation. L'eau de la nappe par contre est plus concentrée est présente un faciès sulfaté chloruré sodique.

Le suivi de la solution du sol dans les bougies poreuses montre une augmentation de la concentration de tous les cations. L'alcalinité et les sulfates augmentent également au cours de la saison de culture, par contre la teneur en chlorures baissent systématiquement pendant cette période pour revenir à la même concentration à chaque début de saison culturale. Le suivi sur quelques années montre une accumulation de carbonates et suggère une évolution alcaline.

3. Modélisation des transferts couplés et interprétation

Le modèle couplé utilisé pour essayer de simuler l'évolution physico-chimique de ce profil de sol est LEACHM (Hutson et Wagenet, 1992). Il s'agit d'un modèle décrivant les transferts hydriques mono-

dimensionnels en milieu non saturé par résolution numérique de l'équation de Richards par la méthode des différences finies. Les transferts de solutés sont quant à eux modélisés par la résolution numérique de l'équation de convection-dispersion. Les équilibres chimiques sont évalués après calcul des activités ioniques (Debye Hückel) et des interactions avec le complexe d'échange cationique (Gapon). La saturation est calculée pour le gypse et la calcite et la composition de la solution ainsi que l'éventuel stock minéral est ajusté en fonction du produit ionique.

Les résultats de la simulation montrent une augmentation de la concentration des cations mais, contrairement aux résultats expérimentaux, la concentration de l'alcalinité diminue au fil des cycles culturaux. Ce résultat s'explique par la désorption de calcium du complexe d'échange lors de la précipitation de calcite. La solution se trouve alors avec une alcalinité résiduelle calcite négative entraînant une évolution vers une diminution de l'alcalinité. D'un autre côté le modèle prévoit une augmentation régulière de la teneur en chlorures alors que les chlorures diminuent cycliquement à chaque saison de culture. 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 (Favre et al., 1999). Par ailleurs des résultats récents ont montré que la phase de submersion pendant toute la culture (100 jours) provoque une réduction du fer structural des smectites ferrifères dans ce sol, avec une importante augmentation de la capacité d'échange cationique (Favre et al., 1999). Au cours de cette réduction les coefficients de sélectivité varient pour les différents cations. Ces différentes possibilités, qu'il s'agisse des transferts hydriques biphasiques (présence d'eau et d'air dans le réseau poral), des processus d'oxydoréduction, de l'éventualité d'une CEC et des coefficients de sélectivité variables, et de l'éventualité de la précipitation d'une espèce minérale contenant des chlorures, ne sont pas prévues dans le modèle utilisé.

4. Conclusion

Le bilan hydro-salin dans les sols argileux de la vallée du fleuve Sénégal a pu être suivi sur différentes saisons de culture. On a pu observer une accumulation de carbonates et une augmentation du pH de la solution du sol, en accord avec la composition de l'eau d'irrigation. Pour prévoir l'évolution du système à plus long terme, on a eu recours à la simulation numérique, qui dans ce cas s'est trouvée en complète contradiction avec les résultats expérimentaux. 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. 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.

Ion transfers, iron reduction and mineralogical implications in irrigated fields : new results for soil and water quality management under irrigation.

Fabienne Favre (1), Pascal Boivin (2), Daniel Tessier (3) et Claude Hammecker (4)

(1) EPFL , CH 1015 Lausanne

(2) IRD-ORSTOM, BP 5045 Montpellier, France

(3) INRA, Route de St Cyr, 78850 Versailles, France

(4) IRD, BP 1386 Dakar, Sénégal

Irrigation is very often related to environmental problems. Due to the high evaporative demand, salt accumulation is induced by irrigation in arid or semi arid regions. The resulting salinisation of soils and water tables is one of the most important factor limiting irrigated crops in dry lands. Under temperate climate, irrigation is mainly concerned with pollutant transfers such as nitrates or heavy metals.

Therefore, modeling solute and water transfers at field scale has been an increasing research field in the past years, as an attempt to forecast the environmental consequences of water management practices. Those models generally simulate transfers only in the vertical dimension, and take into account the most important processes occurring during transfers, e.g. convection, dispersion, diffusion, mineral dissolution and precipitation, and exchanges with the clay fraction. This last process is often neglected. If not, it is commonly considered in soil science that (i) the exchange capacity of a soil is constant in time and (ii) that only cations are involved in exchange processes.

Those assumptions are contradictory with results we obtained when monitoring soil solution evolution in an irrigated field in north Senegal. Using LeachM code and field monitoring, we demonstrate (i) that transfers and associated processes cannot explain the observed cation and anion concentration evolution in time, (ii) that the exchange capacity of the soil under reducing conditions (when the soil is flooded) can be two or three times more elevated than the exchange capacity of the dry soil (before cultivation), (iii) that this increase in exchange capacity is due to clay structural iron reduction, (iv) that the corresponding cationic free exchange sites could adsorb hundredth of times more cations than brought by irrigation water in the same time, and (v) that this process is reversible, at the end of the cropping season, when the soil is dried. Furthermore, free-iron oxides probably modify the anion balance when iron is reduced.

These results are very important for understanding soil functioning and solute transfers in temporary reduced soils, which is often the case in irrigated lands, because they completely modify the soil solution composition when transfers occur, and because very big amounts of ions can be fixed (when reducing the soil) and released (when oxidizing the soil). The corresponding processes are of great importance for predicting environment evolution in relation with water management practices.

ALCALINISATION DES SOLS EN RIZICULTURE SOUS SUBMERSION À L'OFFICE DU NIGER : FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE ET ÉVOLUTION DES SOLS SOUS IRRIGATION

Serge MARLET, Mamadou Kabirou N'DIAYE et Florence OUVRY

Après environ 50 années de mise en valeur des périmètres irrigués de l'Office du Niger, des symptômes de dégradation des sols par salinisation, alcalinisation ou sodisation apparaissent localement sur les parcelles irriguées. Après Toujan [1], Bertrand [2] et N'Diaye [3], de nombreuses études ont confirmé des valeurs localement élevées du pH, du taux de sodium échangeable ou de la conductivité électrique même si les auteurs divergent parfois quant à leur appréciation de la gravité du phénomène ou de sa tendance évolutive. Pour les uns, il s'agit d'un phénomène grave qui met en péril la pérennité des aménagements de l'office du Niger. Pour les autres, ce phénomène reste localisé et l'amélioration de la maîtrise de l'eau liée à la réhabilitation des périmètres est susceptible de prévenir une extension de la dégradation sous riziculture irriguée.

Dans un contexte fortement anthropisé, ce ne sont plus seulement les conditions climatiques mais aussi les modes de gestion de l'irrigation et du drainage et la dynamique de la nappe qui déterminent les transferts et la distribution des solutés. Dans cette communication, les principaux mécanismes hydrologiques intervenant dans l'alcalinisation des sols à l'Office du Niger seront analysés.

RÉSULTATS

NATURE DE L'ÉVOLUTION DES SOLS [4]

Les eaux d'irrigation sont caractérisées par une alcalinité résiduelle positive [5] et les sols évoluent dans un contexte d'alcalinisation lorsqu'elles se concentrent (Fig. 1). Lors de l'aménagement des terres du delta central, Dabin [6] notait que les sols n'étaient ni salés, ni sodiques et que leur pH était acide. Dans une première phase de mise en valeur des sols sous irrigation, l'alcalinité et la sodicité des sols argileux a augmenté ; les sols sableux ont été globalement épargnés par le phénomène. La dynamique actuelle est sensiblement différente puisque le pH, la conductivité électrique et la sodicité des sols sableux augmentent alors que ces indicateurs diminuent sur les sols argileux (fig.2). Ces évolutions sont particulièrement sensibles dans l'horizon superficiel tandis que les propriétés des horizons profonds restent partiellement héritées des évolutions antérieures. La sodicité des sols sableux est souvent plus élevée en raison d'un moindre pouvoir tampon de ces sols. Elle favorise la dégradation des propriétés physiques des sols à partir d'une valeur seuil de l'ESP de 5 à 7%. La topographie joue un grand rôle dans la distribution des sels à différentes échelles, les points hauts apparaissant, aux yeux du chercheur comme à ceux du paysan, comme les plus affectés (fig.3). Les manifestations de la dégradation des sols sont sensiblement plus importantes dans les secteurs maraîchers.

FONCTIONNEMENT DE LA NAPPE [7]

Au début de la saison rizicole, la nappe remonte rapidement puis affleure pendant toute la campagne jusqu'à la vidange des casiers précédant la récolte (fig.4). Elle descend alors pour atteindre une profondeur maximale de 1 à 1,5 mètres pendant la contre-saison.

L'écoulement de la nappe régionale vers l'extérieur des périmètres irrigués correspond à une lame d'eau équivalente de 15 mm/an et n'influence que de façon marginal le

fonctionnement de la nappe phréatique. Les gradients hydrauliques montrent que la nappe est rechargée par les canaux d'irrigation pendant toute l'année. En fonction de la perméabilité de l'aquifère, ces flux correspondent à une lame d'eau équivalente de 1 à 2 mm/j sur les levées sableuses perméables mais restent inférieurs à 0.5 mm/j sur les cuvettes argileuses (fig.5 et 6). Pendant la campagne rizicole, on observe un drainage souterrain de la nappe vers le drain d'arroseur dont l'intensité n'excède pas celle de la recharge de la nappe malgré une nette diminution des pertes dans les canaux lorsque la nappe est affleurante. Les flux hydriques apparaissent ascendant pendant la plus grande partie de l'année dans la zone saturée.

BILAN DES EAUX ET DES SELS À L'ÉCHELLE DE L'AMÉNAGEMENT [8]

En raison du faible drainage naturel du milieu, l'évacuation des sels est principalement tributaire du réseau de drainage superficiel [9].

Pendant la campagne rizicole, les volumes drainés sont considérables et atteignent 47% des apports d'irrigations. Le bilan de sels est alors déficitaire. Près de la moitié de ces volumes sont issus de la vidange, volontaire ou non, des bassins d'irrigation et représentent 73% des sels évacués par le système de drainage. Le drainage souterrain n'en représente que 9% tandis que le reste est lié à des pertes dans le système hydraulique. Pendant la contre-saison, les apports sont sensiblement supérieurs aux besoins en raison de pertes dans les canaux d'irrigation estimées à 1.5 mm/j. Le drainage est très faible et le bilan des sels est excédentaire. A l'échelle de l'année, le bilan des sels est relativement proche de l'équilibre.

DISCUSSION

Les flux d'eau apparaissent globalement ascendants dans les parcelles irriguées de l'Office du Niger. L'évacuation des sels qui tendent à s'accumuler dans les horizons superficiels est principalement due à la diffusion des sels vers la lame d'eau superficielle et à la vidange des casiers rizicoles (drainage superficiel, flushing). Dans ce contexte globalement proche de l'équilibre, certaines situations apparaissent cependant plus affectées par des problèmes de dégradation des sols. Depuis la réhabilitation des aménagements, la maîtrise de l'irrigation a permis le développement des cultures de contre-saison. Les canaux d'irrigation restent en eau sur la majeure partie du périmètre et contribuent à la recharge de la nappe. Sur les formations sableuses perméables, ce flux important favorise la concentration des sels dans les horizons superficiels. Malgré une nette amélioration des conditions d'irrigation et de drainage, certains points hauts ne bénéficient pas d'une bonne maîtrise de la lame d'eau et le drainage superficiel y est difficile et peu efficace. En l'absence de lessivage les secteurs maraîchers sont particulièrement exposés à la dégradation des sols.

Le risque de dégradation de la fertilité des sols par alcalinisation apparaît modéré dans le contexte actuel de gestion du système hydraulique et des systèmes de culture. Cependant, les perspectives d'évolution se traduisent par un accroissement des facteurs de risque liés à l'augmentation des superficies irriguées (disponibilité en eau, qualité des aménagements, développement des cultures de diversification,...).

Que ce soit au niveau de la nappe ou de la lame d'eau superficielle, la composante horizontale des flux est primordiale sur l'évolution de la solution du sol. Ainsi, les mécanismes mis en jeu dépassent le cadre des modèles de transport monodimensionnel et vertical, couramment utilisés pour décrire ces évolutions.

RÉFÉRENCES

1. Toujan, M., 1980. Aménagement hydroagricole dépendant du canal du Sahel. Evolution des sols irrigués. Office du Niger-SOGREHA, Segou

2. Bertrand, R., 1985. Sodisation et alcalisation des sols de l'Office du Niger (Mali), CIRAD-IRAT, 25 p.
3. N'Diaye, M.K., 1987. Evaluation de la fertilité des sols à l'Office du Niger (Mali), contribution à la recherche des causes et origines de la dégradation des sols dans le Kouroumarî. Thèse doct. ing., INP Toulouse, 133 p.
4. Marlet, S. et M.K. N'Diaye, 1998. Evolution temporelle et variabilité spatiale des indicateurs de la dégradation des sols par alcalinisation et sodisation à l'Office du Niger. *PSI-Mali: étude et travaux n°6*, IER, Bamako, Tome 1: synthèse des travaux, 53 p. & Tome 2: compte-rendus d'expérimentation, 124 p. + annexes
5. Marlet S., V. Vallès, F. Lafolie and N. Condom, 1998. Hydrogeochemical modeling: a suitable approach to predict the effect of irrigation on soil salinity, sodicity and alkalinity. *Communication in: 16th ISSS world congress, August 1998, Montpellier, France.*
6. Dabin, B., 1951. Contribution à l'étude des sols du delta central nigérien. *L'agronomie Tropicale*, 6: 606-637
7. Marlet, S., et M.K. N'Diaye, 1999. Dynamique de la nappe sous l'influence de l'irrigation à l'Office du Niger. *PSI-Mali : étude et travaux n°9*, IER Bamako
8. Ouvry, F et S. Marlet. Suivi de l'irrigation et du drainage, Etude des règles de gestion de l'eau et bilan hydro-salin à l'Office du Niger (cas de la zone de Niono, Mali). *PSI-Mali : étude et travaux n°8*, IER, Bamako
9. Barral, J.P., S. Marlet, M.K. N'Diaye, A. Valenza, M.K. Dicko, Bréhima Tangara et J.C. Grillot, 1996. Fonctionnement des nappes en relations avec la dégradation des sols à l'Office du Niger. *PSI Mali, Travaux et Etude n°2*

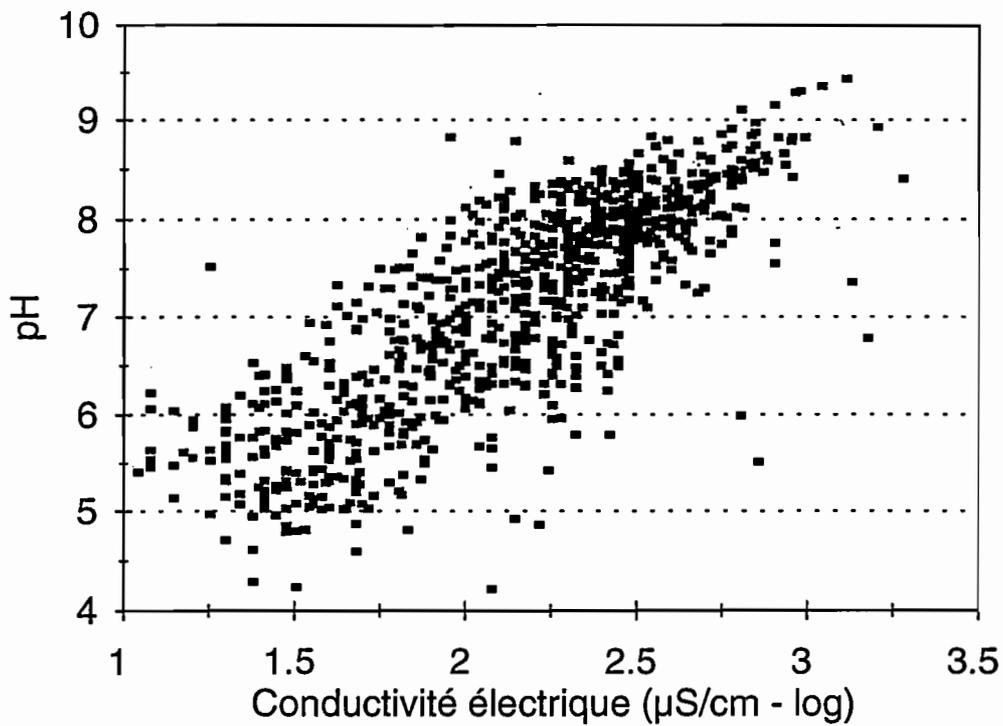


Figure 1. Alcalinisation des sols à l'Office du Niger : Relation entre le pH et la conductivité électrique (extrait 1:2.5)

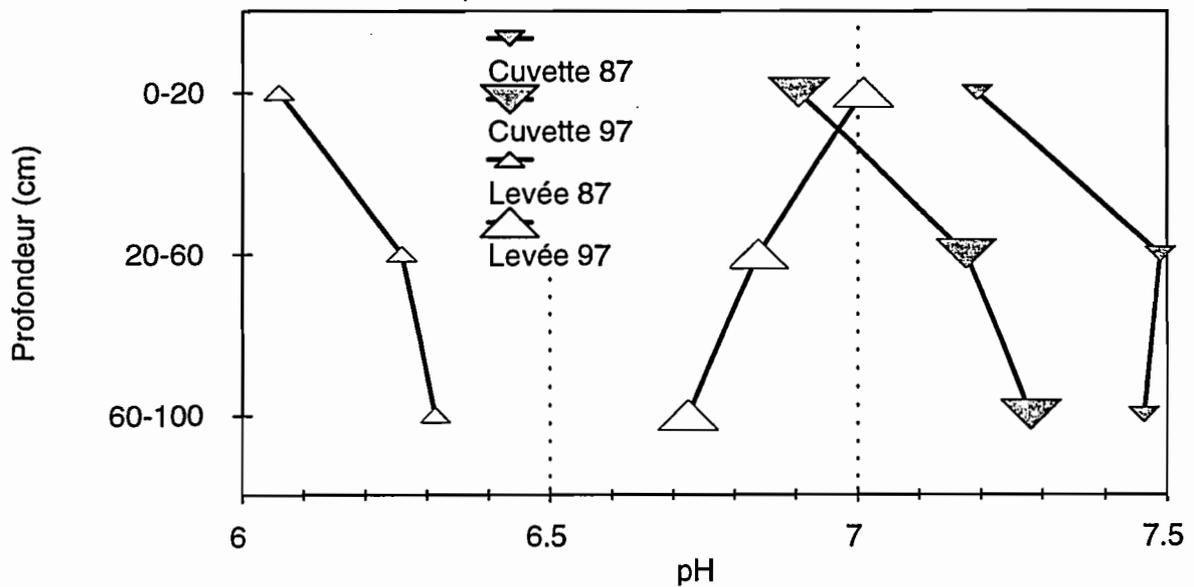


Figure 2. Influence de la texture sur l'alcalinisation des sols à l'Office du Niger : Evolution du pH des sols de levées sableuses et de cuvettes argileuses entre 1987 et 1997 (extrait 1:2.5)

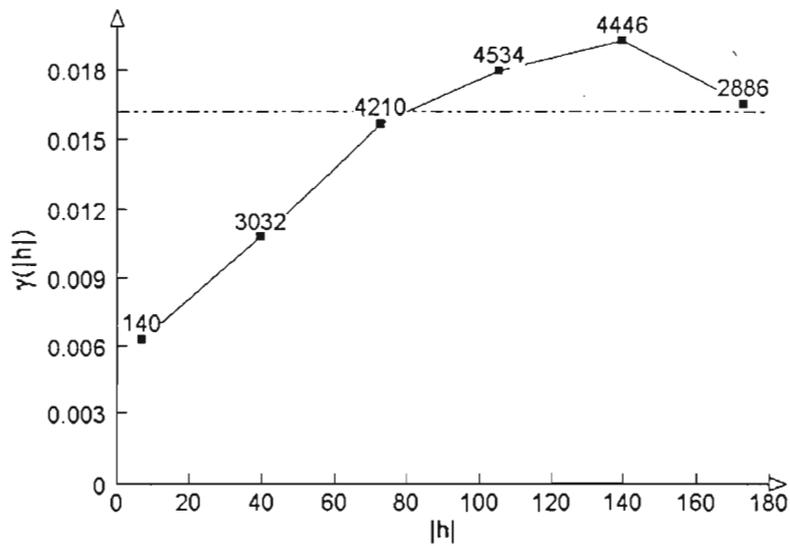


Figure 3. Influence de la topographie sur l'alcalinisation des sols à l'Office du Niger : Variogramme croisé (co-variogramme) entre l'altitude et le pH dans l'horizon 20-30 cm (extrait 1:2.5 - 315 échantillons)

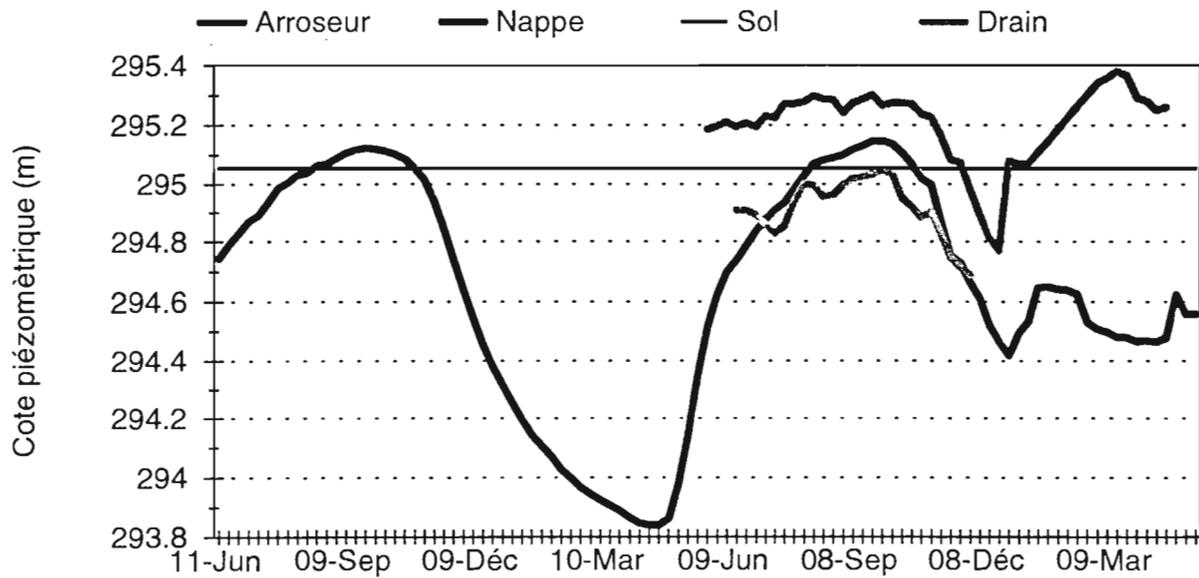


Figure 4. Dynamique de la nappe sous culture à l'Office du Niger en relation avec le réseau hydraulique tertiaire (arroseur et drain d'arroseur) : exemple de l'arroseur N1-2D-3g

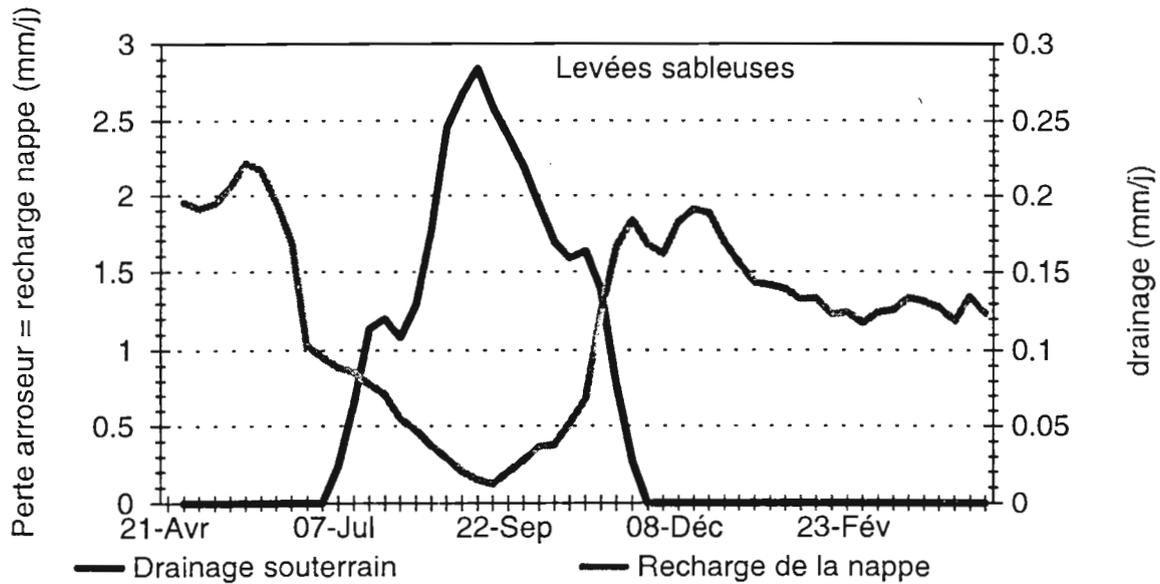


Figure 5. Dynamique de la nappe sous culture à l'Office du Niger : Flux moyens de recharge et de drainage de la nappe sur sols perméables de levées sableuses

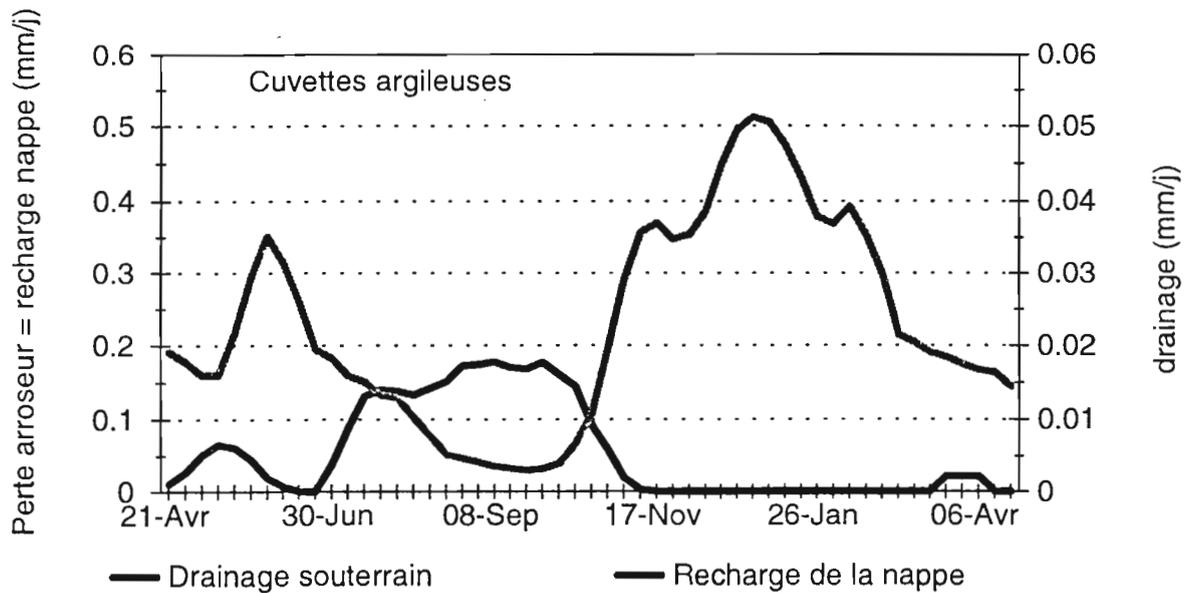


Figure 6. Dynamique de la nappe sous culture à l'Office du Niger : Flux moyens de recharge et de drainage de la nappe sur sols peu perméables de cuvettes argileuses

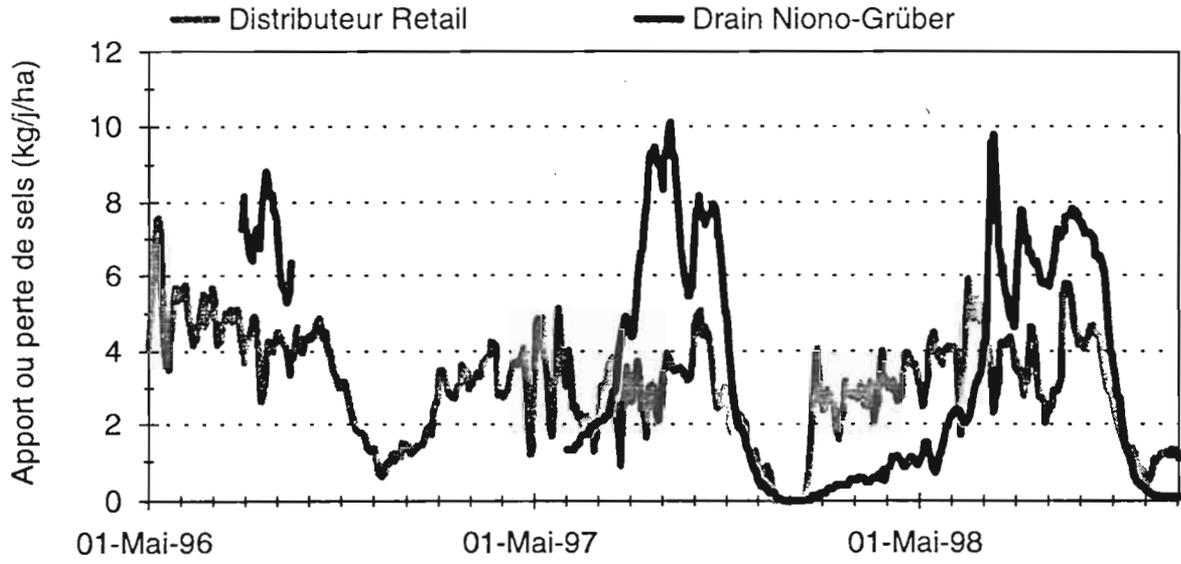


Figure 7. Bilan des sels à l'échelle du distributeur Retail

ALCALINISATION DES SOLS EN RIZICULTURE SOUS SUBMERSION À L'OFFICE DU NIGER : INFLUENCE DES PROCESSUS MICROBIOLOGIQUES SUR L'ÉVOLUTION DES SOLS ET L'IMPACT DE LA DÉGRADATION

Serge MARLET, Alain AVENTURIER, Mohamed Koulam DICKO, Nicolas CONDOM et Michel PUARD

Les sols évoluent globalement dans un contexte d'alcalinisation en relation avec la qualité des eaux apportées par l'irrigation [1]. Cependant, le faciès géochimique de la solution du sol apparaît variable et témoigne de l'existence de processus plus diversifiés que la seule concentration progressive des eaux apportées par l'irrigation. Une première interprétation suppose l'existence d'une source de sels fossiles mobilisés par la remontée de la nappe phréatique sous l'influence de l'irrigation [2]. Une seconde mettrait en jeu différents processus biogéochimiques intervenant dans les bilans d'alcalinité sous submersion et susceptible de réduire l'impact de l'alcalinité de la solution du sol sur les cultures [3,4]. Dans cette communication, ces processus biogéochimiques seront analysés.

RÉSULTATS

FACIÈS GÉOCHIMIQUE DES SOLS

L'étude des propriétés chimiques du sol au laboratoire met généralement en évidence une augmentation de la conductivité électrique et une diminution du pH à mesure que l'on s'approche de la surface (fig.1). La concentration de sels est la résultante du fonctionnement hydrologique du milieu au sein duquel les flux sont globalement ascendants sous l'influence de la nappe. La baisse du pH est contraire aux résultats attendus de la concentration de la solution du sol et suppose l'existence d'un mécanisme de neutralisation de l'alcalinité dans l'horizon superficiel.

Afin de caractériser simplement l'alcalinité du faciès géochimique des sols, nous avons calculé les résidus de la régression linéaire entre le pH et le logarithme de la conductivité électrique d'une suspension de sol (1:2.5). Ce faciès géochimique est étroitement corrélé à la topographie des parcelles rizicoles (fig.2), les points hauts apparaissant comme les plus alcalins.

ÉVOLUTION DE LA SOLUTION DU SOL SOUS SUBMERSION

En riziculture irriguée sur sols alcalins, les caractéristiques de la solution du sol dans l'horizon superficiel (0-20 cm) évoluent très sensiblement pendant le cycle de culture (fig.3) :

- Le pH *in situ* augmente pendant la première phase du cycle précédent l'établissement d'une lame d'eau continue et la saturation du profil. Puis il diminue de façon continue alors que la pression partielle en CO₂ augmente pour atteindre une valeur élevée proche de 0.05 atm., soit plus de 100 fois sa pression partielle dans l'atmosphère.
- Avec la mise en eau puis l'engorgement de l'ensemble du profil, le potentiel redox diminue progressivement jusqu'à un palier proche de +100 mV. Il n'augmente qu'à l'issue du cycle avec la vidange de la parcelle précédent la récolte ; il s'accompagne d'une diminution du pH *in situ*.
- La molalité en chlorure diminue de façon continue pendant le cycle mettant en évidence une diffusion progressive des sels vers la lame d'eau superficielle.
- Dans le même temps, l'alcalinité augmente légèrement témoignant de l'existence d'une source d'alcalinité dans la solution du sol.
- Dans la première partie du cycle, l'azote est principalement présent sous forme de

nitrates, puis l'ion ammonium devient prépondérant lorsque les conditions du milieu deviennent suffisamment réductrices.

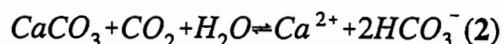
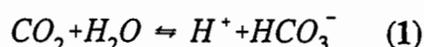
IMPACT DE LA DÉGRADATION

A l'échelle d'une parcelle cultivée fortement affectée par des problèmes d'alcalinisation des sols, le rendement du riz diminue sensiblement avec l'augmentation du pH mesuré *in situ* pendant la période de l'initiation paniculaire (fig.4). A l'échelle de la parcelle, le pH *in situ* apparaît indépendant du pH mesuré sur suspension de sol au laboratoire (fig.5).

DISCUSSION

Il semble que différents processus puissent contribuer à mobiliser de l'alcalinité dans la solution du sol dans ces conditions de riziculture sous submersion alors que la diffusion des espèces gazeuses est fortement ralentie.

- En l'absence de diffusion du CO₂ produit par la respiration aérobie, sa pression partielle augmente dans la solution du sol et provoque une diminution du pH dans cet environnement alcalin. La solution devient sous-saturée par rapport à la calcite dont la dissolution libère de l'alcalinité dans la solution du sol. *A contrario*, lors de la mise en eau du sol, la dissolution de calcite s'accompagne simultanément d'une production d'alcalinité et d'une consommation de CO₂ susceptible d'induire une remontée du pH. La baisse du pH résultant de l'augmentation de la pCO₂ améliore l'environnement chimique de la plante dont l'alimentation minérale est facilitée. Le pH de la solution du sol *in situ* apparaît au moins autant lié aux modalités de gestion de la culture favorisant la baisse du pH qu'aux propriétés intrinsèques du sol mesurées au laboratoire.



- En l'absence de diffusion d'O₂, le milieu devient progressivement réducteur. Dans un premier temps, la nitrification se ralentit et la forme ammoniacale de l'azote issue des apports d'engrais (urée) et de l'ammonification devient prépondérante dans la solution du sol. Puis le potentiel redox atteint un palier dans un environnement où les réductions du manganèse et du fer sont vraisemblables. Ces phénomènes de réduction sont susceptibles de produire de l'alcalinité dans la solution du sol :



- Pendant la période de submersion, l'alcalinité produite par ces phénomènes de réduction ou mobilisée par dissolution de minéraux liés à l'augmentation de la pCO₂ est susceptible de diffuser vers la lame d'eau superficielle, puis d'être évacuée vers le système de drainage. Enfin, lors de la réoxygénation du milieu, l'oxydation du Fer et du Mn conduit à une production de proton, l'alcalinité est neutralisée et le pH *in situ* baisse. Les conditions de culture sous submersion semblent jouer un rôle d'autant plus favorable que la submersion du sol est continue. *A contrario*, les points hauts régulièrement exondés sont peu influencés par ces mécanismes et apparaissent plus alcalins ; les cultures y sont plus sensibles à ces phénomènes d'alcalinisation.

RÉFÉRENCES

1. Marlet, S., et M.K. N'Diaye, 1988. Evolution temporelle et variabilité spatiale des indicateurs de la dégradation des sols par alcalinisation et sodisation à l'Office du Niger. *PSI-Mali : étude et travaux n°6*,

IER, Bamako

2. Barral, J.P., S. Marlet, M.K. N'Diaye, A. Valenza, M.K. Dicko, B. Tangara et J.C. Grillot, 1996. Fonctionnement des nappes en relation avec la dégradation des sols à l'Office du Niger, *PSI-Mali : études et travaux n°2*, IER, Bamako

3. Ponnampuruma, F.N., 1972. The chemistry of submerged soils. *Adv. Agron.* 24, 29-96

4. Dicko, M.K., 1999. Etude de l'impact des mécanismes bio-géochimiques sur le bilan de l'alcalinité des sols submergés. *DEA national de science du sol*, ENSAM, Montpellier

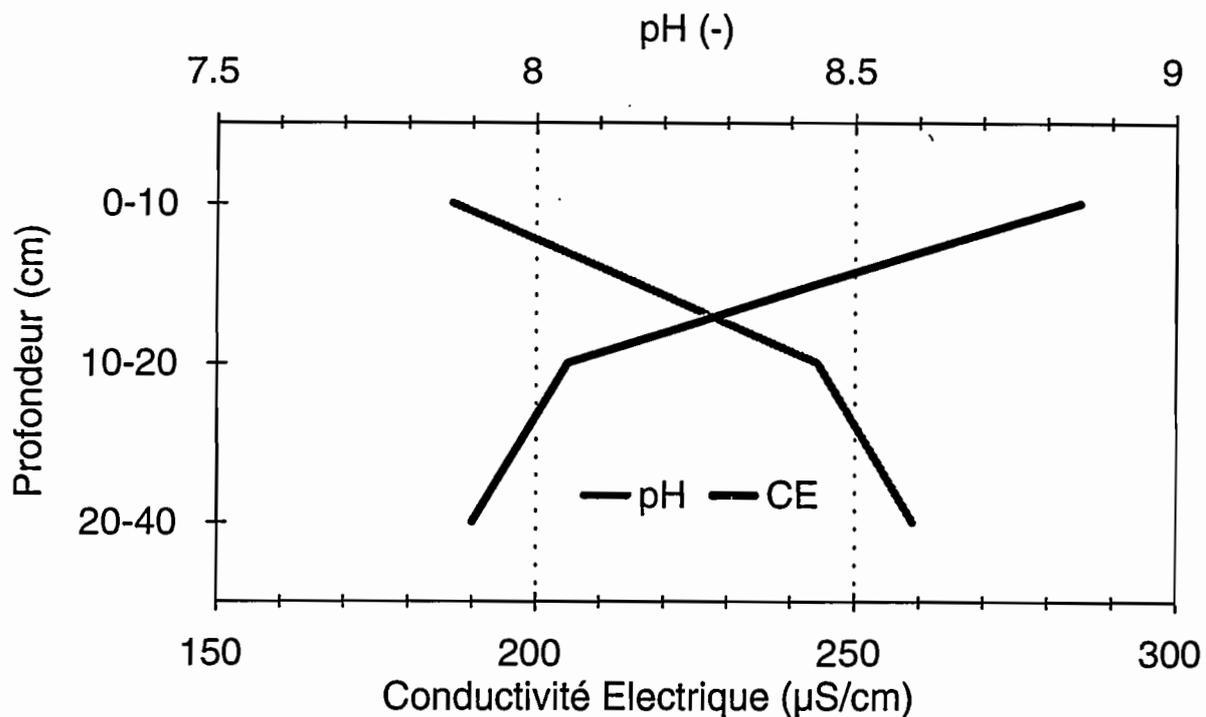


Figure 1. Evolution du facies géochimique des sols dans les horizons superficiels sous riziculture irriguée à l'Office du Niger

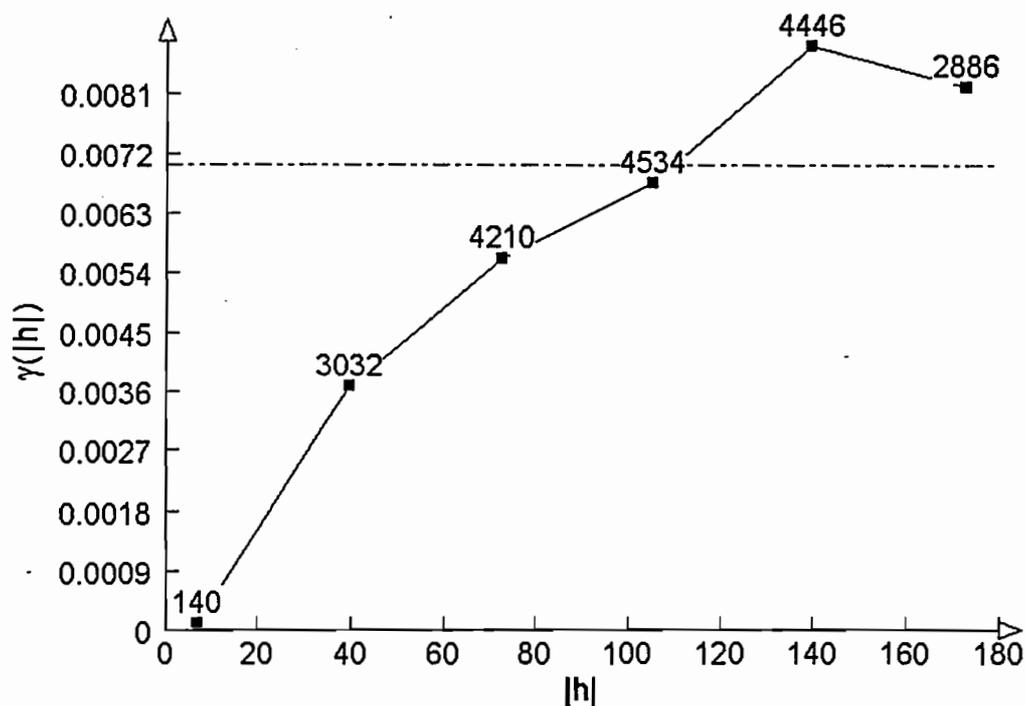


Figure 2. Influence de la topographie sur le facies géochimique des sols dans l'horizon 20-40 cm : Variogramme croisé (co-variogramme) entre l'altitude et les résidus de la régression pH.vs.log(CE)

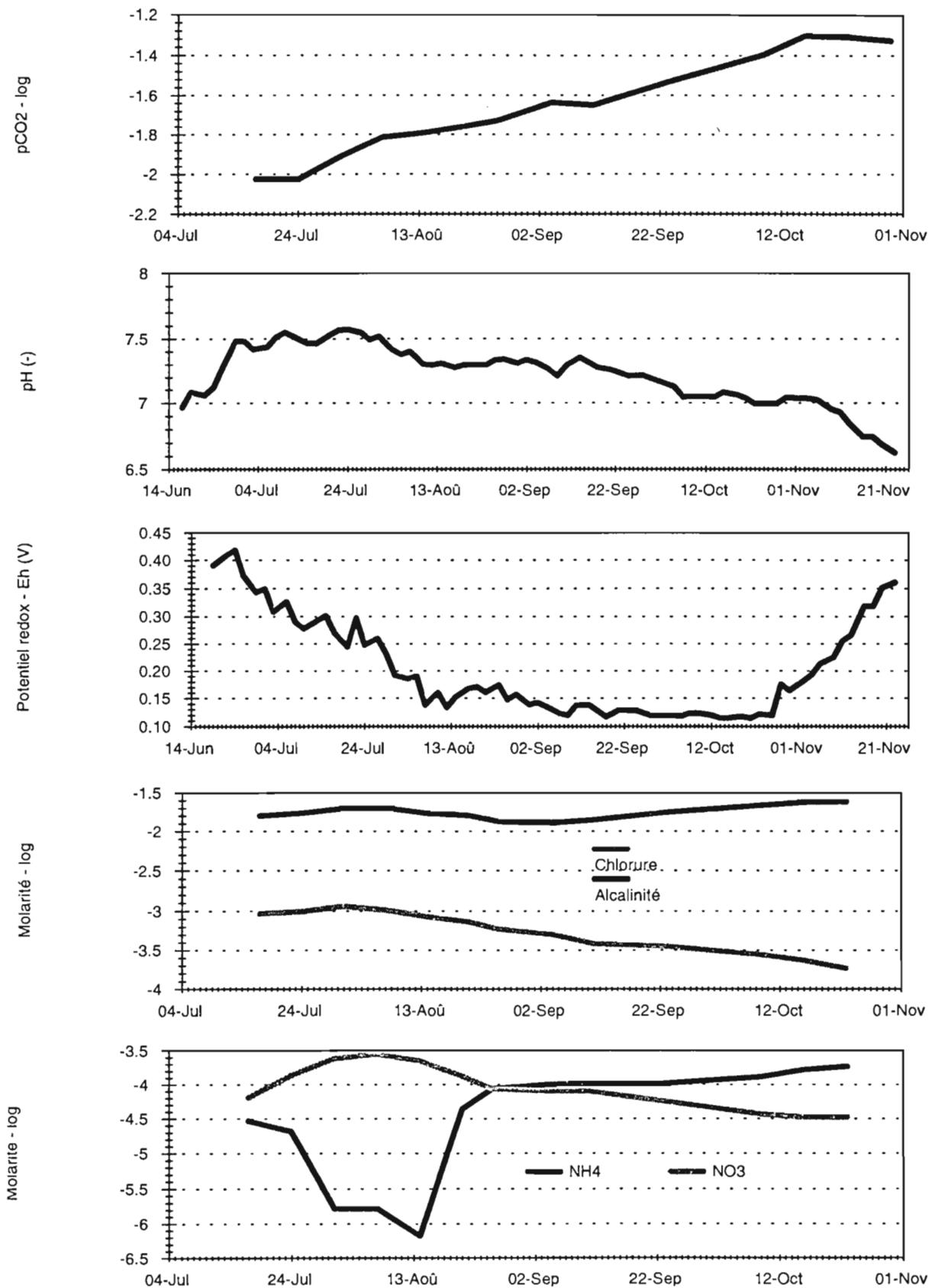


Figure 3. Evolution de quelques indicateurs des propriétés chimiques de la solution du sol dans l'horizon 10-20 cm : Pression partielle en CO₂ ; Potentiel redox ; pH ; Molarité en chlorure et alcalinité ; Molarité en nitrate et ammonium.

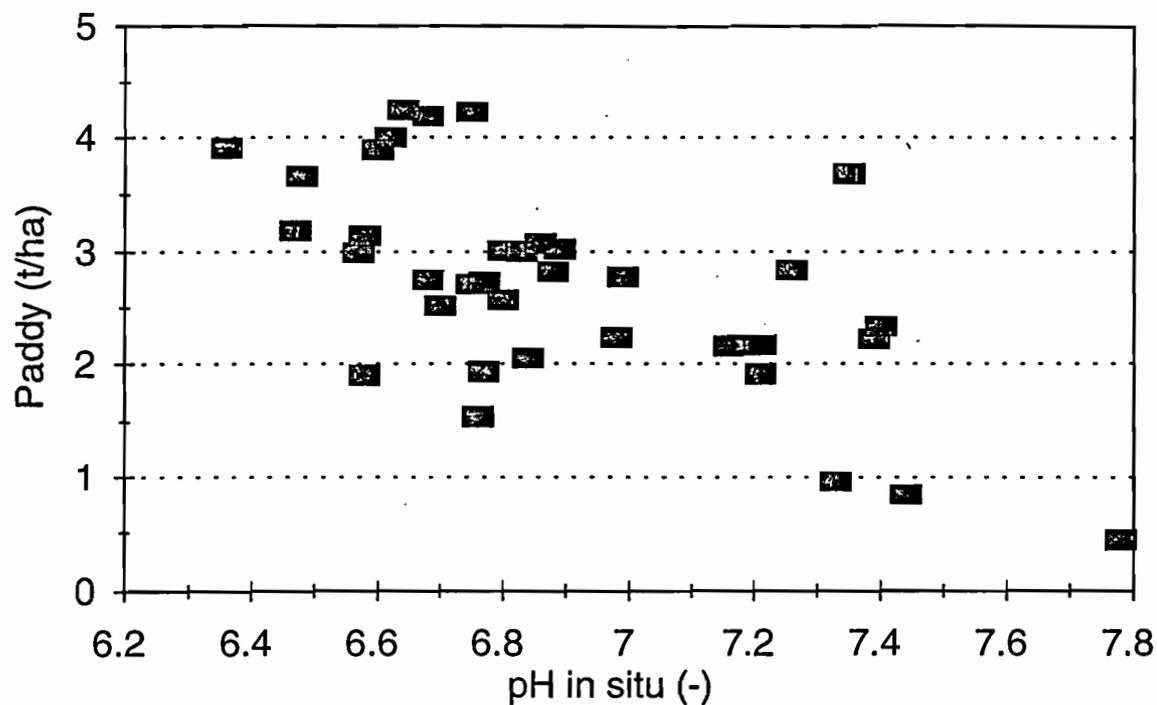


Figure 4. Relation entre le pH mesuré *in situ* à la période d'initiation paniculaire (10 septembre 1998) et la production de riz-paddy à l'échelle de la parcelle

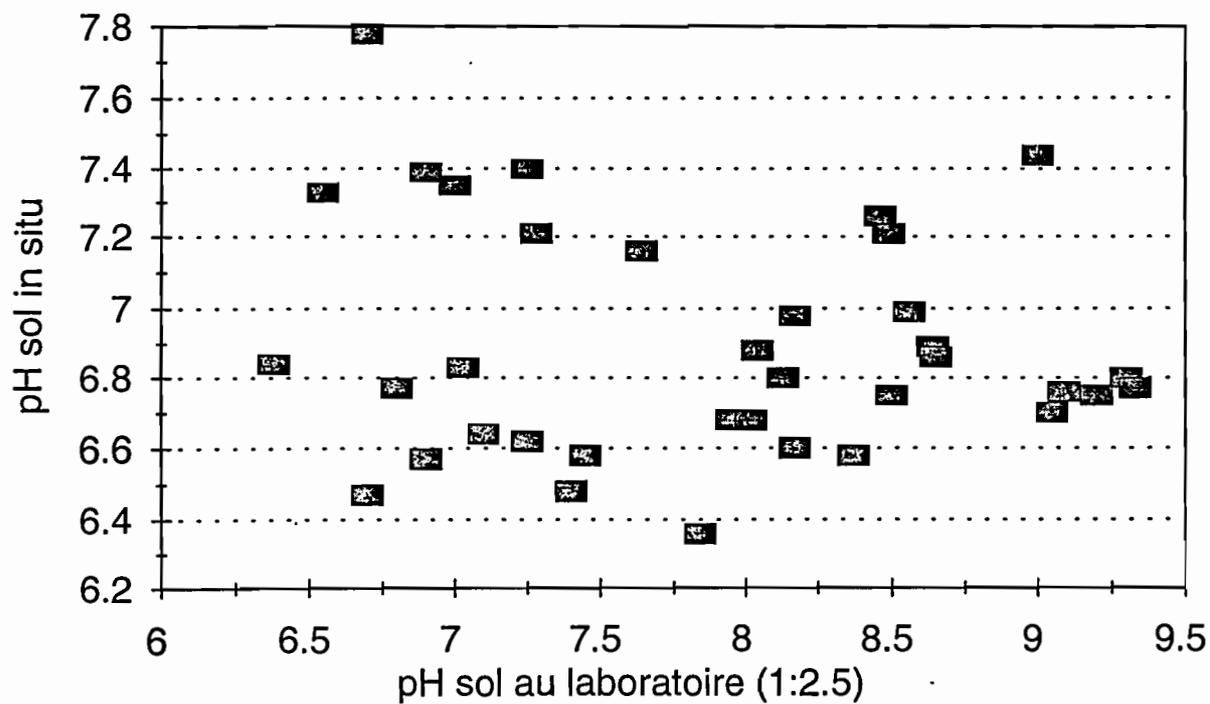


Figure 5. Comparaison entre le pH du sol mesuré *in situ* le 10 Septembre 1998 et au laboratoire sur suspension de sol 1:2.5 à l'échelle de la parcelle

**Alcalinisation des sols en riziculture sous submersion à l'Office du Niger.
Influence des processus à l'interface lame-sol
sur la désalinisation et désalcalinisation des sols**

Nicolas CONDOM et Serge MARLET

1. Introduction

Dans le cas de sols rizicoles, l'évaluation des processus d'alcalinisation, leur prédiction ainsi que la mise en place de méthodes de prévention doivent tenir compte du contexte hydro-géochimique tout à fait singulier de ces sols engorgés pendant la saison de culture et en condition de fort assèchement en intersaison.

La lutte contre la dégradation des sols a comme postulat l'élimination des « sels » du profil, puis de la zone cultivée par le système de drainage lorsqu'il existe.

Le lessivage naturel de ces sols existe mais reste assez faible pendant la saison de culture du fait de la présence de la nappe. La sortie vers le haut du profil, par diffusion des sels de la couche superficielle du sol (jusqu'à 50 fois plus concentrée que l'eau d'irrigation) vers la lame, est également constatée et peut être valorisée pour la désalinisation, désalcalinisation et désodisation des sols par vidanges de la parcelle au cours de la saison : cette pratique, « le flushing » est peu répandue à l'Office du Niger.

L'objet de la présente étude, basée sur des observations en plein champs et sur des expérimentations au laboratoire, est d'apporter des éléments de réponses aux questions suivantes :

- ⇒ A quels moments se fait la diffusion et quelles sont les quantités de sels mises en jeu ?
- ⇒ Quels sont les facteurs bio-géochimiques du sol qui influent sur l'exportation d'alcalinité vers la lame d'eau ?
- ⇒ Quelles sont les recommandations pour la mise en oeuvre du flushing ?
- ⇒ Quelles sont les possibilités d'intégrer cette spécificité des sols rizicoles dans la modélisation mécaniste ?

2. Méthodologie adoptée

Au champs, ont été relevés quotidiennement les hauteurs d'eau présente sur la parcelle ainsi que ses caractéristiques chimiques (relevés hebdomadaires) sur deux parcelles dégradées, l'une ayant un faciès alcalin (sol sableux), l'autre un faciès davantage chloruré-sodique (sol argileux).

Au laboratoire, deux bacs ont été remplis de 10 cm de ces deux sols sol couverts d'une lame d'eau du Niger ($CE=0.04dS/m$) d'une dizaine de centimètres. Les mesures de Conductivité Electrique et d'alcalinité (titration de Gran) ont été faites quotidiennement.

Des essais de modélisation ont été réalisés à l'aide d'un modèle couplé hydro-géochimique, utilisé par Marlet (1996) amélioré et en cours de calage.

3. Résultats analytiques

3.1. Au niveau des bacs (pas de flux, pas de plante, apport d'eau initial unique)

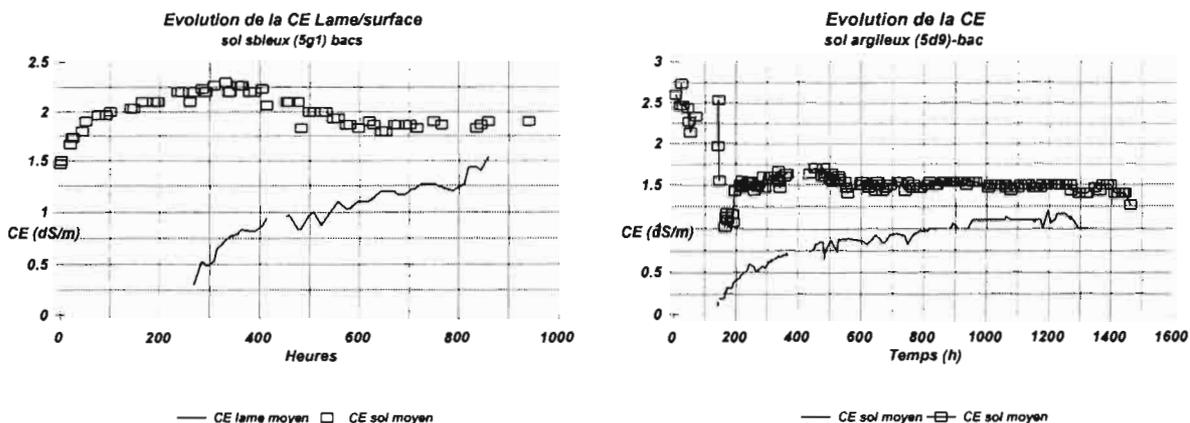


Figure 1 : Evolution des conductivités électriques de la lame et du sol - bacs de sol sableux (5g1) et argileux (5d9)

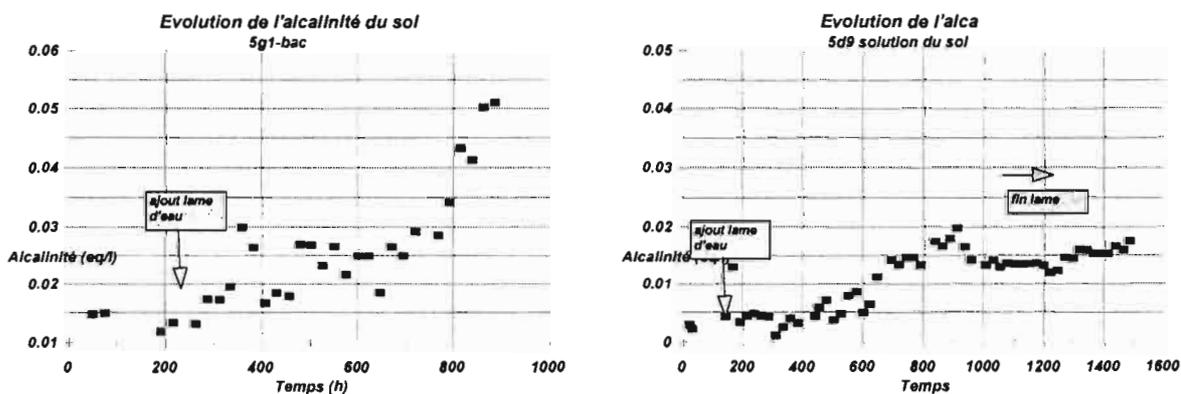


Figure 2 : Evolution de l'alcalinité du sol - bacs de sol sableux (5g1) et argileux (5d9)

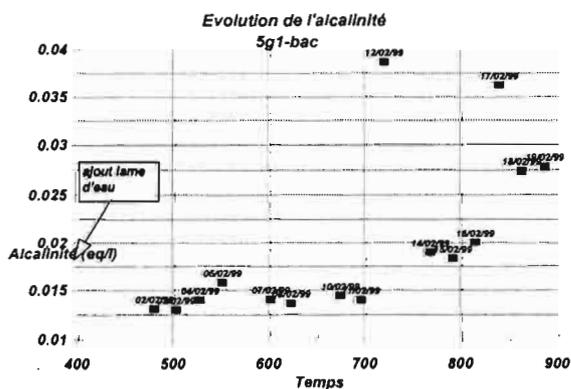


Figure 3 : Evolution de l'alcalinité de la lame d'eau - bacs de sol sableux (5g1)

3.2. Au niveau de la parcelle de culture (Apports d'eau répétés, plante, vidanges volontaires, circulation d'eau entre parcelles, infiltration)

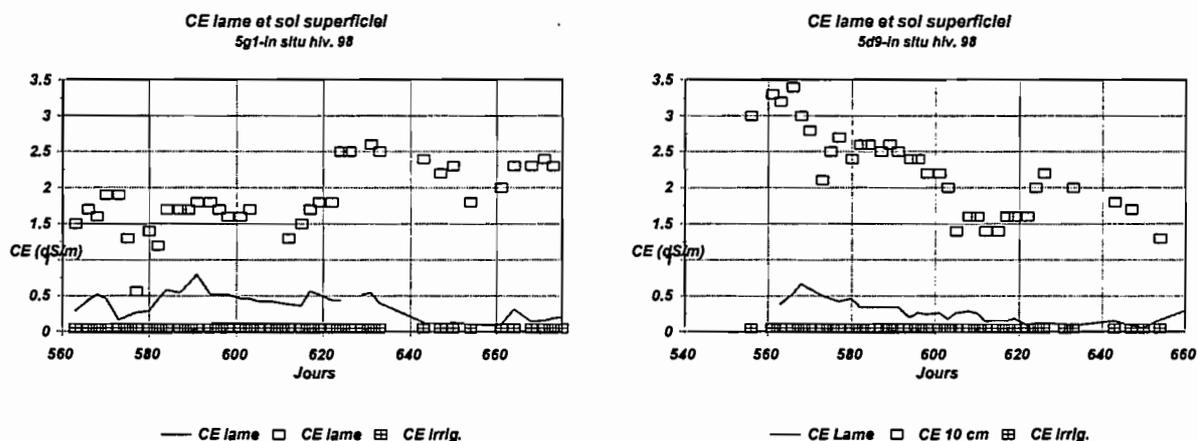


Figure 4 : Evolution de la concentration de la lame d'eau et de la couche superficielle - observations in situ - sols 5g1 (préirrigation j 532, 533, 538, 545, 562, 571; mise en boue : 583) et 5d9 (préirrigation 518, 519, 520, 533, 555; mise en boue : 561)

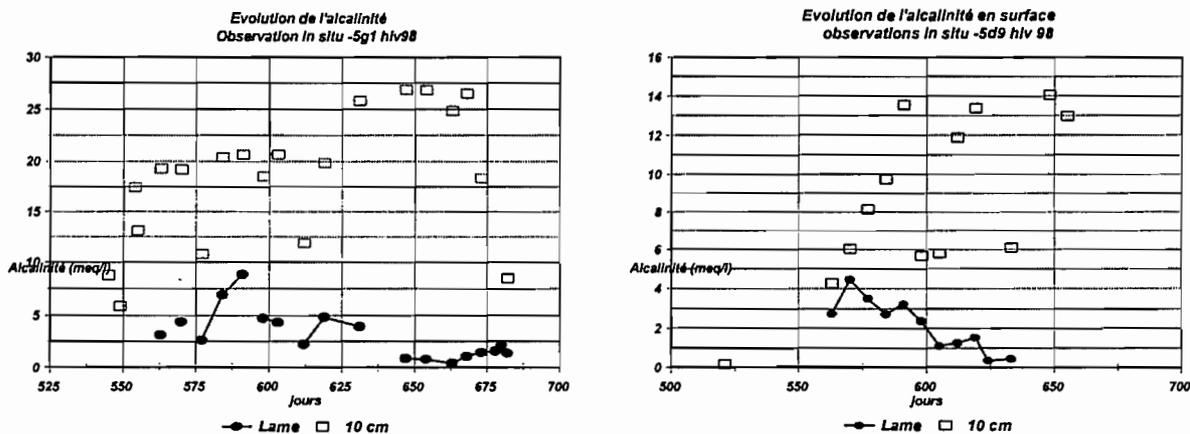


Figure 5 : Evolution de l'alcalinité de la lame d'eau et de la couche superficielle - observations in situ - sols 5g1 (préirrigation j 532, 533, 538, 545, 562, 571; mise en boue : 583) et 5d9 (préirrigation 518, 519, 520, 533, 555; mise en boue : 561)

4. Interprétation des résultats

4.1. Les causes des modifications de concentration de la lame d'eau au cours de la saison

⇒ La mise en solution des solutés lors de la mise en boue

La surface du sol est très concentrée à l'issue de la contre-saison. La mise en boue des dix premiers centimètres provoque la mise en suspension de solutés et de sels très solubles stockés pendant la contre-saison. L'eau appliquée par la suite juste avant le repiquage se charge très rapidement par mélange et

diffusion dans un milieu liquéfié. Ceci s'observe à la fois sur le terrain (5g1) et sur bacs laboratoire Figure 0-1, Figure 0-4). Ainsi, en début de saison de culture, la concentration de la lame est dix fois plus concentrée que celle de l'eau d'irrigation.

⇒ La diffusion de la surface du sol vers la lame d'eau

Les expérimentations en bacs en condition de flux nul contrôlé indiquent clairement un phénomène de diffusion de solutés du sol vers la lame d'eau. Les quantités mises en jeu sont importantes compte-tenu des gradients de concentration observés (Figure 0-2)

Cette diffusion provoque un appauvrissement global du sol en solutés (baisse des niveaux de concentration) que l'on peut estimer entre 3 et 10 meq/l au cours de l'expérience (Figure 0-1). La modélisation s'avère utile pour identifier la part du phénomène diffusif et de l'évaporation dans la concentration de la lame d'eau.

Cette évolution globale masque des comportements différents entre les solutés. La migration de l'alcalinité vers la lame d'eau est importante mais pas suffisante pour prendre le pas sur les systèmes de production d'alcalinité par dissolution et réduction des oxydes du sol qui s'accroissent lorsque le milieu devient très réducteur ; ainsi l'alcalinité augmente t'elle simultanément (Figure 0-3).

Sur la parcelle, la composante strictement diffusif est difficile à appréhender sans prise en compte de l'ensemble des phénomènes influant sur la concentration des éléments. Cependant, on observe clairement une mise en concentration de l'eau de lame en début de saison pendant 10 à 20 jours (Figure 0-5).

⇒ La dilution par les apports d'eau

Les irrigations successives au cours de la saison ainsi que le rehaussement progressif de la lame d'eau ont un effet diluant, opposé à celui des phénomènes de diffusion. Les observations faites sur le terrain montrent un maintien (5g1) ou une baisse progressive de la concentration du début vers la fin de la saison (5d9) alors que les gradients sont plutôt conservés. Ce phénomène serait donc prépondérant par rapport à la diffusion.

4.2. Intérêt du « flushing » dans le cas des sols submergés alcalins

Les expérimentations en bacs de sol montrent que la mise au contact d'eau peu concentrée et de la boue ainsi que le phénomène de diffusion provoquent une baisse sensible de la concentration de la solution du sol sous-jacent. De plus, la diffusion est un moteur puissant pour soustraire de l'alcalinité du sol et permettre donc, indirectement, la poursuite de sa mise en solution par phénomènes de dissolution de minéraux alcalins et de réduction des oxydes favorisé dans ce contexte de milieu riche en pCO_2 et anoxique. Rappelons que la production d'alcalinité dans le milieu par dissolution des minéraux alcalins favorisent la désorption de sodium échangeable en quantité importantes et donc une désodisation du sol, qui a été observée sur le terrain et sur les sols plantés au laboratoire.

L'application et la vidange répétée, dans des délais courts (concentration de la lame d'eau instantanée) juste après la mise en boue ainsi que la vidange de la parcelle deux ou trois fois au cours de la saison (diffusion lente) sont recommandées du point de vue de la désalinisation, désalcalinisation et désodisation du sol superficiel. Sa mise en oeuvre sur de vastes échelles peut être envisageable, les réseaux de drainage n'étant pas saturé à cette période de l'année.

5. Utilisation de la modélisation

5.1. Apport de la modélisation

L'intérêt de la modélisation dans l'étude de l'interface lame-sols se résume à trois aspects principaux :

- Montrer si l'on peut rendre compte des évolutions observées en milieu contrôlé par des phénomènes de diffusion et d'évaporation ;
- Intégrer les autres paramètres influent sur ces échanges (flux, géochimie) et comparés les simulations aux observations terrain ;

- Tester l'efficacité de différentes modalités de « flushing » à proposer aux agriculteurs et gestionnaires.

5.2. Adaptation du modèle au cas d'étude

Le modèle couplé est utilisé dans une situation de flux nul (bac de sol) à la base du profil, de très faibles gradients de potentiels et de faciès chimiques très contrasté entre la lame d'eau et la couche de sol sous-jacente. La prise en compte d'une telle situation par le modèle s'est avérée délicate, le pas de temps étant généré exclusivement par le module de transfert d'eau comme c'est classiquement le cas pour ce type de modèle : ici, les faibles transferts imposaient de larges pas de temps, incompatibles avec la convergence du module géochimique. Les modalités du calcul du pas de temps ont donc été modifiées : ce dernier est désormais gouverné, dans une situation donnée, par le module le plus contraignant.

Ce modèle ne prévoit pas explicitement la prise en compte d'une lame d'eau d'une épaisseur donnée en surface. Il a donc été rendu compte de cette lame par l'ajout, sur la couche de sol d'une couche superficielle de sol de conductivité hydraulique à saturation infinie, très diffusive et dont l'humidité à saturation et la hauteur de la couche rendaient compte du volume de la lame d'eau.

Cette « lame » est soumise à l'évaporation dont l'effet doit rendre compte à la fois de l'évaporation effective de cette lame d'eau dans les conditions opératoires mais aussi des prélèvements d'eau effectués pour les titrations d'alcalinité et qui ont contribué à l'assèchement et la concentration de cette lame d'eau.

6. Premiers résultats de la modélisation

Les premiers résultats montrent qu'il est possible de considérer la lame d'eau comme une couche de sol particulière sur laquelle s'applique l'évaporation et que les évolutions observées dans des conditions de flux nuls peuvent être reproduites par la prise en compte de la diffusion et de l'évaporation (2mm/j). La prise en compte de l'ensemble des conditions hydriques et géochimiques du milieu est une tâche à laquelle nous attelons.

Comparison between three soil solution samplers in a sandy soil of Northeast Thailand

Roland Poss¹, Didier Brunet¹ and Nijaporn Kunklang²

1 IRD, Department of Land Development, Phalholtyohin Road, Chatuchak, Bangkok 10900

2 Department of Land Development region 3, Jor-Hor, Muang District, Nakhon Ratchasima 30310

Introduction

The sandy soils of the uplands are the most prone to nutrient leaching, especially under tropical conditions. Measuring the concentrations of the elements in the soil water of the vadose zone remains however difficult. The usual method of sucking the soil solution using ceramic cups under depression is not adapted, because of the two difficulties of applying the suction at the right time and being able to pick up a fast-moving pulse.

The objective of the study was to compare three different soil samplers (PVC plates, Tensionics instruments and fibreglass wicks) for their ability to collect soil water samples, for the dispersion of the results obtained and for the composition of the solution collected.

Material and methods

The PVC plate samplers were made of a 50 X 20 cm PVC plate 3 mm thick bent to make a small gutter along the longest dimension. The gutter was connected to a plastic tube to collect the samples. A plastic mesh was installed between the sampler and the plastic tube to prevent the soil particles being carried away with the water. The samplers were inserted slightly obliquely from a profile by opening a slot with a knife and back-filling the gap between the sampler and the soil with the original soil. The profile was kept open during the experiment.

The Tensionic instrument (Moutonnet *et al.*, 1993) is made of a small closed ceramic cup around 2 cm id and 5 cm long (around 12 mL) glued at the base of a PVC tube, which makes the instrument look like a regular tensiometer. The ceramic cup remains filled with water at any time, so the composition of the water inside the ceramic equilibrates with the soil solution by diffusion. Capillary tubes inserted in the ceramic cup allow for the water samples to be withdrawn from the instrument and distilled water to be reinserted afterwards. Previous experiments had shown that the instrument needed around one week to equilibrate (Moutonnet *et al.*, 1992) and that the results obtained with the Tensionic instrument to measure nitrate leaching in a clayey soil were not different from those obtained with ceramic cups under suction (Poss *et al.*, 1995). The tensionic instruments were inserted in the soil after drilling a hole slightly smaller than the diameter of the Tensionic instrument in order to get good contact between the porosity of the ceramic and the soil.

The fibreglass wick sampler (Boll *et al.*, 1992) consists of a 15 X 15 cm plate on which fibreglass is spread (Figure 1). This plate is connected through a central hole to a 0.8 m-long fibreglass wick inserted in a plastic tube installed as vertically as possible in the soil. The containers receiving the soil solution were kept in a pit opened around 50 cm apart from the sampler.

The experiment was carried out on the very sandy (5% clay) arenic Acrisol of the Nam Phong series in Northeast Thailand. The samplers

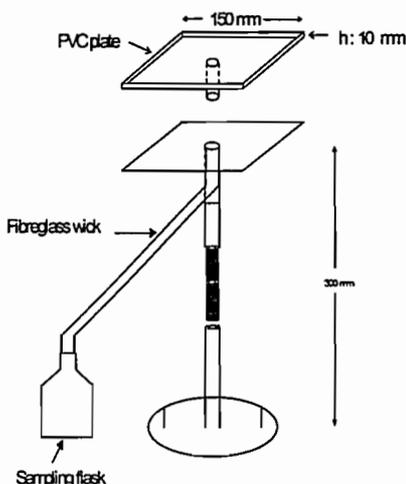


Figure 1 Fibreglass sampler

were installed in five 8X6 m plots that had received 650 kg ha⁻¹ lime as Ca(OH)₂ and 1500 kg ha⁻¹ gypsum in the 0-15 cm layer one month before the start of the experiment as part of a factorial experiment. Each plot was equipped with one sampler of each type, except one plot that received two Tensionic instruments and two fibreglass samplers (total of 5 PVC plates, 6 Tensionic instruments and 6 fibreglass samplers). All the samplers were installed at 20 cm depth. The measurements were made during two years with the Tensionic instruments and the fibreglass wicks, but only during the first year for the PVC plates. The first year was wet, which allowed the collection of many samples, but the second year was very dry, so few samples could be collected.

The PVC plates and fibreglass samplers were collected after each rain event and the volume of each sample measured. The samples were filtered through a Whatman 42 paper filter and stored frozen. Individual samples collected during a fortnight were bulked together. Tensionic instruments were collected every fortnight and the samples kept frozen until analysed.

Nitrate was determined by colorimetry with a Technicon AutoAnalyzer II after reduction to nitrite by passing through a column of copperized cadmium. Calcium and magnesium were measured by atomic absorption spectrometry with a Shimadzu 670 Atomic Absorption Spectrophotometer, using SrCl₂ to correct for interference.

Results and discussion

Number and volume of the samples collected

The number of the samples collected with the PVC plates was always lower than 2, whilst the rate of success of the fibreglass wicks was 65% (Table 1). Samples could be collected regularly from the Tensionic instruments every fortnight.

Measurements made with TDR instruments and tensiometers (data not shown) have proved that most drainage below 20 cm appears within 24 hours after the rain events and that the absolute value of the suction at 20 cm was always higher than 30 hPa for three years. These results suggest that the water is moving fast in this soil type and that this movement happens under capillary forces, not as free water. This could explain the low number of samples obtained with the PVC plates, as only free water can be collected with the PVC plates.

The volume collected by the fibreglass wick samplers per square meter was much higher than the one collected by the PVC plates. This result shows the effect of the suction of the wick on the rate of extraction of soil water.

Table 1. Number and volume of the samples collected during one year

	3 Jun	13 Jun	18 Jun	14 Aug	16 Aug	2 Sep	3 Sep	Average
Number of samples								
PVC plates (5 samplers)	0	2	1	0	1	1	2	1.0
Tensionic (6 samplers)	6	-	6	6	-	-	6	6.0
Fibreglass (6 samplers)	2	2	5	5	4	5	4	3.9
Volume collected (L m⁻²)								
PVC plates	-	2.9	0.2	-	1.7	0.7	1.1	1.3
Fibreglass	4.7	0.2	5.0	4.7	1.9	5.9	4.0	3.8

Composition of the water samples

Only results from the Tensionic instrument and the fibreglass wick will be discussed, as very few samples were collected from the PVC plates.

The electrical conductivity decreased sharply with time, following the leaching of gypsum during the rainy season (Figure 2). The electrical conductivity was consistently higher in the water from the fibreglass wicks than from the Tensionic instruments. The same held for the few samples collected the following year (data not shown).

The dispersion of the results was high (coefficients of variation higher than 68%) for both samplers (Table 2). A higher dispersion of the values from the Tensionic instrument could have been expected, as the size of the sampler was smaller. The fact that they are comparable suggests that the spatial heterogeneity of the composition of the soil solution was higher at the scale of the field than at the scale of the sampler.

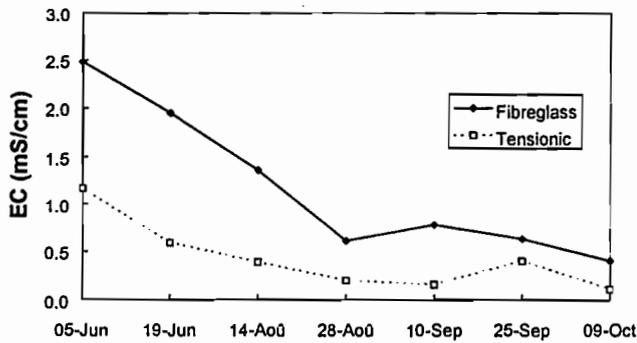


Figure 2 Evolution of the electrical conductivity with time

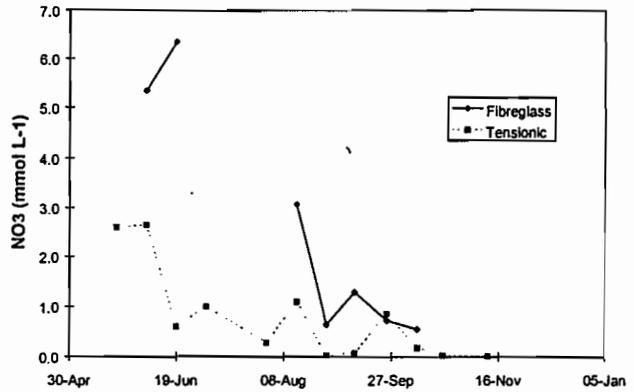


Figure 3 Evolution of the NO3 content in the soil solution with time

Table 2 Average coefficients of variation of the composition of the soil solution collected with fibreglass samplers and Tensionic instruments (%)

	Nitrate	Calcium	Magnesium
Fibreglass	69	94	81
Tensionic	89	68	73

The nitrate content of the solution collected with the fibreglass samples was statistically higher than that collected with the Tensionic instrument, for all dates but 25 September (Figure 3). For calcium and magnesium the values from the fibreglass sampler were consistently higher than the values from the Tensionics, but the difference was not statistically different, due to the high coefficient of variation.

This study shows that, unlike the previous paper on the use of the Tensionic instrument, the electrical conductivity and the nitrate content of the soil solution obtained with the Tensionic instrument were consistently lower than those obtained with the fibreglass samplers. As the dynamics of the soil water are fast, the peak of concentration moves quickly downwards. The results suggest that the fibreglass samplers were able to pick up these peaks. As the Tensionic instrument needs one week to equilibrate, this instrument was unable to monitor the fluxes of nutrient in this soil type.

Conclusion

The PVC plate samplers were unable to sample the soil solution in the vadose zone of the sandy soil studied. The fibreglass samples allowed to take soil solution samples with a rate of success of 65%. The Tensionic instrument permitted to take soil solution samples throughout the year.

The coefficients of variation of nitrate, calcium and magnesium were between 68 and 94% for the fibreglass and the Tensionic instrument, without difference between the samplers. As spatial heterogeneity of the field may be high, this study cannot conclude whether or not there is a difference in the coefficient of variation between the samplers.

The concentrations measured with the Tensionic instrument were consistently lower than those measured with the fibreglass sampler. This result was interpreted as the result of the inability of the Tensionic instrument to pick up fast moving pulses, because of the time it needs to equilibrate. The fibreglass samplers seem to be an interesting option to measure leaching in sandy soils in undisturbed conditions.

References

- Moutonnet P., Pagenel J.F. and Fardeau J.F., 1993.- Simultaneous field measurement of nitrate-nitrogen and matric pressure head. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 1458-1462.
- Boll J., Steenhuis T.S. & Selker J.S., 1992.- Fibreglass wicks for sampling of water and solutes in the vadose zone. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 701-707.
- Poss R., Noble A.D., Dunin F.X. & Reyenga W., 1995.- Evaluation of ceramic cup samplers to measure nitrate leaching in the field. *E. J. Soil Sc.* 46: 667-674.