

L'évolution du sol sous canne à sucre irriguée, à Kenana au Soudan

Introduction

Au Soudan, cinq complexes sucriers (Asalaye, Sennar, Guineid, New Halfa, Kenana) exploitent près de 70 000 ha dont la moitié pour la Kenana Sugar Company Ltd entrée en production au début des années 1980. L'eau d'irrigation est pompée dans le Nil blanc. Elle est distribuée gravitairement dans des raies longues de 700 m à plus de 2 km. Le rendement moyen de Kenana est de 70 t/ha. Ces performances restent éloignées du potentiel de la canne à sucre irriguée et un diagnostic a été mis en œuvre afin d'apprécier, d'une part les performances de l'irrigation (LIDON *et al.*, 1999) et d'autre part l'évolution de la fertilité des sols.

Les caractéristiques du sol

Au Soudan, les vertisols occupent plusieurs millions d'hectares (BLOKHUIS, 1993) et sont très répandus dans le « Central Clay Plain », vaste plaine s'étalant au sud du confluent du Nil blanc et du Nil bleu (à 16° de latitude nord et 32° de longitude est). Ils constituent une grande partie des surfaces irriguées (1,9 million d'hectares) à partir de barrages et par pompage dans le Nil et ses affluents, entre les isohyètes 100 et 600 mm.

Les sols sont presque exclusivement des vertisols grumusoliques profonds de 2 m ou plus, développés le plus souvent sur un vaste glacis d'érosion

pléistocène à pente comprise entre 0,1 et 0,7 %. Ils reposent sur des schistes et calcaires infracambriens du socle (BROUWERS, 1996). Ils contiennent en moyenne 65 % d'argile à forte capacité d'échange (110 meq/100 g d'argile), ce qui leur confère une capacité d'échange cationique exceptionnellement élevée, supérieure à 70 meq/100 g de sol. Ils sont riches en calcaire, 2 à 8 % dans la terre fine, en plus de nodules qui constituent avec quelques éléments de quartz la fraction grossière du sol (2 à 4 %).

L'évolution des propriétés des sols

La chimie des sols est analysée sur des sites sous canne irriguée depuis quinze ans et sur des sols consacrés aux cultures pluviales, localisés dans le complexe (ou en bordure). Le sorgho de type dura est la culture pluviale par excellence pour un régime pluviométrique de 400 mm de moyenne.

La qualité des eaux d'irrigation

Avec une conductivité électrique (CE) d'environ 0,2 dS/m et un *Sodium Absorption Ratio* (SAR) de 1,5, l'eau est d'excellente qualité selon la classification de Riverside. Toutefois, son alcalinité résiduelle est nettement positive (tableau 1) et pourrait conduire à une dégradation

M. BROUWERS, S. MARLET
Cirad-amis, avenue Agropolis,
34398 Montpellier Cedex 5, France
marinus.brouwers@cirad.fr

A.A. OSMAN
Department of Sugarcane research,
Kenana Site, KSS,
PO Box 2632, Soudan



Tableau 1. Qualité de l'eau d'irrigation (moyenne des prélèvements entre le 31 janvier 1997 et le 22 mai 1997).

Teneurs en éléments minéraux

Ca	Mg	K	Na	Cl	SO ₄	NO ₃	HCO ₃
0,54	0,58	0,24	0,92	0,17	0,07	0,01	2,02

Autres données

pH	Conductivité électrique (mS/cm)	SAR	Salinity Class (USSS, 1951)	Alcalinité résiduelle
7,39	0,21	1,52	C1S1	+ 0,90

SAR : Sodium Absorption Ratio

progressive des propriétés physico-chimiques des sols par alcalinisation et sodisation (voir encadré).

L'évolution des propriétés chimiques des sols

En l'absence d'irrigation, le faciès chimique de la solution du sol apparaît principalement sulfaté et sodique. L'alcalinité est modérée et le pH reste le plus souvent inférieur à 8,5 (figure 1b). La salinité et la

Evolution des sols sous irrigation : description des processus chimiques

La salinisation⁽¹⁾ des sols est la conséquence directe d'un lessivage insuffisant des sels apportés par l'irrigation. Ces dysfonctionnements hydrologiques peuvent aussi bien être liés à des apports d'eau insuffisants ou à la présence d'une nappe proche de la surface et conduisent à une concentration progressive de la solution du sol.

Lors de la concentration des eaux, des minéraux sont susceptibles de précipiter ce qui modifie la composition des solutions. Les précipités les plus communs sont : la calcite, la silice amorphe, le gypse et les minéraux argileux contribuant principalement au contrôle du magnésium (HARDIE et EUGSTER, 1970). Lorsque la calcite et la sépiolite précipitent, ils contribuent au contrôle de l'alcalinité et des molarités en calcium et magnésium qui ne peuvent augmenter simultanément.

Salinisation

Si la somme des équivalents de calcium et magnésium est supérieure à l'alcalinité dans la solution de départ, l'alcalinité

décroit et les molarités en calcium et magnésium augmentent à un rythme inférieur à celui du facteur de concentration. Ce processus de salinisation⁽¹⁾ conduit à une augmentation de la conductivité électrique de la solution du sol et à l'apparition de phénomènes de sécheresse physiologique voire de toxicité.

Alcalinisation

Dans une situation inverse, l'alcalinité augmente et les molarités en calcium et en magnésium diminuent. Ce processus d'alcalinisation⁽¹⁾ conduit à une augmentation de l'alcalinité et du pH. Des valeurs élevées de pH s'accompagnent de l'apparition de carences, notamment en phosphore et en zinc. Elles favorisent les pertes d'azote ammoniacal.

Ce concept d'alcalinité résiduelle (VAN BEEK et VAN BREEMEN, 1973 ; AL DROUBI *et al.*, 1976 ; MARLET *et al.*, 1998) permet de prévoir l'évolution de la composition chimique d'une solution lorsqu'elle se concentre ; elle est calculée en soustrayant à l'alcalinité les équivalents de cations et en additionnant les

équivalents d'anions qui sont impliqués dans les précipitations. Appliqué habituellement à la précipitation de calcite et de sépiolite, ce concept est équivalent à celui de *Residual Sodium Carbonates*.

Sodisation

Le contrôle des molarités en calcium et magnésium favorise leur désorption et l'adsorption de sodium sur le complexe d'échange. Ce processus de sodisation⁽¹⁾ est plus rapide en milieu alcalin alors que le calcium et le magnésium ont un comportement minoritaire. Lorsque la concentration de la solution du sol est inférieure à un seuil critique de floculation, les argiles se dispersent, les agrégats deviennent instables et les propriétés physiques sont susceptibles de se dégrader.

Dans les sols salés ou alcalins, ces équilibres géochimiques sont fortement influencés par le pH, lui-même sous la dépendance de la pression partielle en CO₂. Ainsi certaines pratiques culturales et l'activité biologique des sols peuvent elles aussi jouer un rôle déterminant dans l'évolution des propriétés des sols.

(1). Le processus de **salinisation** résulte de l'augmentation de la concentration des solutés en solution sous l'influence de l'évapotranspiration et d'un lessivage insuffisant. La salinité se manifeste par l'apparition de salants blancs. A partir d'une valeur seuil de la conductivité électrique d'extraits de pâte saturée de l'ordre de 2 à 4 dS/m, des problèmes de sécheresse physiologique voire de toxicité en certains éléments sont susceptibles d'apparaître.

Le processus de **d'alcalinisation** résulte de l'augmentation de l'alcalinité en relation avec la qualité des eaux d'irrigation (alcalinité résiduelle positive) lors de la concentration. L'alcalinité se manifeste par l'augmentation du pH et l'apparition temporaire de salants noirs. Des valeurs élevées du pH *in situ* s'accompagnent de l'apparition de carences induites, en phosphore et zinc notamment. Elles favorisent les pertes d'azote ammoniacal. Le processus de **sodisation** résulte de

l'augmentation de la proportion de sodium sur le complexe d'échange. A partir d'une valeur seuil de 5 à 15 %, les agrégats deviennent instables et les propriétés physiques sont susceptibles de se dégrader : augmentation de la compacité et de la densité apparente, diminution de la porosité et de la perméabilité à l'eau et à l'air. La capacité de lessivage des sols est limitée et l'apparition de conditions réductrices est facilitée. Elles peuvent favoriser les pertes d'azote par dénitrification.

sodicité des sols s'accroissent sensiblement en profondeur (figures 1a et 1d), ce qui met en évidence une salure, sans doute d'origine géologique.

Sous irrigation, on a pu observer une évolution sensible des propriétés chimiques des sols :

- une diminution significative de la conductivité électrique (figure 1a), des concentrations en sodium (figure 1d) et sulfate (figure 1f), et du sodium échangeable (figure 1g) ;
- une augmentation de l'alcalinité (figure 1e) et du pH (figure 1 b) ;
- une augmentation du magnésium échangeable (figure 1h).

La diminution de la salinité et de la sodicité des sols met en évidence une lixiviation importante. Cette observation est cohérente avec les résultats de LIDON *et al.* (1999) qui évaluent la fraction drainée à environ 8 % de la dose d'arrosage. Malgré une texture argileuse, le potentiel d'infiltration des sols apparaît élevé en raison de la présence d'importantes fentes de retrait. De plus, l'infiltration semble efficace en ce qui concerne l'entraînement des sels malgré l'existence vraisemblable d'écoulements préférentiels.

L'augmentation de l'alcalinité est liée à la qualité des eaux d'irrigation dont l'alcalinité résiduelle est fortement positive. Cette augmentation reste cependant modérée en raison de l'intensité de la lixiviation mais aussi de l'important pouvoir tampon du sol lié à sa capacité d'échange (MARLET *et al.*, 1998).

L'augmentation de la teneur en magnésium échangeable révèle généralement une augmentation de la pression partielle en CO₂ (MARLET, 1996). A Kenana, cette évolution est favorisée par l'abondance de cet élément dans les sols (BLOKHUIS, 1993), par l'importance du système racinaire actif toute l'année (respiration), ainsi que par la forte irrigation (BROUWERS, 1994) qui freine les échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère. En milieu alcalin, cette augmentation de la pression partielle en CO₂ provoque

une diminution du pH *in situ* et un accroissement de la solubilité des minéraux, notamment les silicates magnésiens.

Evolution des indicateurs de la fertilité minérale

L'augmentation de la teneur en matière organique (figures 1i et 1j) conduit à un accroissement du stock d'azote organique disponible dans les sols. Dans le même temps, la teneur en azote minéral mesurée sur les extraits de la solution du sol diminue significativement sous l'influence conjuguée du drainage et d'une consommation par les cultures. Ce résultat contredit la généralisation trop souvent faite qu'en culture intensifiée le taux en matière organique chute sous l'effet de la répétition des interventions aratoires. Si cette assertion est certainement valable pour des cultures annuelles produisant peu de biomasse ou pour des sols initialement bien pourvus en matière organique, nous observons le phénomène inverse en culture irriguée de canne à sucre en milieu sub-aride.

L'accroissement du taux en K échangeable est spectaculaire dans les premiers 50 cm (figure 1l). Il atteint dans le premier niveau en moyenne 1,1 meq/100 g de sol, soit bien au-delà du seuil de référence généralement admis de 0,20 meq pour un sol hautement productif. Or, à Kenana comme ailleurs au Soudan, on n'apporte pas d'engrais potassique. L'accroissement du taux en K du complexe d'échange ne peut donc provenir que de l'eau du Nil blanc et de la dissolution de minéraux en relation avec une activité biologique plus intense dans les sols cultivés.

En revanche, on observe une diminution significative du phosphore assimilable (figure 1k) malgré l'apport d'une dose de 55 kg/ha de P₂O₅ sous forme de superphosphate triple à la plantation et tous les 4 ou 5 ans sur des parcelles à nombreuses repousses. La teneur est extrêmement basse et pourrait

conduire à une déficience dans l'alimentation phosphatée de la culture.

Maintien de la fertilité du sol excepté pour le phosphore

Quinze ans de culture irriguée de canne à Kenana n'ont pas altéré les qualités chimiques des vertisols. C'est plutôt l'inverse qui s'est produit avec la diminution de la salinité et de la sodicité et l'amélioration des indicateurs de fertilité azotée et potassique. Seule la fertilité phosphatée des sols est préoccupante. On note aussi un accroissement important du stock de matière organique.

Le risque d'alcalinisation semble pour le moment écarté en raison du pouvoir tampon considérable de ces vertisols et d'un « lessivage » par les arrosages. L'existence de ce drainage est une observation originale sur des sols habituellement considérés comme imperméables. Il faudra prévenir tout risque de dégradation à long terme. Ce phénomène n'ayant pas été observé dans le Gezira, périmètre créé à la fin des années 20, il est peu probable qu'il apparaisse à Kenana où la nappe phréatique est localisée en profondeur dans le substratum rocheux.

Il faut enfin souligner que la présence d'une alcalinité résiduelle positive dans l'eau d'irrigation ne conduit pas systématiquement à la dégradation du sol. Cette conclusion est aussi valable pour le complexe sucrier de Richard-Toll au Sénégal. Dans ce complexe, créé dans les années 70 sur les alluvions du fleuve Sénégal (sols hydromorphes ou halomorphes), l'irrigation couplée à un drainage profond a transformé les sols de qualité médiocre en vertisols hautement productifs (BROUWERS, 1995).

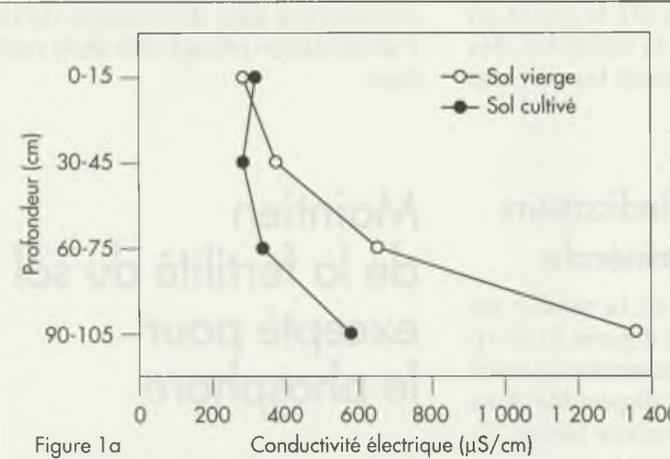


Figure 1a

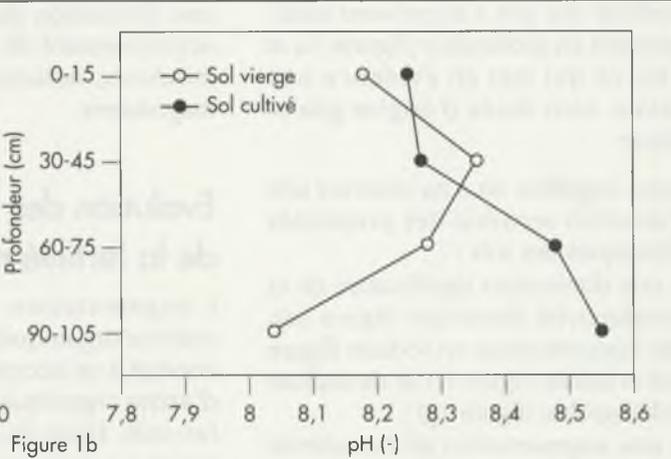


Figure 1b

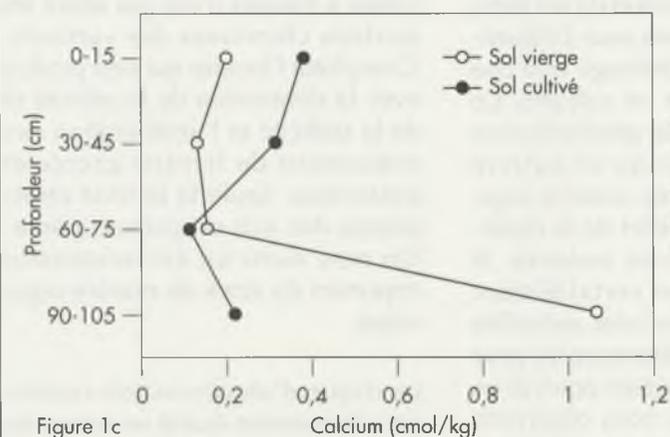


Figure 1c

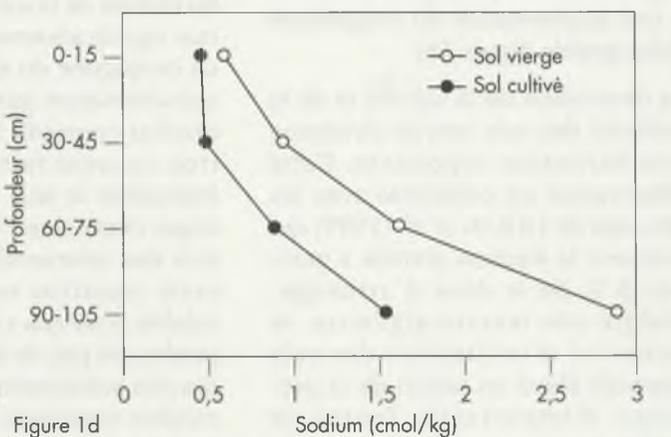


Figure 1d

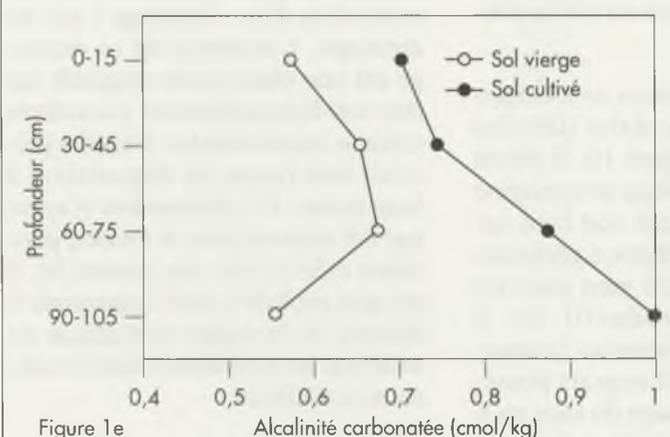


Figure 1e

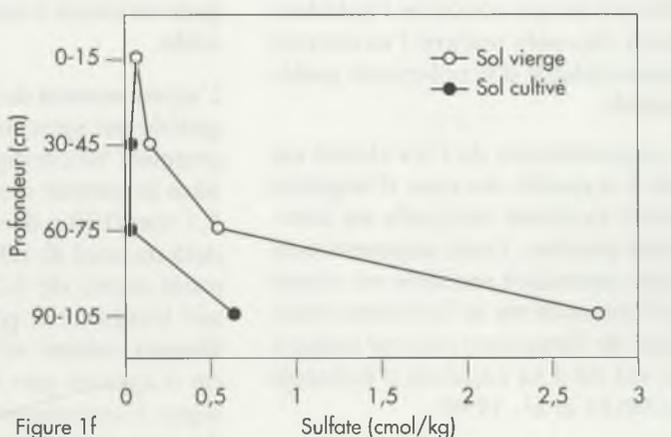


Figure 1f

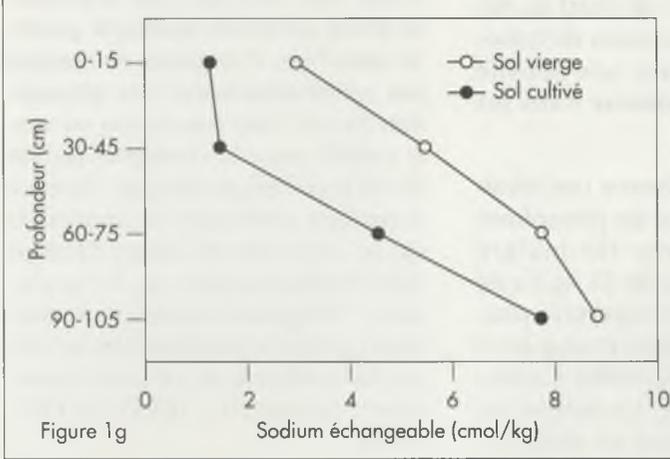


Figure 1g

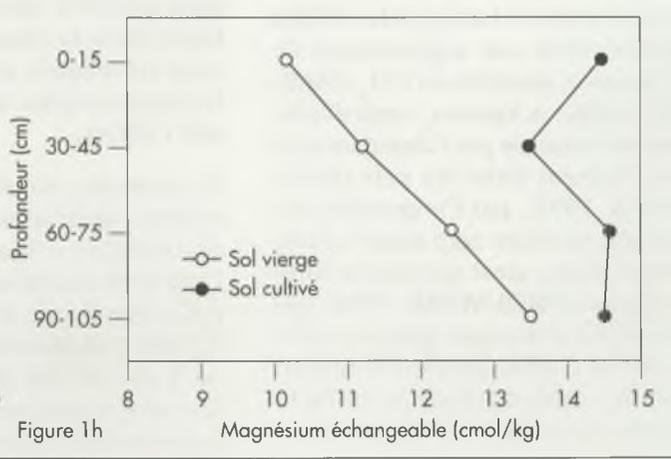


Figure 1h

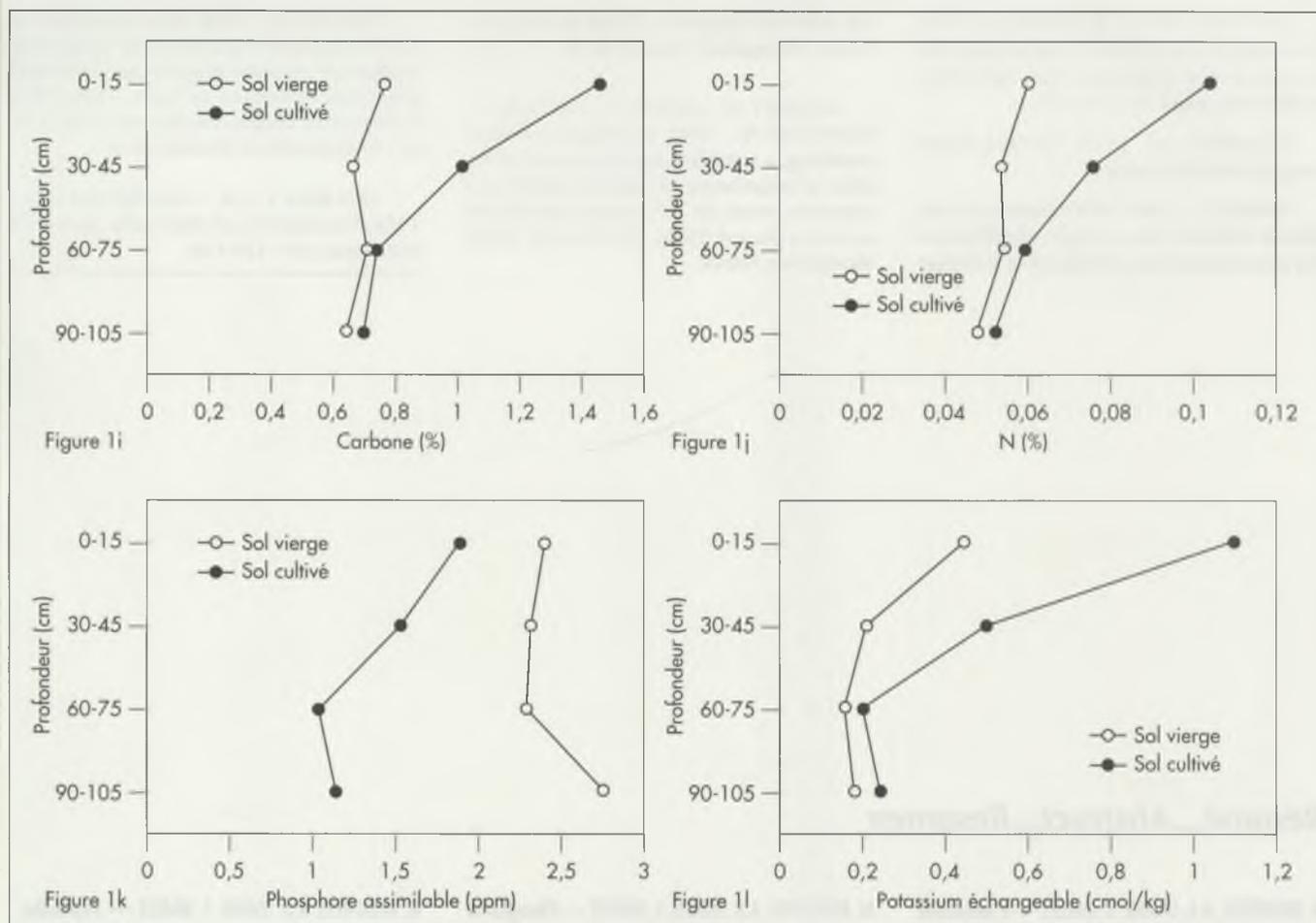


Figure 1. Evolution des propriétés chimiques des sols irrigués cultivés. Comparaison avec des témoins adjacents non irrigués (sols vierges) : propriétés chimiques (pH, conductivité électrique) et composition d'un extrait de 1:2,5 de la solution du sol ; composition chimique du complexe d'échange (sodium, potassium, magnésium) par la méthode au cobaltihexamine ; teneurs en carbone, azote et phosphore assimilable par la méthode Olsen.

Pour en savoir plus

AL DROUBI A., FRITZ B., GAC J.-Y., TARDY Y., 1980. Generalized residual alkalinity concept : application to prediction of the chemical evolution of natural waters by evaporation. *Am. J. Sci.* 280 : 560-572.

BERTRAND R., KEITA B., N'DIAYE M.K., VELDKAMP W.J., 1996. La dégradation des sols irrigués en Afrique de l'Ouest. In *Le riz irrigué au Sahel ; projet de développement durable*. Séminaire ADRAO, 1996, Saint-Louis, Sénégal, p. 52-68.

BERTRAND R., KEITA B., N'DIAYE M.K., 1993. La dégradation des sols des périmètres irrigués des grandes vallées sub-sahariennes. *Cahiers Agricultures* 2 : 318-329.

BLOKHUIS W.A., 1993. Vertisols in the Central Clay Station Plain of the Sudan. Thesis, Agric. Univ. Wageningen, Pays-Bas, 418 p.

BROUWERS M., 1995. Gestion des terres dans le complexe irrigué de la CSS à Richard-Toll. Rapport de la mission de conseil agropédologique du 27 mars au 3 avril 1995, 38 pages. Cirad, Montpellier, France.

BROUWERS M., 1994. Compte-rendu de mission agropédologique au Soudan pour la mise en place d'une thèse sur la fertilité des sols cultivés en canne à sucre. Document Cirad-ca, Montpellier, France, 21 p.

BROUWERS M., 1996. Central Clay Plain du Soudan ; remarques agropédologiques sur les caractères physico-chimiques des sols et des eaux d'irrigation. Document Cirad-ca, Montpellier, France, 29 p.

BROUWERS M., 1997. Compte-rendu de mission agropédologique à Kenana. Cirad-ca, Montpellier, France, 21 p.

BROUWERS M., GUIBERT H., 1996. Optimizing fertilizer application in the irrigated sub-sector of Sudan with special reference to the Gezira Managil scheme. Rapport d'expertise Cirad-ca pour EDF, 46 p.

CALCINO D.V., 1994. Australian sugarcane nutrition manual. Ed. SRDC-BSES, 62 p. Indooroopilly, Australie.

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

FAUCONNIER R., 1991. La canne à sucre. Maisonneuve et Larose (éditeur), Paris, France, 165 p.

HARDIE L.A., EUGSTER H.P., 1970. The evolution of closed-basin brines. *Miner. Soc. Am. Spec. Publ.* 3 : 273-290.



LIDON B., MARLET S., CLOPES A., 1999. Evaluation des performances des arrosages de la canne à sucre irriguée à la raie. *Agriculture et Développement* 24 : 114-125.

LONRHO Ltd, 1973. Kenana sugar project ; feasibility study.

MARLET S., 1996. Alcalinisation des sols dans la vallée du fleuve Niger. Modélisation des processus physico-chimiques et évolution

des sols sous irrigation. Thèse de doctorat, Ensam, Montpellier, France, 267 p.

MARLET S., VALLES V., LAFOLIE F., CONDOM N., 1998. Hydrogeochemical modeling: a suitable approach to predict the effect of irrigation on soil salinity, sodicity and alkalinity. Actes du 16^e congrès mondial de sciences du sol (ISSS), 20-26 août 1998, Montpellier, France.

OSMAN A.A., 1998. Long term effect of soil management practices for sugarcane production on some physical and chemical properties of Kenana vertisols. Thèse Phd, Université de Gezira, Soudan, mai 1998, 102 p. + bibliographie et annexes, 16 p.

VAN BEEK C.G.E., VAN BREEMEN N., 1973. The alkalinity of alkali soils. *Journal of Soil Science* 24 : 129-136.

Résumé...Abstract...Resumen

M. BROUWERS, A.A. OSMAN, S. MARLET — **L'évolution du sol sous canne à sucre irriguée à Kenana, Soudan.**

Le périmètre sucrier de Kenana au Soudan occupe 35 000 ha de vertisols, irrigués à la raie avec les eaux du Nil blanc. L'arrosage intensif pratiqué en culture de canne a conduit à des changements dans les caractéristiques chimiques des sols. Par rapport à des terres voisines non cultivées ou bien consacrées à des cultures pluviales, il a été constaté dans les champs en monoculture depuis quinze ans une baisse de la salinité, notamment entre 50 cm et 1,5 m de profondeur, due principalement à une diminution des taux de chlorure, sodium et sulfate. A l'inverse, le taux en potassium échangeable et la teneur en matière organique augmentent dans les premiers 50 cm du sol. Alors que l'évolution de la teneur en matière organique s'explique par la durée du cycle végétatif (12 mois pour la canne, 3 mois pour un sorgho), celle du taux de potassium échangeable est à relier à un enrichissement du sol par l'eau d'irrigation, source de potasse. Les diverses analyses pratiquées à Kenana permettent aussi de discuter l'emploi en irrigation d'une eau ayant une alcalinité résiduelle calcite positive, qui n'amène pas ici d'alcalinisation du sol car la nappe est très profonde.

Mots clés : Soudan, *Saccharum*, vertisols, irrigation, salinité, matière organique, évolution des sols.

M. BROUWERS, A.A. OSMAN, S. MARLET — **Changes in the soil under an irrigated sugarcane crop in Kenana, Sudan**

The sugarcane zone of Kenana, Sudan, covers 35 000 ha of vertisols, row irrigated using water from the White Nile. The intensive watering practised in sugarcane crops leads to changes in the chemical characteristics of the soils. Compared to neighbouring uncultivated areas or fields of rainfed crops, the salinity of plots that have had a monoculture for 15 years has been seen to fall, notably at a depth of between 0.50 and 1.50 m, primarily due to a drop in chloride, sodium and sulphate contents. Conversely, exchangeable potassium and organic matter contents have been seen to increase in the top 0.50 m of soil. Whereas the change in organic matter content can be put down to the length of the crop cycle (12 months for sugarcane, 3 months for sorghum), that in the exchangeable potassium content is attributable to soil enrichment by irrigation water, a source of potassium. The various analyses made at Kenana are also used as the basis for a discussion of the merits of using irrigation water with a positive residual calcite alkalinity, which does not result in alkalization under these conditions, as the water table is very deep down.

Keywords: Sudan, *Saccharum*, vertisols, irrigation, salinity, organic matter, soil changes

M. BROUWERS, A.A. OSMAN, S. MARLET — **Evolución del suelo con cultivo de regadío de caña en Kenana, Sudán**

El área azucarera de Kenana en Sudán se extiende por 35 000 ha de vertisoles, regados en surco con el agua del Nilo blanco. El riego intensivo en el cultivo de la caña ha producido cambios en las características químicas de los suelos. Con respecto a las tierras vecinas no cultivadas o dedicadas a cultivos de secano, se observó un descenso de la salinidad en los campos de monocultivo, especialmente entre 50 cm y 1,5 m de profundidad, debido principalmente a una disminución de las tasas de cloruro, sodio y sulfato. Al contrario, la tasa de potasio intercambiable y el contenido en materia orgánica aumentan en los primeros 50 cm del suelo. Mientras que la evolución del contenido en materia orgánica se explica por la duración del ciclo vegetativo (12 meses en la caña, 3 meses en el sorgo), la de la tasa de potasio intercambiable hay que vincularla a un enriquecimiento del suelo por el agua de riego, fuente de potasa. Los distintos análisis realizados en Kenana permiten también discutir el uso para riego de un agua con una alcalinidad residual positiva, que no acarrea aquí la alcalinización del suelo al estar la capa muy profunda.

Palabras clave: Sudán, *Saccharum*, vertisoles, riego, salinidad, materia orgánica, evolución de los suelos.