B PB 1754/1

ISSN 1252-6851
235

Les sols de la moyenne vallée du fleuve Sénégal :

caractéristiques et évolution sous irrigation

P. Boivin(1), F. Favre(1) (2) et J-L. Maeght (2)

(1) ORSTOM, L'Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération, BP 1386 Dakar
(2) Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, IATE-Pédologie, CH-1015 Lausanne

RÉSUMÉ

Les sols alluviaux de la moyenne vallée du fleuve Sénégal, développés en climat aride, sont l'objet d'aménagements hydro-agricoles visant à développer les productions irriguées. Pour l'instant, la riziculture est la production principale, complétée par du maraîchage. Ces dépôts fluviaux et fluvio-marins récents sont organisés en unités géomorphologiques. Les bourrelets de berge des multiples bras du fleuve Sénégal sont des formations de texture argilo-sablo-limoneuse. Les cuvettes de décantation des eaux de crue sont des formations argileuses, où les sols présentent des caractères vertiques prononcés. Leur minéralogie fait apparaître un mélange de smectites et de kaolinites. De relativement mauvaises relations entre CEC et teneurs en eau laissent quelques doutes sur les proportions de minéraux à charges variables.

Ces sols sont naturellement salés selon un profil descendant, hérité du passé marin récent. Les sels sont très variables en composition et sans type dominant : chlorures et sulfates pour les anions, sodium, magnésium et calcium pour les cations.

Estimer leur évolution sous irrigation pose une gamme de questions très large. La modification du régime hydrique est très importante et susceptible à elle seule de créer des conditions de pédogenèse différentes. Les sels neutres d'origine marine migrent dans les profils vers la surface. L'eau du fleuve, d'influence continentale, présente une alcalinité résiduelle calcite positive, qui fait craindre une alcalinisation. Les difficultés d'approche sont nombreuses, en particulier du fait de l'absence de données anciennes, mais aussi en raison de la relative jeunesse des périmètres irrigués, et de la nécessité de diagnostiquer des évolutions complexes et encore peu marquées.

Un ensemble de travaux a été conduit, pour préciser ces dynamiques et tenter de reconstituer l'évolution du sol sous culture depuis l'aménagement. Des approches comparatives sols nus / sols cultivés ont permis de définir dans le cas des carbonates des indicateurs du fonctionnement du sol. Des suivis du fonctionnement hydro-salin des sols irrigués permettent de compléter ces approches et de définir les conditions générales d'évolution des sols en fonction de l'aménagement, de la culture et du type de sol.

La faiblesse du lessivage sur les sols argileux fait craindre un processus d'alcalinisation, qui semble en cours. Les nappes superficielles sont bien drainées par le fleuve pour les sols plus perméables, mais le maraîchage qui y est généralement pratiqué ne permet pas de lessivage. Les recommandations en termes de système de culture par type de sol sont donc complexes. De nouvelles recherches nous semblent nécessaires, qui associent une approche de la géochimie des solutions, une analyse des constituants minéraux, et des essais de modélisation des transferts.

Mots clés

Salinité, alcalinité, Sénégal, irrigation, riziculture

SUMMARY

SOILS OF THE SENEGAL RIVER MIDDLE VALLEY : properties and evolution under irrigation

The Senegal river middle valley soils, developed on alluvial deposits, are now widely concerned by irrigation projects, mainly cropped with flooded rice. The deposits are distributed in geomorphological units : mainly river banks, made of a silt, clay and sand mixture, and basins, made of clay deposits.

Reçu : février 1998 ; Accepté : novembre 1998

Étude et Gestion des Sols, 5, 4, 1998 - pages 235 - 246

Fonds Documentaire ORSTOM
010019549

Fonds Documentaire ORSTOM
Cote : B*19549 Ex : 1

Due to the development of swelling clay, the basins soils are mainly vertisols. Soil clay minerals are smectite (60 % of clay fraction) and kaolinite (30 % of clay fraction), in all the geomorphological units, irrelevant to the total clay content of the soil. Poor relations between CEC and water content suggest the presence of variable layer charge clay minerals.

Due to a primary salinity inherited from a recent marine transgression, the soils have a descending saline profile. Nevertheless, salts are now highly variable in composition. Anions can be either chloride or sulfate, and cations can be sodium, calcium or magnesium, mixed in any proportion.

Predicting the soil evolution under irrigation appears to be very complex. The water regime is strongly modified and the clay minerals evolution can be changed consequently. Primary marine salts tend to transfer to the topsoil layer under evaporating conditions. Flooding water, pumped in the river, has a positive residual alkalinity, that may induce sodication and alkalinisation. All those processes can interact. Some of them are very slow and have threshold effects. Moreover, there are now initial soil data for the oldest irrigation schemes. Thus diagnosis and prediction of the soil evolution is difficult.

Several investigation methods were tested as an attempt to give an answer. By comparing systematically cultivated and non cultivated soils, indicators of soil evolution have been defined, such as total carbonate content. Water and salt balance monitoring have been performed, to give quantitative information on the on going processes.

Due to poor soil leaching, an alkalinisation hazard is identified. It appears that the water table can play the role of a drain, when the irrigated scheme is close enough to the river. Nevertheless, it is difficult to recommend any alternative cropping system. Further research is needed, associating clay mineral, geochemical, and transfer modeling studies.

Key-words

Salinity, alkalinity, Senegal, irrigation, rice

RESUMEN

LOS SUELOS DEL VALLE MEDIO DEL RIÓ SENEGAL : características y evolución bajo riego

Los suelos aluviales del valle medio del río Senegal, desarrollados en clima árido, son el lugar de instalaciones hidro-agrícolas que tienden a desarrollar producciones irrigadas. Actualmente, el cultivo del arroz es la producción principal, así como el cultivo de hortalizas. Estos depósitos fluviales y fluvio-marinos recientes están organizados en unidades geomorfológicas, dentro de las cuales se distingue principalmente los bordos de orilla de los múltiples brazos del río Senegal que son formaciones de textura arcillo-limosa y las cubetas de decantación de las aguas de crecida que son formaciones arcillosas, donde los suelos presentan características vérticas pronunciadas. La mineralogía hace aparecer una mezcla de esmectitas y de kaolinitas. Relaciones relativamente malas entre CIC y contenido en agua fomentan ciertas dudas sobre las proporciones de minerales con cargas variables.

Estos suelos son naturalmente salinos de acuerdo a un perfil descendente, heredado del pasado marino reciente. Las sales son muy variables en composición y sin tipo dominante : cloruros y sulfatos para los aniones, sodio, magnesio y calcio para los cationes.

Estimar su evolución bajo irrigación plantea una gran gama de preguntas. La modificación del régimen hídrico es muy importante y susceptible, ella sola, de crear condiciones de pedogénesis diferentes. Las sales neutras de origen marino emigran en los perfiles hacia la superficie. El agua del río, de influenza continental, presenta una alcalinidad residual calcita positiva, que hace temer una alcalinización. Las dificultades del enfoque son numerosas, en particular el hecho de la ausencia de antecedentes numericos, además debido a la relativa juventud de los perímetros irrigados, y de la necesidad de diagnosticar evoluciones complejas y todavía poco observables.

Una serie de trabajos se realizó, para precisar estas dinámicas e intentar reconstituir la evolución del suelo bajo cultivo desde su inicio. Determinaciones continuas del funcionamiento hidro-salino de los suelos irrigados permitieron completar estos enfoques y definir las condiciones generales de la evolución de los suelos en función del establecimiento, del cultivo y del tipo de suelo.

La poca lixiviación en los suelos arcillosos hace temer un proceso de alcalinización, que parece en curso. Los mantos superficiales son bien drenados por el río en los suelos más permeables, pero el cultivo de hortalizas que se practica generalmente no permite una lixiviación. Las recomendaciones en términos de sistemas de cultivo por tipo de suelo son entonces complejas. Nuevas investigaciones son necesarias, para asociar un enfoque de la geoquímica de las soluciones, un análisis de los constituyentes minerales y ensayos de modelización de las transferencias.

Palabras claves

Salinidad; alcalinidad; Ró Senegal; irrigación; cultivo del arroz.

Le projet de réguler le cours du fleuve Sénégal et d'irriguer les terres de la vallée alluviale est ancien (Boivin *et al*, 1995a). Si des cultures irriguées ont été pratiquées dès 1940, la mise en service des barrages de Diama en 1986 et Manantali en 1990 *(figure 1)* a permis de généraliser l'implantation de périmètres irrigués en amont du delta. Les objectifs d'aménagement ont été de 375 000 hectares pour les rives sénégalaises et mauritaniennes, et de 240 000 hectares pour la seule rive sénégalaise. La connaissance des sols de la vallée repose essentiellement sur la carte dressée par Sedagri pour FAO (1973) au 1/50 000e, et sur quelques études plus anciennes pour ce qui concerne la moyenne vallée, en particulier sur les travaux de Maymard (1960).

Si l'on excepte l'étude de Le Brusq et Loyer dans le delta du fleuve (1983), aucune étude d'impact de l'irrigation sur les sols n'a été réalisée. Or le climat est extrêmement aride (environ 2 500 mm d'évaporation annuelle), et les sols sont peu perméables. Un programme d'évaluation des voies d'évolution des sols irrigués a donc été initié par le laboratoire de pédologie de l'ORSTOM au Sénégal. Une étude détaillée des caractéristiques des sols a été produite, puis différentes démarches ont tenté de préciser quelle était l'évolution des sols irrigués. Une synthèse de ces résultats et des questions posées est présentée dans cet article.

CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES SOLS

Conditions de mise en place

La dernière transgression (8 000 BP) a permis au golfe marin de remonter jusqu'à Bogué *(figure 1)*. Au cours de son recul, la mer a laissé en place des sédiments sablo-limoneux et des sels (Michel, 1973). Une mangrove littorale s'est développée, puis des sédiments fluviaux ont été déposés. En raison de la très faible pente, le fleuve a un parcours sinueux et se divise en de nombreux bras, dont le plus important est le Doué *(figure 2)*. Les différents bras ou marigots ont édifié des bourrelets de berge de texture mélangée, et des cuvettes de décantation des eaux de crue se sont formées.

Figure 1 - Carte de situation générale
Figure 1 - *General location map*

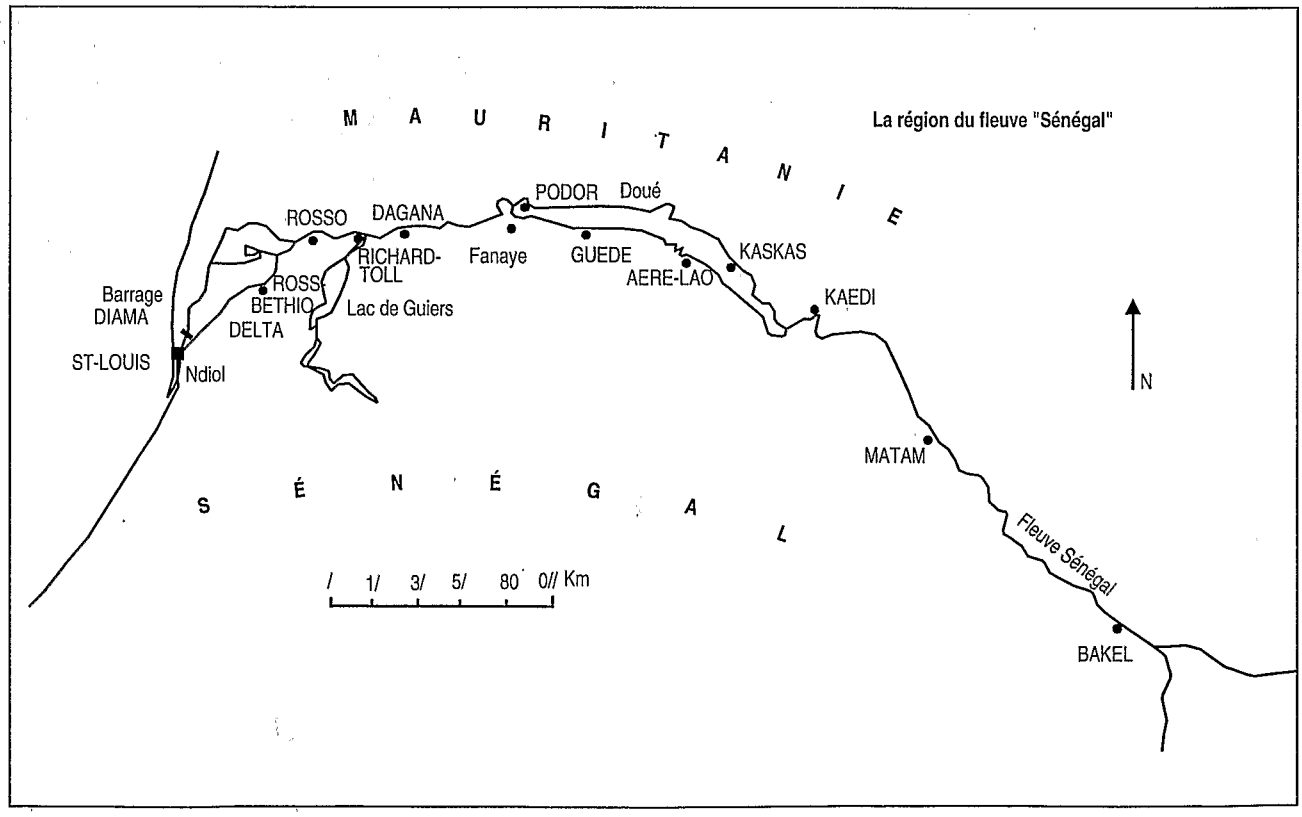
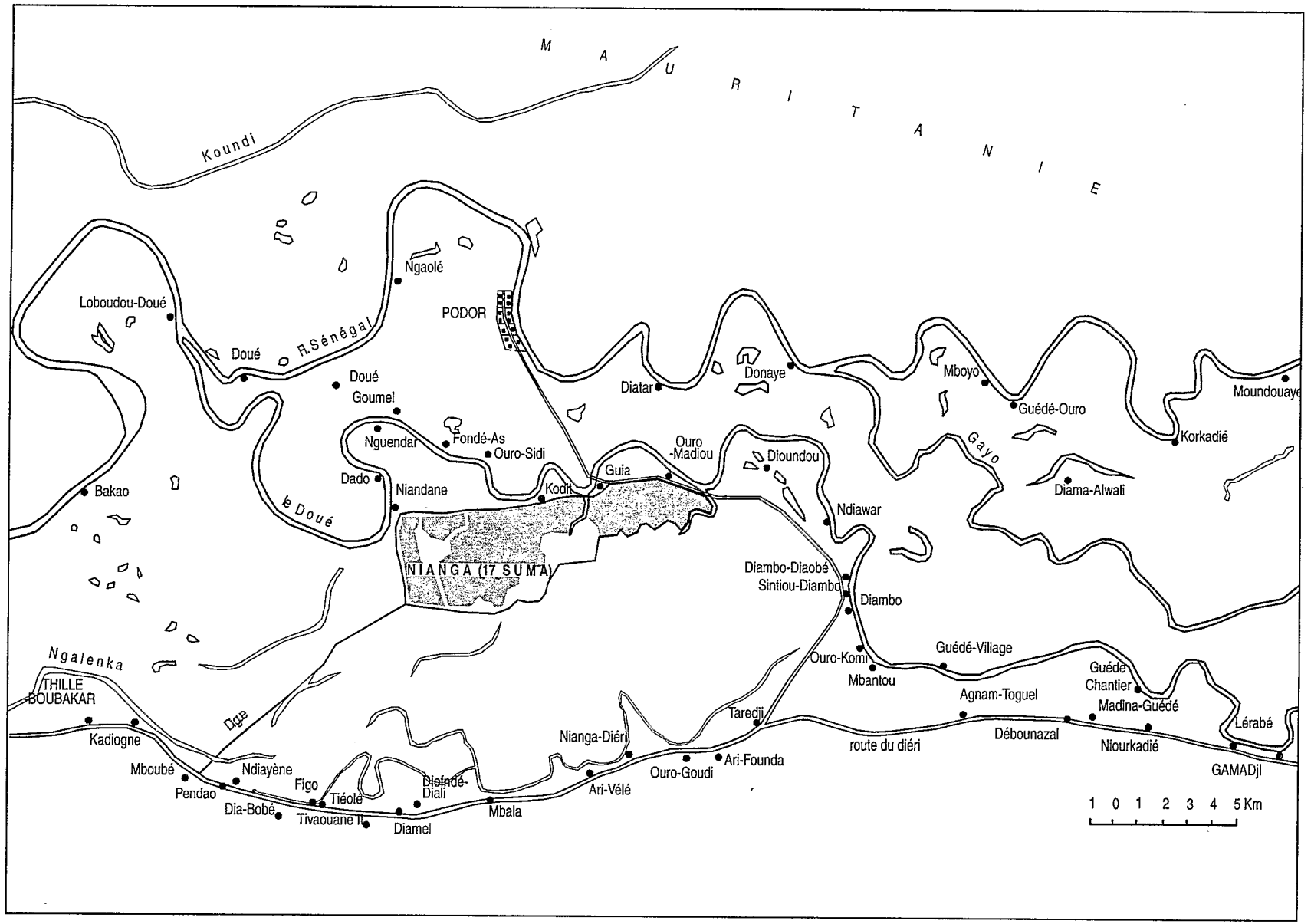


Figure 2 - Carte de situation du secteur étudié, moyenne vallée aval
Figure 2 - *Location map of the studied region, lower middle valley.*



Caractéristiques morphologiques

On distingue principalement les sols de bourrelets et les sols de cuvettes. Les sols de bourrelets, de texture mélangée, présentent des profils hydromorphes, de faible porosité. Des horizons appauvris en argile et en fer apparaissent fréquemment en profondeur et parfois en surface. Ils semblent correspondre à des circulations d'eau latérales. La transition avec les sols de cuvette se fait sur quelques mètres à quelques dizaines de mètres. Les profils deviennent progressivement argileux, sur environ un mètre de profondeur, avec des caractères vertiques prononcés. A leur base se trouve un horizon sableux blanchi qui atteint généralement plusieurs mètres d'épaisseur et est constitué de sables éoliens remaniés par la dernière transgression marine. Au sommet de cet horizon et à la transition avec l'argile, on trouve des « *iron pipes* », témoins de la présence d'une mangrove littorale lors du recul de la mer.

Caractéristiques physiques

Les premières informations sur la structure du sol et son comportement sous culture sont dues à Maymard (1960) et Maymard et Combeau (1960). Nous avons systématiquement inventorié les propriétés des sols en analysant au total plus de 300 fosses sur sols non cultivés (Boivin *et al*, 1995b). Les résultats de ces études concordent sur les points suivants :

· les sols argileux (plus de 45 % d'argile) sont les plus représentés (environ 75 % des surfaces cultivées en moyenne vallée aval, de Poitevin, 1993);

· les sols à dominante sablo-limoneuse contiennent en général une proportion non négligeable d'argile (environ 25 %), sont compacts, peu perméables et hydromorphes;

· la fraction argileuse est composée de 45 à 60 % d'argiles gonflantes (smectites et interstratifiés), ce qui explique le comportement de gonflement / retrait observé au contact de l'eau, et l'importance des caractères vertiques des sols de cuvettes;

· tous les sols manifestent une certaine instabilité structurale, amplifiée par la submersion ou la mise en culture, et caractérisée par un important foisonnement aux fortes teneurs en eau, ainsi que de fortes pentes des courbes de retrait. Ceci correspond à un affaissement de la structure lorsque le sol se dessèche;

· les perméabilités des sols sont faibles en général : de 2500 mm/j pour les sols de bourrelet de berge les plus perméables à 1 mm/j pour les sols vertiques (De Luca, 1996; Diaw, 1996). La perméabilité des sols de bourrelets est souvent modifiée par la formation d'un important encroûtement superficiel.

Caractéristiques chimiques

Le complexe d'échange des argiles est essentiellement saturé par du calcium et du magnésium en proportions égales. Maymard (1960) émet l'hypothèse que la relative instabilité des sols pourrait être due aux teneurs élevées en magnésium échangeable. Le sodium échangeable est très variable mais atteint fréquemment des teneurs suffisamment élevées pour être également responsable d'instabilités (Boivin *et al*, 1995b).

Les pH sur extrait aqueux sont acides. On note une importante réserve d'acidité d'échange qui se traduit par un écart moyen de 1.5 unité pH entre pH eau et pH KCl.

Les sols non cultivés sont salés en profondeur, en général à partir de 80 cm. Cette salinité est souvent d'origine marine, mais elle est parfois à dominante sulfatée-calcique (gypse). On peut trouver dans certains profils argileux, à partir de 80 cm-100 cm de profondeur, des carbonates. On trouve de grandes quantités de nodules de calcite localement, dans les profils de bourrelets de berges, au niveau de la nappe. La salinité chloruré - sodique est répartie en bandes étroites dans les cuvettes et en bordure des bourrelets de berge (Gascuel-Odoux et Boivin; 1994, Diba, 1995). Seule une prospection au conductivimètre électromagnétique (Rhoades et Corwin, 1981) permet d'en identifier la répartition.

Sur les *figures 3a à 3f*, on peut constater que les anions dominants (sulfate et chlorure) sont indifféremment associés aux cations sodium, calcium et magnésium (ces derniers étant presque toujours en proportions égales). Ceci suppose que les solutions salines aient été redistribuées dans le paysage. Barbiero *et al.* (1998) émettent l'hypothèse d'une redistribution éolienne au cours du recul du delta.

MINÉRALOGIE

La composition minéralogique de l'argile paraît constante dans les sols, indépendamment de l'unité géomorphologique sur laquelle ils se sont développés. Il y a environ 30 % de kaolinite, 60 % de smectites et interstratifiés, un peu d'Illite et de Chlorite. La CEC moyenne est de l'ordre de 25 meq pour 100 g de sol sec. La CEC par gramme d'argile varie essentiellement entre 35 et 60 meq pour 100 g d'argile *(figure 4)*. Ces valeurs semblent distribuées dans l'espace : ainsi, en *figure 5*, on constate sur un transect est - ouest en cuvette de Pontgary que la partie est de la cuvette présente des CEC de 40 à 60 meq / 100 g d'argile, tandis que la partie ouest présente une CEC de 40 meq / 100 g d'argile. Nous ne disposons pas d'éléments d'interprétation de ces répartitions.

Les relations entre teneurs en eau à un potentiel de l'eau donné (mesurées à la presse à membrane) et teneur en argile sont bonnes *(figure 6)*, meilleures que les relations potentiel de l'eau / CEC, ce qui paraît surprenant. Les écarts entre pH sur extrait aqueux et pH sur extrait KCl sont d'autant plus importants que le pH sur extrait aqueux est élevé *(figure 7)*. Tout ceci suggère la présence de minéraux à charge variable susceptibles d'induire des variations de CEC lorsque le pH varie.

Figure 3 - Relations entre les proportions des anions et cations majeurs sur extrait aqueux 1/5 de sol
Figure 3 - *Relations between major cations and anions content of 1/5 soil extract*

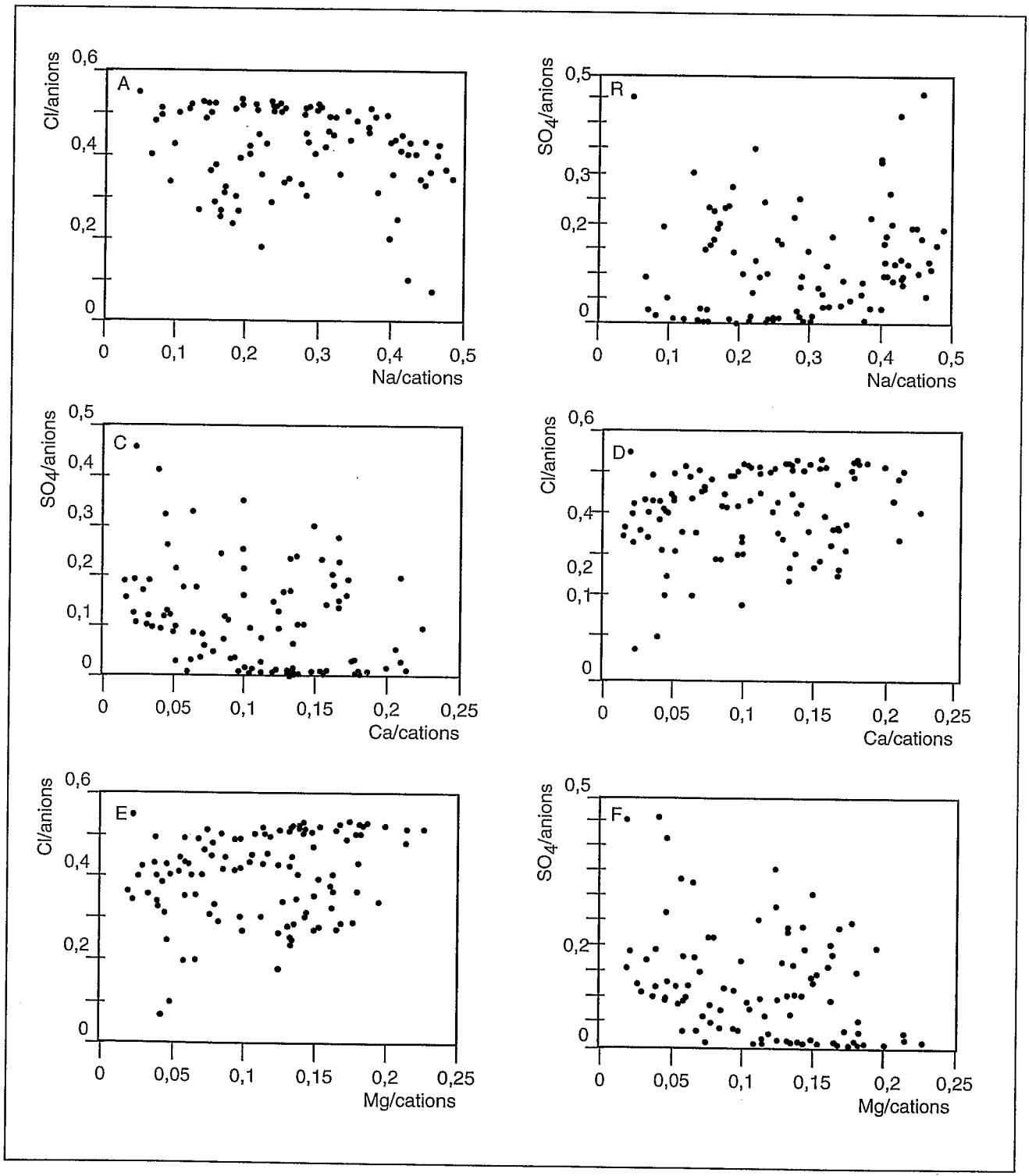


Figure 4 - Histogramme de fréquence de la CEC en meq par gramme d'argile pour un lot d'échantillons du secteur de référence.

***Figure 4** - Frequency histogram of CEC in meq per gram of clay, for a sub sample of the studied site.*

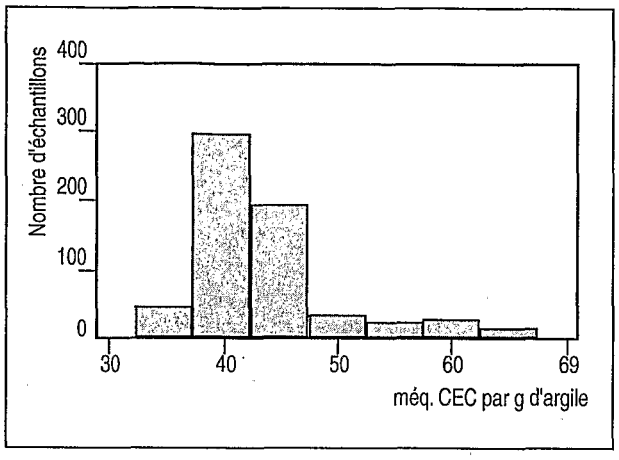
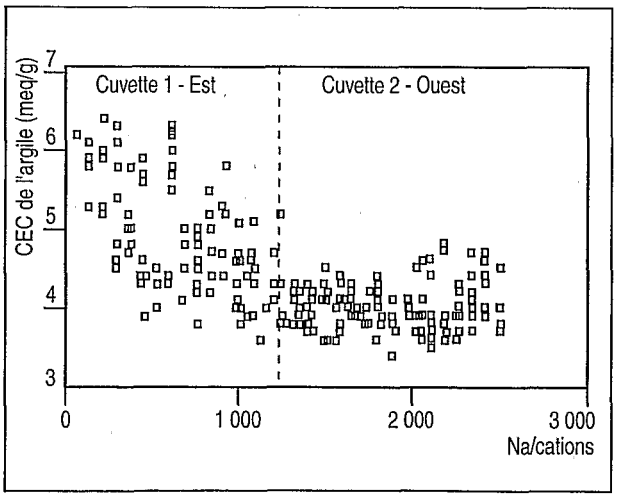


Figure 5 - Variation de la CEC par gramme d'argile sur un transect est - ouest à travers deux sous-cuvettes de la cuvette de Pongary.

***Figure 5** - Evolution of CEC in meq per gram of clay, from east to west across two basins in the Pongary site.*



AMÉNAGEMENTS

Ces sols sont aménagés en périmètres irrigués dont la superficie varie de 10 à 2000 hectares. Les infrastructures réalisées sont très variables. On distingue (i) les Périmètres Irrigués Villageois (PIV) et les périmètres privés assimilés, (ii) les périmètres intermédiaires (IT) et (iii) les grands aménagements. Les PIV sont de petits périmètres (10 à 50 hectares) réalisés très sommairement. Ils sont mal planés, mal endigués (débordements fréquents), et ne disposent pas de drains. Les IT ont une superficie de 50 à 200 hectares. Ils sont bien planés (du moins lors de la réalisation, l'entretien laissant parfois à désirer), protégés par une digue de ceinture, mais non drainés en général. Les grands aménagements disposent d'infrastructures complètes, y compris un réseau de drains hiérarchisé. Cependant, il s'agit de drains à ciel ouvert utilisés plutôt comme fossés de collature, et non entretenus : leur efficience est généralement très faible nulle.

La plupart des périmètres se situe sur des sols argileux (40 % et plus de teneur en argile), et 90 % des surfaces annuelles sont cultivées en riziculture. Il s'agit d'une culture par submersion : une lame d'eau de 10 à 15 cm est maintenue pendant environ 90 jours par cycle de riz, deux fois par an en cas de double riziculture.

QUALITÉ DE L'EAU

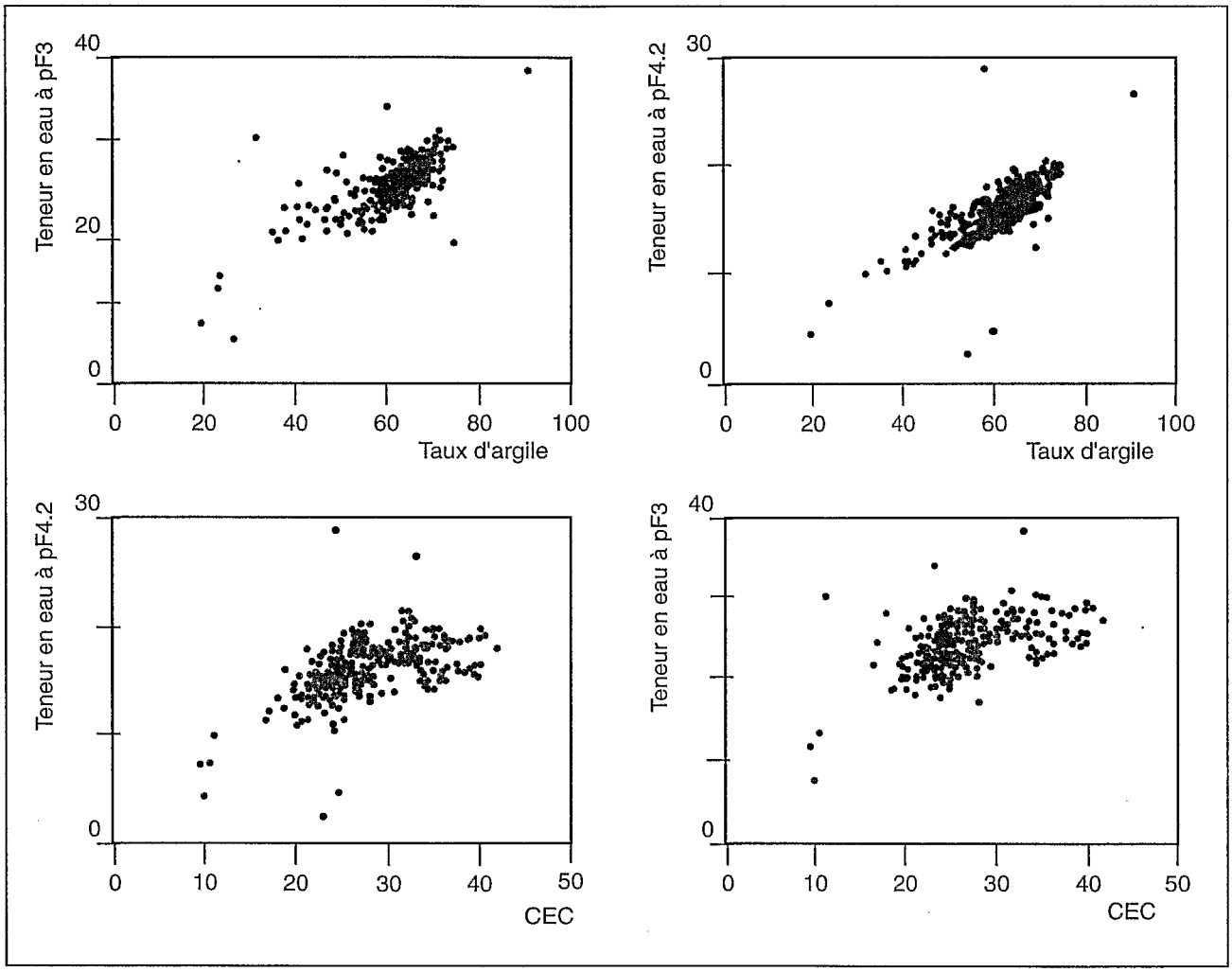
L'eau d'irrigation semble de qualité constante. Très peu minéralisée (58 µS/cm de conductivité électrique), de pH neutre, elle a un SAR inférieur à 1. Toutes les études d'aménagement l'ont classée comme excellente et sans danger pour l'irrigation. D'influence continentale, elle présente une alcalinité résiduelle calcite positive (Droubi, 1976). Sa concentration par évaporation conduit à une élévation du pH par accumulation résiduelle de carbonates, et à un SAR élevé par contrôle du calcium.

FONCTIONNEMENT NATUREL

Les sols non cultivés sont caractérisés par des coefficients de ruissellement très élevés, voisins de 100 % (Favre *et al*, 1997). Les eaux pluviales ont donc tendance à s'accumuler dans les dépressions, où elles assurent une recharge en eau du sol. Les mécanismes de gonflement - retrait produisent alors une fissuration, qui favorise à son tour l'infiltration des eaux de ruissellement et la recharge en eau du profil. Sous culture, les sols subissent toujours des cycles d'humectation-dessication et sont donc toujours fissurés à l'état sec, dès que leur teneur en argile excède 40 à 45 %.

La fissuration se développe nettement lorsque les premiers décimètres de sol sont fortement desséchés (vers 15 % de teneur en eau pour un sol vertique, soit au voisinage du point de flétrissement). A partir de 60 cm de profondeur environ, les sols argileux sont compacts et ne se dessèchent que très lentement, car la fissuration atteint rarement ces profondeurs, et les racines du riz ne prospectent pas cette zone.

Figure 6 - Relations entre teneurs en eau à pF 3 et 4.2, et teneur en argile ou CEC, pour les sols de la cuvette de Pongary.
Figure 6 *- Relation between water content (pF 3 and 4.2) and clay content or CEC, for the soils of the Pongary site.*



IMPACT DE L'IRRIGATION

Comparaisons sol nu / sol cultivé

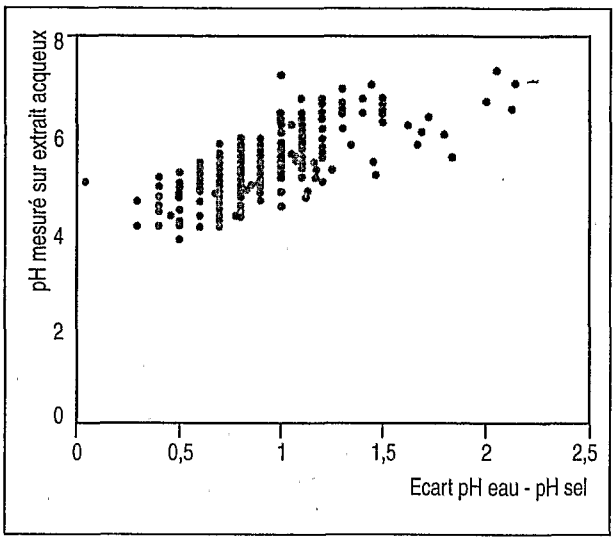
En règle générale, les aménagements ont moins de quinze années d'histoire en moyenne vallée. Ne disposant d'aucune étude préalable à l'aménagement, ni d'aucun suivi de la qualité des eaux et des sols, nous avons développé différentes méthodes pour tenter d'apprécier l'évolution du sol sous culture. Une base de données sur les périmètres aménagés (une centaine) a été constituée, et renseigne sur l'ancienneté du périmètre et son historique (type et nombre de cultures pratiquées). Les différentes unités géomorphologiques sont assez homogènes du point de vue de leurs caractéristiques pédologiques. Lorsque les périmètres n'occupent pas la totalité d'une unité, on a fait l'hypothèse que les sols nus environnants représentent l'état du sol avant culture. Sur d'importantes séries de mesures, on a comparé ainsi les sols des périmètres et les sols environnants : salinité, bases échangeables, pH, carbonates totaux.

Salinité

Selon de Poitevin (1993), la salinité globale des périmètres estimée au conductivimètre électromagnétique est de 7 à 10 fois plus élevée que celle des sols non aménagés. On constate effectivement des remontées salines dans presque tous les périmètres. Lorsque des drains existent, ils sont peu fonctionnels (Salvignol, 1993). Dans certains cas, il se forme en moins d'un an une croûte de sel, en particulier dans le cas de cultures maraîchères billonnées (Diba, 1995). La riziculture submergée

Figure 7 - Relation entre pH sur extrait aqueux et écart entre pH sur extrait aqueux et sur extrait KCl. Sols du secteur de référence Nianga-Podor.

***Figure 7** - Relation between pH measured on soil water extract, and the difference between pH measured on KCl soil extract and pH measured on water soil extract.*



est a priori la culture la moins sensible aux sels, mais le moindre assèchement (pour le désherbage par exemple, ou en cas de retard d'apport d'eau) peut lui être fatal.

Bases échangeables

Aucune tendance générale d'évolution du complexe d'échange n'a pu être identifiée (Charollais et Weber, 1994). Chaque périmètre présente une évolution particulière. Ceci résulte de la diversité des situations initiales d'un point de vue ESP et salinité (Boivin *et al*, 1995b). L'irrigation avec une eau de bonne qualité peut dans un premier temps améliorer le ESP du sol, si les remontées salines sont modérées. Mais en cas de processus d'alcalinisation (ci-après), le ESP va à nouveau croître, selon l'ancienneté de mise en culture (compte tenu du fait que pratiquement aucun sol n'est drainé) et la perméabilité du sol. Dans le cas des bases échangeables, nous avons donc provisoirement conclu qu'elles ne pouvaient pas être un bon indicateur de comparaison sols nus / sols cultivés. Remarquons également que pour les sols riches en sels solubles, et contenant à la fois des chlorures et des sulfates, nous ne disposons pas de méthode efficace pour différencier les bases échangeables des sels solubles.

pH du sol

Alors que le pH des sols nus est acide en moyenne *(figure 7)*, il devient neutre à alcalin dans la plupart des rizières (Schiess, 1995). En interculture, il est neutre, mais en fin de cycle il est fréquemment en équilibre avec la calcite (8,4 environ) ; des valeurs extrêmes de 9 ont été rencontrées. Ces résultats ne permettent pas de conclure quant aux processus en cours.

Carbonates

Les sols non cultivés contiennent généralement peu de carbonates sur le premier mètre de sol. Ces derniers sont apportés par l'eau d'irrigation, et en cas de faible lessivage sont susceptibles de s'accumuler dans le profil de sol. Schiess (1995) montre qu'une titration d'un extrait de sol au 1/50e (agitation sous azote) permet de mesurer les carbonates totaux dans la plupart des échantillons. On montre alors que les sols sont d'autant plus enrichis en carbonates que (i) le nombre de cycles culturaux pratiqués est élevé, (ii) le sol est peu perméable, (iii) l'aménagement n'est pas drainé et ne permet pas l'évacuation de l'eau de surface.

On conclut que la quantité de carbonates accumulés peut être un bon indicateur du régime hydrique sous culture (Boivin *et al*, 1999) : en cas de faible lessivage, une accumulation résiduelle se produit. Elle est quantitativement liée au régime hydrique.

Bilan hydrique et salin sous culture

Le bilan hydrique et salin de rizières au cours du cycle cultural a été établi, pour deux types de sols et deux aménagements différents. Les entrées et sorties d'eau (cas d'un périmètre drainé), les variations du niveau piézométrique, l'ETR et l'infiltration ont été mesurées. La composition chimique des eaux a été analysée (bougies poreuses pour la solution du sol, prélèvements de la nappe, des eaux d'irrigation et de drainage).

Dans tous les cas, l'infiltration verticale, et donc le lessivage, se sont montrés négligeables. Soit en raison de la très faible perméabilité du sol, soit en raison de la remontée de la nappe et de son faible écoulement.

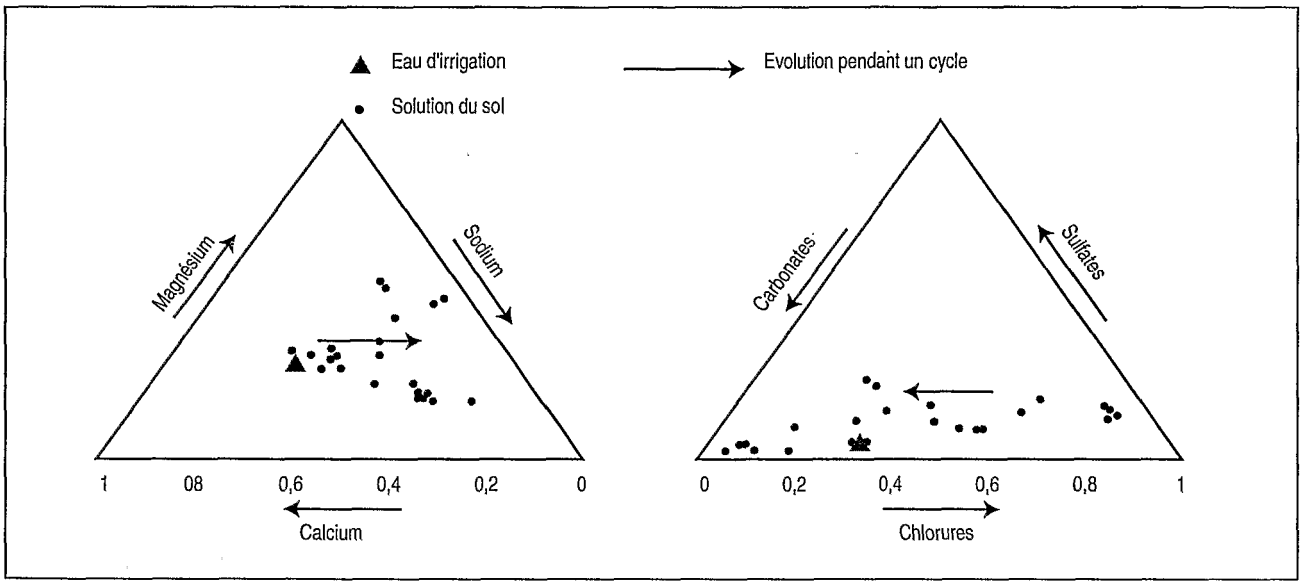
La solution du sol *(figure 8)* évolue depuis une salinité chlorurée sodique et sulfatée calcique vers une salinité carbonatée sodique en fin de culture. La conductivité électrique et le pH augmentent, ce dernier atteint une valeur de 8.4 pour un sol initialement à pH 6. Au cycle cultural suivant, la solution du sol semble avoir retrouvé son état initial et la même évolution a lieu.

DISCUSSION

Dans les périmètres irrigués de la vallée du Sénégal les remontées de sels marins fossiles posent de réels problèmes de toxicité. Cependant, ils peuvent être relativement bien contrôlés par une bonne maîtrise de la lame d'eau en riziculture. Le cas du maraîchage est plus délicat. Il semble néanmoins

Figure 8 - Evolution de la solution du sol, prélevée par bougies poreuses, au cours d'une campagne de riziculture. Hivernage 1994, périmètre de Donaye IT1.

Figure 8 *- Chemical evolution of soil solution during a crop cycle (hot season 1994). Porous cup sampling.*



que ces remontées salines surviennent très rapidement (après une à deux cultures), puis stagnent, comme si le stock de sel disponible en profondeur était limité. Un drainage à ciel ouvert correctement pratiqué devrait donc permettre de contrôler cette situation.

La question du devenir des sols est donc essentiellement liée à la présence des carbonates et à la compréhension de l'évolution des constituants minéraux du sol irrigué. Dans la plupart des cas sous riziculture, tout se passe comme si le périmètre était un récipient fermé dans lequel la totalité de l'eau s'évapore. Les évolutions cycliques de la composition de la solution du sol peuvent avoir plusieurs causes : mouvements descendants puis ascendants des sels (infiltration et évaporation), variation de la CEC des minéraux à charge variable, variations de la CEC dues à la réduction du fer, interventions de phénomènes géochimiques comme la précipitation de silicates magnésiens.

L'accumulation de carbonates est donc un indicateur du régime hydrique et non d'un état d'alcalinisation (Boivin *et al*, 1999). Pour préciser les tendances évolutives à long terme, il convient de faire la part des phénomènes que nous venons d'évoquer.

A l'échelle des petits périmètres, le fonctionnement est très différencié selon qu'il s'agit d'une riziculture sur sol de cuvette (aucun lessivage), d'une riziculture sur sol de bourrelet (fort lessivage et drainage de la nappe par le fleuve) ou de maraîchage sur sol de bourrelet (pas d'infiltration jusqu'à la nappe, accumulation des sels à faible profondeur). Les recommandations en terme d'assolements sont donc plus complexe qu'il n'avait été envisagé. Ainsi, des cycles de riziculture sur sols de bourrelets sont recommandables de temps à autre. En revanche, il est encore difficile de dégager l'impact relatif des systèmes simple ou double riziculture.

A l'échelle d'un ensemble de périmètres, il apparaît que les mouvements de la nappe jouent un rôle très important. Si une trop grande surface est cultivée, le drainage par la nappe n'est plus suffisant, et l'accumulation de sels se produit. Enfin, faute d'un rejet des eaux usées vers la mer, on assiste à une échelle encore plus large à de vastes mouvements de sels dans les paysages (Séguis et Dubée, 1994), d'une zone aménagée vers une autre.

CONCLUSION

Pour tenter de répondre à la question de l'impact des cultures irriguées sur la ressource en sols, et en l'absence de toute autre étude, nous avons partiellement reconstitué l'évolution des sols sous culture par une comparaison sol nu / sol cultivé. Nous avons précisé les bilans hydriques et les évolutions géochimiques des solutions par des analyses détaillées du fonctionnement. Les résultats acquis font craindre que les sols ne soient partiellement engagés sur une voie saline alcaline. Mais les phénomènes sont suffisamment lents, et rendus complexes par le fonctionnement géochimique particulier des sols argileux rizicultivés, pour que ce résultat reste sujet à questions.

Si les bilans hydriques peuvent être établis et modélisés à certaines échelles (Diaw, 1996), l'effet cumulatif des périmètres dans le paysage pose des problèmes de prévision. Les interactions, les problèmes de transfert d'échelle, limitent les possibilités d'une analyse à l'aide de modèles hydrodynamiques. Il reste également à comprendre la nature exacte des évolutions pédogénétiques en cours, ce qui suppose d'étudier les constituants minéraux du sol et leurs transformations, en complément de la dynamique des sels solubles.

BIBLIOGRAPHIE

Barbiero, L., Boivin, P. and Hammecker, C., 1998 - Aeolian origin of some saline soil stripes in the Senegal middle valley. Morphological and geochemical considerations. Proceedings of the 16e AISS symposium, Montpellier, Août 1998

Boivin, P., Dia, I., Lericollais, A., Poussin, J. C., Santoir, C. et Seck, S.M., 1995a - "Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal", Ed. ORSTOM Paris, collection Colloques et Séminaires, 565 p.

Boivin, P., D. Brunet, C. Gascuel-Odoux, P. Zante et J.P. Ndiaye, 1995b - Les sols argileux de la région de Nianga-Podor : répartition, caractéristiques, aptitudes et risques de dégradation sous irrigation, in "Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal", Ed. ORSTOM Paris, collection Colloques et Séminaires, 565 p.

Boivin, P., M.C.S. Wopereis, S. Schiess, J.L. Maeght, 1999 - Comparing indicators of soil alkalinization hazard in irrigation schemes in northern Senegal, à paraître dans SSSAJ

Charollais, M. et Weber, V., 1994 - Evolution des sols irrigués dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal. Sodisation et alcalinisation. Mémoire de fin d'études EPFL, Département de Génie Rural, IATE Pédologie, 46 pages et annexes.

Diaw, E.B., 1996 - Modélisation du transfert d'eau en milieux poreux non saturés : Application à l'étude de la recharge des nappes d'eaux souterraines en région soudano-sahélienne. Thèse de l'Université Louis Pasteur, Institut de Mécanique des fluides, Strasbourg, France, 239 pages + annexes.

Diba, M., 1995 - Analyse comparée de deux méthodes d'évaluation de la répartition spatiale de la salinité. Mémoire de fin d'études de l'Institut des Sciences de la Terre, Université Cheikh Anta Diop, Dakar. Multigr. ORSTOM Dakar, 50 pages et annexes.

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.

De Luca, A., 1996 - Caractérisation Physique des sols alluviaux de la moyenne vallée du fleuve Sénégal, Mémoire de diplôme EPFL, 34 pages et annexes.

FAO / SEDAGRI, 1973 - Etude hydro-agricole du bassin du fleuve Sénégal. Etude pédologique, Multigr. SEDAGRI, 251 p.

Favre, F. , Boivin, P. and Wopereis, M., 1997, Water Movement and soil swelling in a dry, cracked vertisol. Geoderma 78 (1997) 113-123.

Gascuel-Odoux, C. and Boivin, P., 1994 - Variability of variograms and spatial estimates due to soil sampling : a case study, Geoderma, 62, 1-3, pp 165-183

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.

Maymard, J., 1960 - Etudes pédologiques dans la vallée alluviale du Sénégal. MAS, Div. agronomique, bull. 122, 38p. multigr.

Maymard 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.

Poitevin de, F., 1993 - Etude d'impact des techniques culturales sur les aménagements hydro-agricoles dans la région de Podor (Sénégal), mémoire de quatrième année de l'ESAP, multigr. ORSTOM Dakar, 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

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.

Schiess, S., 1995 - Etude de l'évolution du stock de carbonates dans l'horizon superficiel des sols irrigués de la moyenne vallée du fleuve Sénégal. Mémoire de fin d'études d'Ingénieur Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. 43 p. et annexes.

Seguis, L., et Dubée, G., 1994 - Cuvette de Nianga. Rapport hydrologique, hivernage 1992 et contre-saison 1993. Multigraphié ORSTOM Dakar, 30 p. et annexes.