

# Les sols argileux de la région de Nianga- Podor : répartition, caractéristiques, aptitudes et risques de dégradation sous irrigation

□ □ □

P. Boivin\*, D. Brunet\*, C. Gascuel-Odoux\*\*,  
P. Zante\*\*\* et J.P. Ndiaye\*\*\*\*

\* Pédologue, ORSTOM, BP 1386 Dakar

\*\* Pédologue, INRA, 65 route de St Brieuc, 35042 Rennes

\*\*\* Pédologue, ORSTOM, 70-74 route d'Aulnay, 93143 Bondy cedex

\*\*\*\* Pédologue, ISRA, BP 240 Saint Louis, Sénégal.

On a coutume, s'agissant de l'irrigation dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal, de considérer que la riziculture se fait et se fera sur sols argileux, et que les autres sols, considérés par opposition comme "légers" et "filtrants", seront le support d'autres cultures. En particulier, on se propose d'y introduire des cultures de diversification. La connaissance du profil textural des sols de la moyenne vallée est donc de première importance. Il se trouve que l'on ne dispose, pour l'évaluer, que d'une cartographie au 1/50.000<sup>ème</sup> (FAO/SEDAGRI, 1973).

Il en est de même pour les autres propriétés des sols : elles n'ont pas été inventoriées à une échelle suffisamment détaillée pour être exploitables au niveau des périmètres irrigués, dont la superficie est en règle générale nettement inférieure à 1.000 ha (voir par exemple l'article introductif de Lericollais et Sarr dans cet ouvrage).

Partant de ce constat, des études ont été menées par le laboratoire de Pédologie de l'ORSTOM au Sénégal, afin de fournir aux décideurs une information détaillée, à l'échelle des aménagements, sur la répartition des sols argileux, leurs caractéristiques, et les risques de dégradation liés à leur mise en valeur par irrigation.

Cet article livre un premier niveau de résultats, et vise plus particulièrement à discuter un certain nombre d'idées reçues concernant les sols argileux de la moyenne vallée du fleuve et leur mise en valeur. Nous discuterons principalement les acceptions selon lesquelles :

- l'eau du fleuve serait d'excellente qualité et ne ferait encourir aucun risque de dégradation aux sols ;
- les sols argileux se situeraient dans les fonds de cuvettes, les autres unités morphologiques comportant des sols "légers" et "filtrants" ;
- les problèmes de salinité seraient sporadiques en amont de Richard-Toll, et ne constitueraient pas un facteur de dégradation sérieux dans la moyenne vallée.

## MISE EN PLACE DES MATÉRIAUX ET ORGANISATION DU MILIEU

On trouvera une description de la géologie régionale dans la thèse de P. Michel (1973). La carte morpho-pédologique de la vallée (FAO-SEDAGRI, 1973) s'appuie sur ces travaux. Les sédiments alluviaux sur lesquels se développent les sols de la moyenne vallée sont tous dus à l'histoire géologique récente. Leur mise en place peut se résumer comme suit :

Antérieurement à la grande transgression du Nouakchottien (5.500 BP), le fleuve circulait entre de grands cordons dunaires développés en conditions arides. Les plus spectaculaires sont les alignement de dunes rouges rubéfiées de l'époque ogolienne, bien visibles depuis la route Saint-Louis Matam, à partir de Tille-Boubakar (se reporter aux cartes de situation en tête d'ouvrage).

La transgression du Nouakchottien a vu le golfe marin envahir la vallée jusqu'à Boghé. Durant cette période marine, une importante terrasse de sables fins s'est mise en place dans la vallée alluviale. Ce sont les sables du Nouakchottien, que l'on rencontre vers 1m de profondeur dans toute la moyenne vallée aval.

L'estuaire a accompagné la mer dans son recul jusqu'à la position actuelle (de 2.500 BP à nos jours). Des mangroves à *Rhizophora* se sont développées dans des conditions fluvio-marines, puis des sédiments fluviaux se sont déposés. Très schématiquement, ils sont de deux catégories :

- les cuvettes de décantation, correspondant à des sédiments argileux à argiles gonflantes dominantes ;
- les levées fluviales (bourrelets de berges) à texture argilo-sablo-limoneuse, actuelles ou plus anciennes, et leurs formations "associées" : les deltas de rupture des levées, composés des mêmes matériaux.

Une troisième catégorie est mentionnée par P. Michel, sans être très bien définie : les "petites levées", qui seraient des figures de remaniement des levées. Ces petites levées occupent une part importante de la surface cartographiée par FAO-SEDAGRI. Non définies texturalement dans la légende, elles

sont généralement interprétées comme étant des unités composées de matériaux à texture "légère" (sableuse).

Plusieurs aspects de la mise en place de ces sédiments récents déterminent les caractéristiques majeures des sols et leur comportement sous culture :

- i) Les dépôts de sédiments superficiels contiennent des proportions variables, parfois très importantes, d'argiles gonflantes.
- ii) Ces sédiments ne sont pas très épais en général et reposent sur une couche de sables du Nouakchottien de quelques mètres d'épaisseur.
- iii) Leur mise en place a été précédée d'une phase fluvio-marine et des sels marins ont été piégés dans les sédiments lorsque la mer s'est retirée. Une mangrove à *Rhizophora* s'est développée dans l'ensemble de la région. lors du recul de l'estuaire. Des sols sulfatés acides se sont formés, ils sont maintenant très évolués et enfouis sous les sédiments récents.

## ARGILE, SOLS ARGILEUX, SOLS VERTIQUES

Les sédiments sur lesquels se forment les sols de la moyenne vallée se sont déposés récemment (5000 BP à nos jours). Ils se composent d'un mélange en proportions variables d'argile, de limons et de sables. La fraction des sables grossiers est négligeable ; celle des limons fins est peu variable. Il y a donc surtout, en complément de la fraction argileuse, une fraction composée de sables fins et limons grossiers, se rapprochant beaucoup de la granulométrie des sables du Nouakchottien dont une partie a pu être remobilisée.

Les argiles sont composées de 60% de minéraux gonflants, essentiellement des smectites et des interstratifiés, de 30% de kaolinite, 5% d'illite et 5% de chlorite. Il semble que cette répartition soit à peu près constante, bien que le taux d'argile lui même varie dans le paysage.

Les notions de "sol argileux" et de "sol lourd" sont à employer avec précaution. Si la première peut correspondre à un seuil précis de teneur en argile, qui dépend toutefois de la nomenclature utilisée (Verheyne et Ameryckx, 1984), elle est souvent employée, comme la deuxième, avec un sens plus large. On fait alors référence à un sol à fraction argileuse dominante, de perméabilité faible, difficilement travaillable, et ayant tendance à développer une hydromorphie. Nous verrons que ce comportement est celui de beaucoup de sols de la vallée, bien que leur fraction argileuse puisse varier dans des proportions importantes.

On appelle sols vertiques des sols à argiles gonflantes, présentant macroscopiquement une morphologie particulière liée aux phénomènes de gonflement et de retrait qui se produisent lorsque leur teneur en eau varie. On note en particulier l'apparition de larges fentes de retrait, de faces de glissement et de cisaillement entre les agrégats, et dans le cas de certains vertisols, l'apparition

d'un modelé très particulier, formé d'une succession de bosses, appelé gilgaï. On trouvera une description détaillée de ces sols dans Wilding et Puentes (1988). Nous ferons ici référence au caractère vertique dans le sens défini par le Référentiel Pédologique Français (AFES-INRA, 1992).

## RÉPARTITION DES SOLS ARGILEUX

En se conformant à la nomenclature du GEPPA citée par Baize (1989), nous situons la limite des sols argileux aux alentours de 40% de teneur en argile. La carte FAO-SEDAGRI - seul document général disponible - propose une zonation du milieu sur la base de considérations morpho-pédologiques. La plupart des unités sont déterminées par photo-interprétation, et correspondent aux unités morphologiques du paysage telles que les avait définies P. Michel (1973). Cette conception associe implicitement un profil textural type à chaque unité géomorphologique. Ces différentes formations ont été échantillonnées (plus de 300 fosses), et leur granulométrie analysée. Nous en avons dégagé les observations suivantes :

- les faibles teneurs en argile (moins de 17%) sont rares. Elles correspondent à de minces bandes de sols, principalement des bourrelôts de berge. On peut généralement s'attendre à trouver près de 30% d'argile dans les hautes levées. Ces sols sont le plus souvent mal structurés, souvent sodisés ou magnésiens, et donc instables, peu perméables et hydromorphes (ces différents points ont été mis en évidence par Maynard (1958) dans le casier de Guédé, ses conclusions sont généralisables à la région) ;
- la transition entre bourrelôts de berge et cuvettes, si l'on excepte les deltas de rupture, semble progressive et mal corrélée à la topographie, au point de vue granulométrique : on rencontre rarement une limite nette entre un dépôt argileux et un dépôt limono-argilo-sableux, la transition progressive est difficile à localiser au vu de la topographie et des états de surface ;
- la moitié environ des sols de "petites levées" correspond à des sols vertiques, statistiquement non différents au plan morphologique et analytique des sols des cuvettes. Il semble dans ce cas que le qualificatif de "petite levée" soit dû uniquement à une cote topographique légèrement supérieure à celle des fonds de cuvettes ;
- les sols des cuvettes contiennent de 45 à 90% d'argile, et des caractères vertiques apparaissent à partir d'une teneur en argile de l'ordre de 50%.

On considère que les Périmètres Irrigués Villageois (PIV), pour être situés à proximité des cours d'eau, se trouvent sur des levées, et donc sur des sols sableux. En réalité, 75% de la surface des PIV de la région correspond à des sols qualifiés de "*hollalde*" ou "*faux hollalde*" par les paysans : ils ont plus de 45% de teneur en argile. Nous tenons donc à souligner le risque qu'il y a, pour

les projets de développement, à considérer à partir d'une lecture trop rapide des documents existants, qu'en dehors des cuvettes les sols sont sableux, légers et non hydromorphes.

Nous évoquerons à cette occasion la terminologie vernaculaire de description des sols pour rappeler qu'elle ne se rapporte pas uniquement aux caractéristiques internes du sol. Ainsi, le terme "*foonde*" pourra désigner des sols de texture très variée, mais généralement non submergés par la crue. Comme le montre Maynard (1960) dans son essai de typologie, il est difficile d'associer la terminologie vernaculaire à des types de sols autrement que de façon générale. On trouve malheureusement trop souvent dans la littérature une interprétation erronée du "*foonde*", considéré comme un sol sableux et filtrant.

### CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES SOLS ARGILEUX

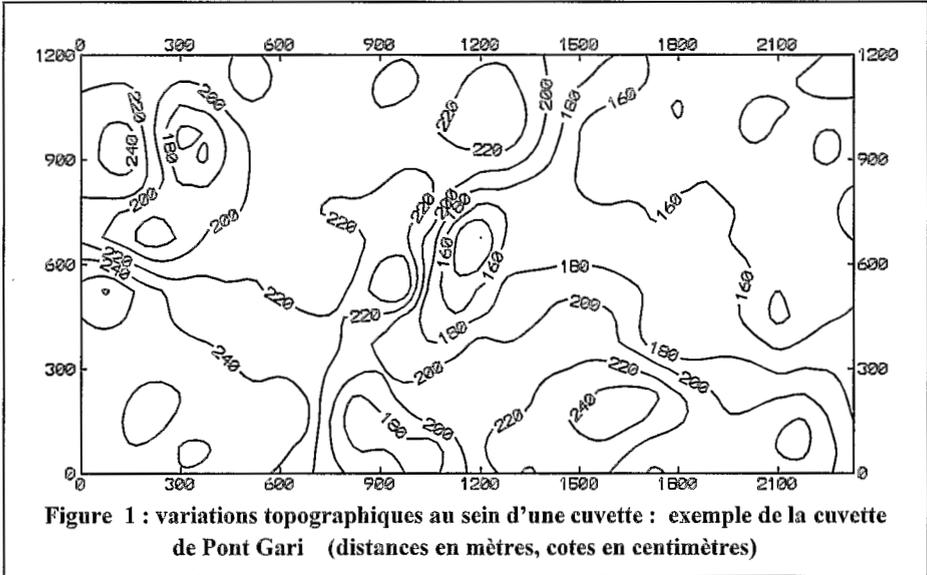
Cette description se base sur une prospection effectuée sur les unités "cuvettes" et "petites levées" de la carte FAO-SEDAGRI.

Les sols argileux ont une épaisseur comprise entre 0.4 et 2 mètres, et reposent sur la terrasse marine des sables du Nouakchottien. Leur épaisseur moyenne est de 1m et est indépendante de la cote topographique, de sorte que l'on peut supposer que les variations topographiques (modèle légèrement ondulé, figure 1) sont liées à un modèle préexistant de la terrasse marine. La transition entre le sable et l'argile se fait généralement sur quelques centimètres. A ce niveau, il est fréquent d'observer des traces de l'ancienne végétation de mangrove (enracinement de *Rhizophora* en particulier).

En surface, et à proximité des sols à texture plus mélangée (hautes levées), on peut observer une augmentation de la fraction sableuse. Des épandages récents de limons formant un horizon superficiel de quelques centimètres d'épaisseur peuvent également recouvrir les profils. A ceci près, le profil granulométrique est relativement uniforme.

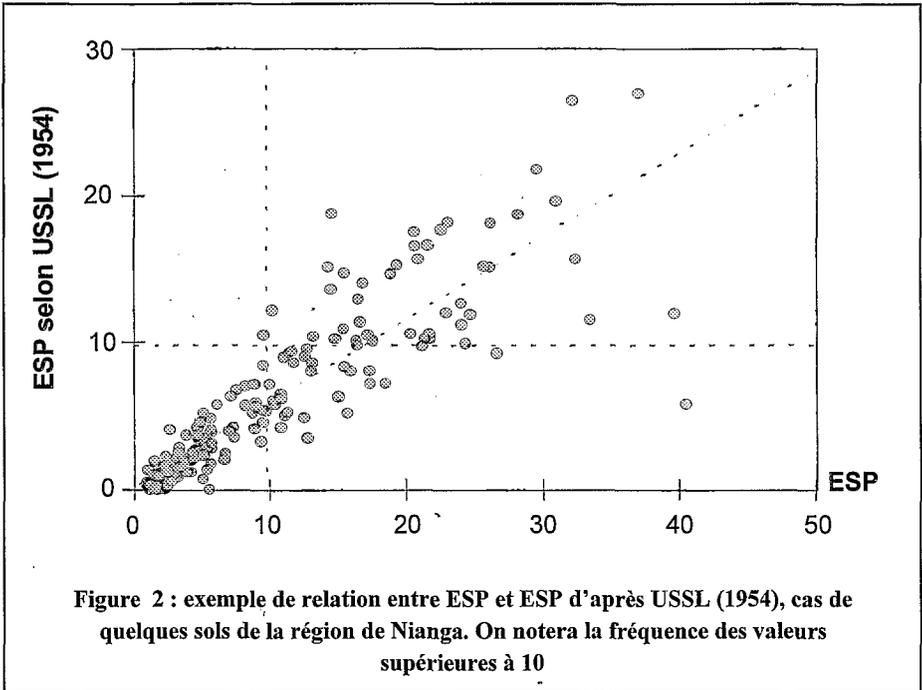
Hors cultures, les sols sont secs sur un quinzaine de centimètres, puis frais sur le reste du profil, et ceci même dans la zone endiguée de Nianga, où les nappes se sont pourtant rabattues depuis vingt ans et se trouvent à plus de 4m de profondeur. Les sols sont presque toujours salés, avec des faciès salins variables. On rencontre en effet des sols à carbonate de calcium (les moins fréquents), des sols à salinité chlorurée et des sols à salinité sulfatée. Ces deux anions peuvent coexister ou non. Ils sont associés au calcium et au magnésium en proportions généralement égales, et au sodium. La remontée capillaire a permis de précipiter différents sels, à partir de ces solutions. On peut donc observer dans les profils de sol, de la profondeur vers la surface les minéraux suivants :  $\text{CaCO}_3$  (calcite, rare),  $\text{CaSO}_4$  (gypse, fréquent),  $\text{NaCl}$  (halite, rare sur sol non cultivé). Le magnésium semble migrer avec le calcium, les analyses d'extrait de sol permettent de montrer qu'il se forme  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{MgCl}_2$  et  $\text{CaCl}_2$ . Cette salinité semble d'origine marine. En sol non

cultivé, la teneur en sels augmente fortement à des profondeurs généralement supérieures à 70 cm. Il faut noter la faible teneur en potassium, par ailleurs à peu près constante, et qui s'explique peut-être par la présence d'illite et d'intrastifiés.



Les capacités d'échange sont comprises entre 0.35 et 0.65 meq par gramme d'argile. L'analyse des bases échangeables doit se faire à partir d'un extrait à l'éthanol, en raison de la présence de sels de sulfates (Podwojewski et Pétard, 1988). Le complexe d'échange est saturé à plus de 70%. Il faut noter la forte teneur en sodium échangeable : 37% des échantillons analysés ont un taux de sodium échangeable (ESP) supérieur à 10 (figure 2). Cette valeur est considérée comme un seuil critique au delà duquel des problèmes physico-chimiques peuvent se poser. Sur les sols les plus argileux, on ne note cependant aucun effondrement de la structure observable macroscopiquement, seul un effet sur le comportement au retrait est identifiable (Coconnier, 1992, Colleuille, 1993). Au niveau des sables et des sols des hautes levées, l'effet de la sodisation sur la structure du sol est en revanche net (absence de structure), et sans doute renforcé par les forts taux de magnésium comme le suggère Maynard (1958). On peut penser que les fortes teneurs en gypse et en calcium échangeable permettent aux sols argileux de conserver une bonne structure apparente. Selon Maynard et Combeau (1960), elle serait toutefois relativement instable. Les courbes de retrait établies sur échantillons non remaniés confirment cette instabilité de la structure et l'important foisonnement du sol vers la saturation. Il faut donc retenir la sodisation comme un risque potentiel de

dégradation des sols en cas de lessivage de ces derniers, comme cela a été constaté dans le delta (Le Brusq, 1980 ; Le Brusq et Loyer, 1983).



Il faut signaler enfin la relative acidité des sols non cultivés, dont le pH de l'extrait aqueux est voisin de 6 et peut chuter à des valeurs de l'ordre de 4. Le pH sur extrait KCl est nettement inférieur au pH sur extrait aqueux (1,5 point en moyenne), cette réserve d'acidité correspond à des protons échangeables pouvant représenter 10% des cations échangeables.

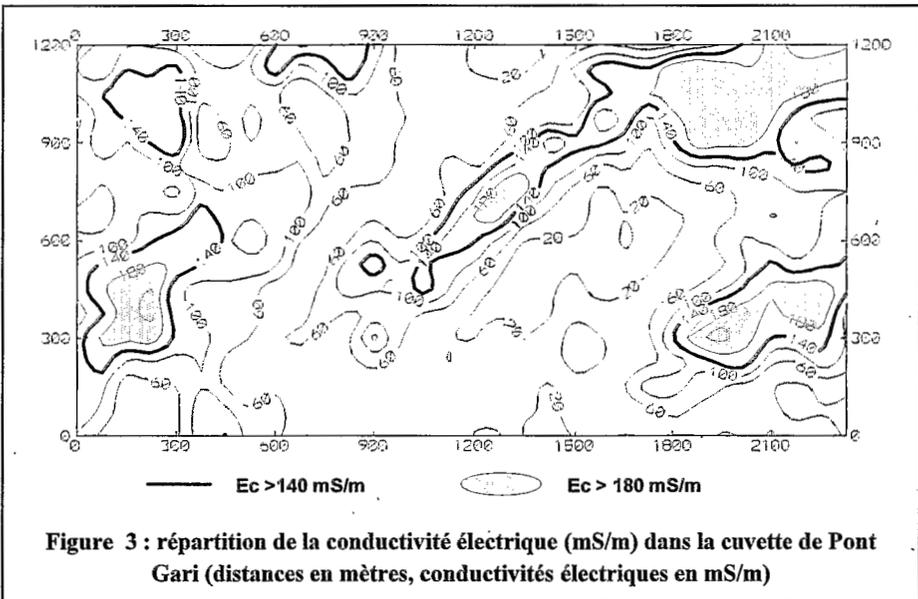
La morphologie des profils de sol est fortement dépendante de la teneur en argile et du régime hydrique. Les sols présentent des caractères vertiques (faces de glissement, structures en coins) à partir d'un seuil de 50% de teneur en argile (exception faite de l'horizon superficiel, qui ne permet aucun diagnostic). Il s'agit bien d'une valeur seuil : il n'y a pas de relation entre l'importance des caractères vertiques et la teneur en argile au-delà de 50%. Les zones légèrement en dépression favorisent l'accumulation des eaux de ruissellement. De larges prismes délimités par des fentes de retrait se développent alors lorsque le sol se dessèche. A la faveur des légères variations du modelé (quelques dizaines de centimètres), d'importantes différenciations morphologiques liées aux phénomènes de gonflement et de retrait apparaissent donc sur des séquences relativement courtes (de 10 à 100m). Elles ne semblent pas correspondre à des variations des constituants du sol et de nombreuses observations permettent de montrer qu'elles sont réversibles.

## VARIABILITÉ ET ORGANISATION SPATIALE

Différents niveaux d'organisation selon plusieurs facteurs de variabilité, peuvent être reconnus. Nous avons mentionné l'existence à une échelle locale d'un léger modelé, qui semble conditionner le régime hydrique du profil de sol, et par conséquent sa morphologie générale.

Au sein d'une même cuvette de décantation, la salinité peut varier fortement. Elle est répartie en plages de forme allongée, correspondant généralement à d'anciens chenaux au niveau des sables du Nouakchottien (figure 3). La salinité est généralement chlorurée sodique, avec localement une domination du sulfate de calcium pour de fortes conductivités (plusieurs mS/cm sur extrait 1/5 de sol). L'existence d'une ancienne pédogenèse sulfatée-acide est peut-être l'une des explications des fortes teneurs en sulfates. En dehors des variations de salinité, les caractéristiques des sols au sein des cuvettes évoluent faiblement et de façon régulière. En particulier, la teneur en argile diminue au voisinage des levées et des bourrelets de marigots.

D'une cuvette à l'autre, on note des variations des caractéristiques géochimiques des sols. Certaines cuvettes sont particulièrement salées, d'autres alcalisées, d'autres enfin riches en gypse. La capacité d'échange des argiles, très homogène au sein d'une cuvette, varie brutalement d'une cuvette à l'autre dans l'intervalle des valeurs défini précédemment.



Une caractérisation peu coûteuse du sol pourra se faire en prélevant aux profondeurs 0-20, 50 et plus de 70 cm, en réalisant une analyse granulométrique et une mesure du pH et de la conductivité de l'extrait aqueux. Concernant

la salinité, seule une prospection réalisée au conductivimètre électromagnétique (Rhoades et Corwin, 1981) et à une échelle détaillée (1/5.000<sup>e</sup> au moins) permettra de rendre compte de façon économique de la situation. Une analyse des sels de l'extrait aqueux peut être nécessaire pour identifier le type de salinité, au moins dans l'horizon profond.

## APTITUDES AGRONOMIQUES

Les aptitudes de ces sols ont été étudiées dans des travaux assez anciens (Delolme, 1936, Aubert, 1949, Maynard, 1958, Maynard, 1960, Moureaux, 1968), en particulier en relation avec les cultures de décrue. Ils sont actuellement considérés comme des sols à vocation rizicole. Remarquons toutefois que la culture de la tomate ou de l'oignon s'y pratique avec succès dans l'île à Morphil.

D'un point de vue fertilité chimique, on a principalement posé le problème du phosphore et du potassium. Le cas de ce dernier a été évoqué : il est possible que sa disponibilité soit liée à la présence d'illite et d'interstratifiés. Ce point n'a pas fait l'objet d'études spécifiques et reste donc à préciser. Maynard (1958, 1960) et Moureaux (1968), posent le problème d'un blocage éventuel du phosphore, pouvant expliquer les teneurs très faibles en phosphore assimilable. Ce fait n'a pas été confirmé depuis. Nos résultats montrent que les teneurs en phosphore total et phosphore assimilable de certaines rizières ont considérablement augmenté par rapport au sol nu, tandis que la réponse aux engrais phosphatés semble faible (voir aussi Ndiaye et Barry, dans cet ouvrage).

En tout état de cause, des rendements en paddy de 10 t/ha et plus ont été obtenus (culture d'hivernage), et des rendements de 8 t/ha sont maintenus sur des essais de longue durée, en stations agronomiques. Les résultats obtenus dans les PIV avec la tomate semblent tout aussi satisfaisants, lorsqu'une bonne maîtrise technique a été assurée. Il semble en outre que les problèmes d'enherbement soient moins aigus sur ces sols que sur les *pode*. La question de la fertilité chimique des sols argileux ne paraît donc pas préoccupante. Elle est même secondaire face aux risques de dégradation introduits par la pratique de l'irrigation.

## IRRIGATION ET DÉGRADATION DES SOLS

L'irrigation d'un sol place ce dernier dans une situation fondamentalement différente du régime pluvial : si douce soit-elle, l'eau d'irrigation possède des caractéristiques chimiques susceptibles, à plus ou moins long terme, de modifier le sol. La modification du régime hydrique est également un changement profond des conditions de pédogenèse, dont les conséquences doivent être envisagées. La gestion conservatoire des sols irrigués dans la vallée pose effectivement des problèmes liés aux transferts de sels et à la gestion de l'eau.

## Salinisation

Les sels neutres, d'origine marine, sont présents à partir de 80 cm de profondeur environ dans tous les sols de la moyenne vallée aval. L'irrigation entraîne un rehaussement des nappes et une évaporation permanente qui favorisent une remontée des sels dans les profils. Ce fait avait été sous-estimé dans le passé, et en particulier, on avait pensé que les sels étaient essentiellement présents en bordure des levées (Loyer, 1989). Or la salinité des PIV de la région de Podor a été multipliée par un facteur 7 à 10 en moins de 10 ans, indépendamment du type de sol (de Poitevin, 1993). Bien souvent, cette remontée en surface des sels se fait dès la première année. La conductivité électrique moyenne, sur l'ensemble des périmètres, est de 300 mS/m au conductivimètre électromagnétique, valeur voisine des seuils de tolérance de la tomate et de l'oignon. Cette nuisance est effectivement partout constatée par les exploitants, dont les aménagements ne disposent en général pas de drains.

Cette contrainte à la mise en valeur, pour forte qu'elle soit, n'en est pas moins gérable. Nous recommanderons en premier lieu qu'un budget minimal soit consacré à la reconnaissance du sol avant aménagement, certains sites présentant des risques particulièrement importants. En second lieu, un fossé d'évacuation des eaux doit être prévu au niveau de chaque maille hydraulique, et doit avoir au minimum 50 cm de profondeur.

## Sodisation

La sodisation des argiles correspond à l'accumulation de sodium sur le complexe d'échange. Elle entraîne un effondrement de la structure du sol. Etant donné les taux de sodium et magnésium échangeables des sols, et leur faible stabilité structurale, il semble indispensable, dans le cas des sols drainés, de disposer d'un suivi minimal au moyen de mesures de pH et de teneur en sodium échangeable, afin d'éviter d'engager ces sols dans un processus de sodisation difficilement récupérable et déjà constaté par endroits. Un lessivage bien conduit et utilisant l'eau du fleuve ne devrait pas poser de problème.

## Alcalinisation

Le danger le plus sérieux provient de la qualité de l'eau du fleuve. En premier examen, elle paraît d'excellente qualité : pH proche de la neutralité et conductivité électrique faible depuis la fermeture de Diama (en moyenne 58 $\mu$ S/cm en amont de Richard-Toll), taux de sodium faible par rapport au calcium, ce qui écarte *a priori* les risques de sodisation sous irrigation. Cette analyse est celle présentée dans toutes les études de faisabilité... mais une lecture attentive de l'étude FAO-SEDAGRI (1973) permet de découvrir en page 16, quatre lignes émettant de sérieuses réserves quand à la qualité de l'eau du fleuve. Pourquoi ? Pour l'expliquer, il nous faut revenir sur certaines notions.

On appelle alcalinité d'une eau la différence entre les bases faibles et les acides forts que contient cette eau. On appelle alcalinité résiduelle vis à vis d'un minéral donné, l'alcalinité (les bases faibles) qui reste dans l'eau lorsque le minéral précipite. Une alcalinité (résiduelle) positive correspond donc à un excédent de bases faibles dans l'eau.

Lorsque une eau se concentre, si douce soit-elle, sa concentration en espèces solubles augmente et il vient un moment où l'on atteint le produit de solubilité de certains minéraux, qui vont alors précipiter. Donc :

- quelle que soit la douceur de l'eau d'irrigation, elle peut au bout du compte, en se concentrant, devenir très salée. Il faut savoir que la riziculture irriguée dans la vallée apporte de 15.000 à 18.000 m<sup>3</sup> d'eau par hectare et par campagne. Sans drainage, cette eau s'évapore entièrement sur place, et abandonne ainsi sur les parcelles environ 500 kg de sels par hectare et par cycle de riz (Salvignol, 1993) ;
- puisque certains minéraux précipitent, correspondant à certaines des espèces ioniques présentes dans l'eau, la composition de l'eau évolue au cours de sa concentration : il y a accumulation résiduelle des espèces non précipitées.

L'eau du fleuve Sénégal possède une alcalinité résiduelle vis à vis de la calcite (CaCO<sub>3</sub>) de l'ordre de 0,6 meq/l. Ce chiffre représente l'excédent de carbonates (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) par rapport au calcium (Ca<sup>2+</sup>). La calcite est le premier minéral qui précipite lorsque l'eau du fleuve se concentre. Chaque fois qu'une mole de CaCO<sub>3</sub> précipite, la teneur relative de l'eau en calcium diminue, et celle en carbonates augmente (puisque CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> est plus abondant que Ca<sup>2+</sup>). Or la calcite précipite pour une valeur constante du produit des concentrations en carbonates et en calcium. Ainsi, lors de l'apport d'eau suivant, la précipitation de calcite se fera à une teneur en calcium plus faible, et à une teneur en carbonates plus élevée : le phénomène d'accumulation résiduelle de carbonates s'auto-amplifie au cours du temps. D'une part, les carbonates étant une base faible, le pH va rapidement s'élever vers une valeur de 8,4 (équilibre avec la calcite). D'autre part, la teneur en calcium de l'eau du sol va s'abaisser, tandis que le sodium se concentre puisqu'il ne précipite pas. Le ratio sodium/calcium atteint alors des valeurs élevées, et une accumulation de sodium sur les sites d'échange des argiles (soit une sodisation du sol) se produit. Une nouvelle étape de dégradation est encore franchie, qui peut entraîner une inaptitude profonde du sol à la culture, et dont la réversibilité est mal connue et en tout état de cause coûteuse. Ce triste constat est d'actualité pour les sols de l'Office du Niger (Bertrand *et al*, 1993), alors que l'alcalinité résiduelle calcite de l'eau d'irrigation est inférieure de moitié à celle du fleuve Sénégal. On trouvera une description détaillée des mécanismes que nous venons de résumer dans Bourrié (1978), Droubi (1976), Ribolzi *et al* (1993) et Vallès *et al* (1992).

Si l'on concentre l'eau du fleuve Sénégal en bac d'évaporation, ce processus se produit effectivement. Le pH atteint 8,4 pour un facteur de concentration expérimental de l'ordre de 170. Or le facteur de concentration des eaux d'irrigation peut dépasser des valeurs de l'ordre de 2.000 (Bertrand *et al*, 1993) avec le temps. Il est donc clair, d'un point de vue géochimique, que l'alcalinisation des sols et des nappes des périmètres irrigués de la vallée est inévitable, faute d'un drainage bien conduit permettant d'évacuer l'excédent d'alcalinité. Ce drainage n'est jamais assuré en pratique, pas même dans les périmètres SAED où la remontée des nappes empêche toute infiltration de l'eau (Salvignol, 1993) et rend donc les drains non fonctionnels.

Certaines caractéristiques des sols leur confèrent un capital de résistance non négligeable face à cette dégradation. D'une part, ils disposent d'un stock de calcium susceptible de pallier le déficit de l'eau d'apport, et d'autre part, ils disposent d'une réserve d'acidité d'échange. Le calcium échangeable, et surtout le calcium provenant du gypse, permettent de maintenir une alcalinité résiduelle négative de la solution du sol... jusqu'à ce que le stock de calcium mobilisable soit épuisé. Après quoi, l'alcalinisation aura lieu. En moyenne, les sols argileux de la région sont en mesure de fournir du calcium permettant de neutraliser 25 meq de carbonates pour 100g de sol, soit moins de cinquante litres d'eau.

De fait, nos résultats montrent que le pH des sols irrigués évolue vers la neutralité. Plus grave, certains périmètres sont d'ores et déjà passés d'une salinité initiale de type sulfatée-calcique et chlorurée-sodique, à une salinité carbonatée sodique. Leur pH est passé, pour la tranche 0-20 cm, de 6 à 8. Il s'agit, comme cela était prévisible, de périmètres intermédiaires type IT (voir article introductif de Lericollais et Sarr). En effet, ces derniers sont planés, mais non drainés, réalisés sur sols très argileux, et ceinturés d'une puissante digue anti-inondation, mais qui prévient aussi toute sortie d'eau. Nous avons pu montrer qu'un piégeage d'air se produit à la mise en eau de ces sols, bloquant presque totalement l'infiltration. De telle sorte que chaque mètre cube d'eau apporté s'évapore et se concentre sur place, dans le premier mètre de sol. Les PIV privés (GIE) et autres aménagements sommaires semblent évoluer un peu plus lentement : ils sont mal planés, mal entretenus et sujets à de fréquents débordements... qui assurent un minimum d'évacuation des eaux concentrées. Les grands périmètres comme celui de Nianga, qui disposent d'un réseau de fossés de colature, évolueront sans doute encore plus lentement : leur bilan hydro-salin semble en effet mettre en évidence une évacuation des sels au niveau de la nappe, mais un très faible lessivage des horizons superficiels en raison de l'engorgement (Seguis, dans cet ouvrage, Salvignol, 1993).

En conclusion : les programmes en cours ont déjà montré qu'une grave dégradation des sols avait commencé. Une meilleure définition des risques dans l'espace et dans le temps est recherchée. Il est évident que des mesures conservatoires devront être prises rapidement : cela suppose une réaction des

bailleurs et des décideurs, ainsi qu'un effort de la recherche pour proposer des solutions attractives pour les exploitants. Les résultats en cours d'acquisition sont paradoxalement encourageants : les différences de comportement entre les sols où l'eau est totalement bloquée (type IT) et ceux où une modeste circulation est assurée, laissent espérer que des solutions techniquement simples pourraient suffire à l'échelle des périmètres. Il faudra toutefois régler le problème d'une évacuation globale des eaux usées vers la mer.

## CONCLUSION

Nous souhaitons rappeler quelques faits, pour une part déjà reconnus dès les excellentes études de Maynard (1958, 1960) :

- les sols argileux occupent environ 75% des superficies irrigables dans la moyenne vallée aval ;
- les sols véritablement sableux, filtrants et non hydromorphes sont rares, ils occupent des espaces restreints et de configuration spatiale complexe, de telle sorte qu'il est difficile, en dehors de quelques exceptions, de les aménager ;
- les problèmes de salinisation sont généraux, ils concernent toutes les unités géomorphologiques, dès qu'une irrigation sans drainage est mise en place ;
- les sols se dégradent progressivement par alcalinisation. Cette évolution peut être extrêmement dommageable pour les périmètres irrigués de la région, surtout en moyenne vallée amont où les sols sont moins gypseux. Faute de mesures conservatoires, des seuils probablement irréversibles (compte tenu des moyens nécessaires pour une réhabilitation) seront prochainement franchis.

Le pessimisme ne doit cependant pas l'emporter : les potentialités -en particulier rizicoles- de ces sols sont excellentes (il est vrai que dans le cas du riz, le facteur climatique en est la cause principale). Les mesures conservatoires qui devront être adoptées sont à rechercher. Des solutions non contraignantes pour les exploitants devront être trouvées.

Plus généralement, il apparaît qu'un observatoire des sols cultivés est indispensable, et que les bailleurs de fonds qui n'hésitent pas à financer des aménagements forts coûteux devraient envisager quelques modestes dépenses pour des études d'impact et la recherche de mesures conservatoires applicables.

BIBLIOGRAPHIE

- AFES-INRA, 1992, Référentiel Pédologique Français, *Association Française pour l'Etude des Sols, publié avec le concours de l'INRA.*
- Aubert, G., 1949 Observations sur les sols du Ferlo et de la vallée du fleuve Sénégal, *Multigr. ORSTOM, 15 p.*
- Baize, D., 1989, Guide des analyses courantes en Pédologie, *INRA Paris, 172p*
- Bertrand R., Bassirou Keïta. Kabirou N'diaye M., 1993, La dégradation des sols des périmètres irrigués des grandes vallées subsahariennes (cas de l'Office du Niger au Mali). *Cahiers Agriculture, 2, pp 318-329.*
- Bourrié, G., 1978, Acquisition de la composition chimique des eaux en climat tempéré. Application aux granites des Vosges et de la Margeride. *Thèse Université Louis Pasteur Strasbourg, Ed CNRS, 174 p.*
- Coconnier, K., 1992, Typologie de sols vertiques (vallée du fleuve Sénégal). Confrontation de la morphologie à la physico-chimie. *Mémoire de fin d'études, Multigr. Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie, Rennes. 49p + annexes.*
- Colleuille, H., 1993, Approches physique et morphologique de la dynamique structurale des sols. Application à l'étude de deux séquences pédologiques tropicales, *Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, Sciences de la terre, Pédologie, 312 p. et annexes.*
- Delolme, 1936, rapport sur l'agriculture dans la vallée du Sénégal. Partie A, les principaux facteurs externes de l'agriculture dans la vallée du Sénégal. Partie B., *culture, élevage, forêts. Bul. Mas, Saint Louis, n°37, pp 4,58,229.*
- Droubi (Al-), A., 1976, Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermodynamique de simulation. Application aux sols salés du Tchad. *Thèse Université Louis Pasteur Strasbourg, Ed. CNRS, 175 p.*
- FAO / SEDAGRI, 1973, Etude hydro-agricole du bassin du fleuve Sénégal. Etude pédologique, *Multigr. SEDAGRI, 251 p.*
- Le Brusq, J.Y., 1980, Etude pédologique des cuvettes de la vallée du Lamp-sar. *Multigr. ORSTOM Dakar, 76 p. et annexes.*
- Le Brusq, J. Y. et Loyer, J. Y., 1983, Evolution de la salinité des sols et des eaux en relation avec la riziculture submergée dans le delta du fleuve Sénégal. *Multigr. ORSTOM Dakar, 16 p.*
- Loyer, J.Y., 1989, Les sols salés de la basse vallée du fleuve Sénégal, caractérisation, distribution et évolution sous culture, *ORSTOM, collection Etudes et Thèses, 137 pages*
- Maynard, J., 1958, Etude expérimentale des facteurs naturels influant sur les cultures de décrue. *Multigr. ORSTOM Dakar, 45 p. et un fascicule d'annexes.*
- Maynard, J., 1960, Etudes pédologiques dans la vallée alluviale du Sénégal. *MAS, Div. agronomique. bull. 122. 38p. multigr.*
- Maynard J. et Combeau, A., 1960, Effet résiduel de la submersion sur la structure du sol (mise en évidence à l'aide de l'indice d'instabilité structurale de Hénin). *Sols Africains, V, n°2, pp 123-148.*
- Michel, P., 1973, Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie, étude géomorphologique, *mémoires ORSTOM, 3 tomes, ed. ORSTOM Paris.*
- Moureaux, C., 1968, Etudes microbiologiques en sols hydromorphes de la vallée du fleuve Sénégal. *Multigr. ORSTOM Dakar, 19 p.*
- Podwojewski P. et Pétard, J., 1988, Expression des sels solubles et des bases échangeables sur un vertisol calcimagnésique à gypse et à carbonates (La Tamoa, Nouvelle-Calédonie), *ORSTOM, Notes techniques, sciences de la terre. N2, 75 pages.*

- Poitevin de, F., 1993, étude d'impact des techniques culturales sur les sols des aménagements hydro-agricoles de la région de Podor, *Mémoire ESAP, Ecole Supérieure d'Agriculture de Purpan, Toulouse, France, 53 p et annexes.*
- Rhoades J.D. and Corwin, D.L., 1981, Determining soil electrical conductivity-depth relations using an inductive electromagnetic soil conductivity meter, *Soil Sci. Am. J.*, 45, 225-260
- 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. et annexes.
- U. S. Salinity Laboratory Staff (US-SL), 1954, Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *US Dept. Agric. Handb. 60, Washington VIII.*
- Vallès, V., Pachepsky, I. et Bourrié, G., 1992, Cartographie géochimique globale des eaux en zone aride. Relation avec la dynamique des sols salso-diques. *Communication Association Française pour l'Etude des Sols, journée thématique "Les sols salés et leur mise en valeur", 26 Mai 1992.*
- Verheye, W. et Ameryckx, J., 1984, Mineral fractions and classification of soil texture. *Pédologie*, 2, pp. 215-225.
- Wilding, L.P. et Puentes, R., 1988, Vertisols : their distribution, properties, classification and management. *Wilding et Puentes editors, Texas A&M University Printing Center, 193 p.*

□ □ □