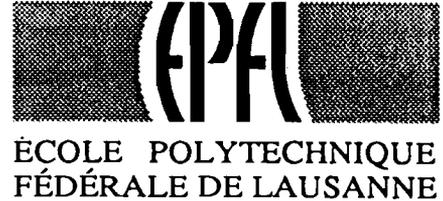

DÉPARTEMENT DE GÉNIE RURAL
IATE-Pédologie



Travail Pratique de diplôme

1994

Evolution des sols irrigués
dans la
Moyenne vallée du fleuve Sénégal

Sodisation/Alcalinisation

Myriam Charollais
Véronique Weber

MM. Pascal BOIVIN, ORSTOM
Jean-Louis DUPREY, ORSTOM
Philippe de PURY, EPFL
Jean-Claude VEDY, professeur EPFL

Avertissement

Le présent rapport n'est que la phase terminale d'un travail de diplôme dont le déroulement fut quelque peu chaotique. Nous tenons à faire part au lecteur des circonstances dans lesquelles il a débuté, car, bien que faisant partie intégrante du travail de diplôme, elles n'apparaissent pas dans ce mémoire.

On comprendra dans ce préambule les raisons qui ont conduit deux candidates, Myriam Charollais et Véronique Weber, à effectuer le même travail et le même rapport.

Originellement, le sujet de notre travail pratique de diplôme était l'érosion des sols au Burundi. Soigneusement préparé, le travail devait nous amener à élaborer un plan d'aménagement visant à retarder, voire empêcher la dégradation des sols cultivés sur pente dans la région de Gitega. Le sort en avait décidé autrement, le coup d'état du 22 octobre 1993 ayant éclaté au Burundi deux jours avant la date prévue de notre départ. La déception fit bientôt place à l'impatience et à l'inquiétude de voir nous échapper la possibilité d'effectuer le diplôme pratique cette année. Désirant partir malgré tout pour l'Afrique, nous nous sommes tournées vers toutes les possibilités pouvant nous permettre d'y effectuer le travail de diplôme. Grande fut donc notre joie de la réponse rapide d'ENDA-Tiers-Monde (ONG) à Dakar, qui se proposait de nous recevoir dans deux projets, l'un concernant la gestion des déchets dans la région de Dakar, l'autre la salinité des sols en Casamance.

C'est donc avec un moral revenu au beau fixe que nous avons pris le premier avion pour le Sénégal... La déconvenue n'en fut que plus grande... Sur place, seul le secrétaire exécutif de l'ONG était au courant de notre arrivée. Le travail était cependant supposé se dérouler dans des équipes indépendantes, dont les responsables furent surpris à des degrés divers des exigences requises pour un diplôme de l'EPFL... Il s'est finalement avéré impossible de faire concorder ces dernières au travail proposé.

Deux semaines au Sénégal s'étaient déjà écoulées...

En dernier recours, nous allâmes frapper à la porte du département de Pédologie de l'ORSTOM à Dakar. Son responsable, Monsieur Pascal Boivin, nous offrit alors la possibilité d'effectuer le travail présenté ici. En revanche, le départ pour le terrain ayant été fixé pour le lendemain de sa réponse positive, aucune recherche bibliographique n'a pu être effectuée avant la campagne d'échantillonnage. C'est ainsi que certains choix stratégiques ont plus été le fait de l'intuition que d'une connaissance exhaustive de la problématique.

Quant au résultat, le lecteur sera seul juge...

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Monsieur Pascal Boivin, chef du département de Pédologie de l'ORSTOM à Dakar, pour son accueil, sa réponse rapide à notre requête et son appui dans notre travail. Nous lui devons d'avoir pu effectuer le travail pratique de diplôme cette année.

Les conseils éclairés, l'aide et la disponibilité de Monsieur Jean-Louis Duprey, chef du laboratoire de chimie de l'ORSTOM à Dakar, ainsi que le travail de Monsieur Elie Joseph Diatta, laborant, nous ont permis de mener à bien nos analyses en un temps record. Nous leur exprimons toute notre gratitude.

Grâce à la confiance qu'il nous a accordée, Monsieur le professeur Jean-Claude Védy nous a donné la possibilité de partir pour l'Afrique; nous lui en sommes infiniment reconnaissantes.

Durant les débuts difficiles de notre travail, Monsieur Philippe de Pury, collaborateur scientifique à l'EPFL, nous a généreusement consacré temps et énergie; sur le terrain, ses encouragements et sa compréhension ont été d'une aide précieuse. Nous lui adressons des remerciements particuliers.

Enfin, nous tenons à exprimer notre gratitude à tous ceux qui, au Sénégal, nous ont permis de réaliser ce travail dans de bonnes conditions.

Introduction

L'évolution des sols n'est qu'un aspect des profonds bouleversements, économiques, sociaux, écologiques provoqués par l'avènement de la culture irriguée dans la Moyenne vallée du fleuve Sénégal. Parmi des programmes de recherche couvrant certains de ces domaines, l'ORSTOM consacre un volet à la connaissance des sols de la région et de leur comportement sous irrigation (BOIVIN *et al.*, 1993).

Dans les régions arides et semi-arides, les sols des périmètres irrigués peuvent notamment subir deux formes de dégradation: salinisation (par accumulation de sels solubles, essentiellement du NaCl), et sodisation/alcalinisation (par fixation d'ions sodium sur les argiles associée à une augmentation du pH) (BERTRAND *et al.*, 1993). Bien que ces questions aient été soulevées dès les premiers aménagements, aucune précaution n'a été prise pour les éviter dans la Moyenne vallée (BOIVIN *et al.*, 1993). Le second phénomène, moins bien connu, est en revanche très lourd de conséquences, pouvant mener à une dégradation irréversible des sols.

La présente étude se propose de dresser un premier bilan régional de l'évolution potentiellement sodique et/ou alcaline des sols des périmètres irrigués. La zone d'étude se situe autour de Podor, sur la rive sénégalaise de la Moyenne vallée (cf. cartes en page 4).

Le travail comporte trois parties, dont la première consiste en une évaluation théorique des risques d'alcalinisation des sols dans le contexte de la zone d'étude. Dans un second temps, nous exposerons et justifierons les choix méthodologiques pour l'approche de la problématique. Finalement, les résultats de notre travail et leur interprétation apporteront des éléments de réflexion par rapport au problème posé. Ceux-ci nous conduiront à énoncer quelques propositions de recherche qui contribueront à une meilleure compréhension des phénomènes observés.

Première partie

1. Irrigation en climat aride

1.1 Généralités

Ce chapitre a pour objet l'exposé des caractères spécifiques de l'irrigation sous climat aride et l'évolution attendue d'un sol soumis à ces conditions.

Nous définirons donc tout d'abord brièvement les particularités de l'irrigation par rapport à la culture pluviale, puis l'effet d'un climat aride sur le comportement de l'eau dans le sol. Compte tenu de ces deux aspects, une présentation théorique de l'évolution du sol irrigué en situation de déficit hydrique formera le corps du chapitre.

1.1.1 L'eau

Le passage d'une culture pluviale à une culture irriguée implique un changement radical de la composition de l'eau arrivant sur le sol. Si l'on peut considérer l'eau de pluie comme de l'eau "pure", l'eau d'irrigation, d'origine continentale, est quant à elle chargée de substances diverses qui interagissent avec les paramètres du sol.

Le volume des apports est également considérablement accru, avec pour effet une modification des conditions hydrodynamiques.

On peut donc s'attendre à une transformation plus ou moins rapide du sol irrigué, avec éventuellement l'atteinte d'un nouvel état d'équilibre.

1.1.2 Le climat

Le contexte climatique dans lequel se place la culture irriguée en climat aride conditionne également l'évolution du sol. Le déficit hydrique qui le caractérise provoque en principe une concentration rapide de l'eau d'apport avec pour conséquence des modifications de ses paramètres physico-chimiques.

1.2 Evolution théorique d'un sol irrigué

Soumis à la double action d'une grande quantité d'eau d'origine continentale et d'un bilan hydrique déficitaire, le sol va donc évoluer selon deux voies, respectivement la voie saline neutre et la voie carbonatée, en fonction notamment des paramètres physico-chimiques de l'eau d'irrigation. Seule la seconde voie fait l'objet de cette étude. Dans un premier temps, les bases chimiques nécessaires à sa compréhension seront évoquées, ainsi que les caractéristiques de l'eau se concentrant par évaporation. Les conséquences sur le sol des transformations des paramètres de l'eau feront l'objet du dernier paragraphe de ce chapitre.

Remarque importante:

On peut s'étonner de voir confondus au cours de ce chapitre les caractères propres aux eaux d'irrigation et à la solution du sol. On admet en effet que la solution d'un sol irrigué dans des conditions définies, par exemple avec des doses d'irrigation plus ou moins fixes, atteint rapidement un état d'équilibre avec l'eau d'apport (VALLES *et al.*, 1989). Toutefois, afin d'évaluer le sens et surtout la rapidité de l'évolution de la solution du sol mis en culture, il conviendra de ne pas négliger la contribution des espèces chimiques présentes sous forme dissoute ou précipitée dans la solution du sol avant même le début de l'irrigation.

1.2.1 Chimie des solutions en concentration

a) L'alcalinité

L'alcalinité peut être définie comme la capacité d'un système aqueux à neutraliser l'acidité (RIBOLZI *et al.*, 1993).

Dans la plupart des sols, cette alcalinité est essentiellement constituée par des espèces carbonatées (VALLES *et al.*, 1989; VAN BEEK, VAN BREEMEN, 1973).

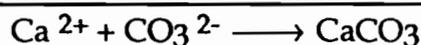
On peut donc écrire:

$$\text{Alc} = [\text{HCO}_3^-] + [\text{NaHCO}_3] + [\text{KHCO}_3] + [\text{MgHCO}_3^+] + [\text{CaHCO}_3^+] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + 2[\text{NaCO}_3^-] + 2[\text{KCO}_3^-] + 2[\text{MgCO}_3] + 2[\text{CaCO}_3]$$

où les [] représentent les molalités (VALLES *et al.*, 1989).

b) L'alcalinité résiduelle

Lorsque, par évaporation, la concentration de la solution atteint la saturation avec la calcite, premier minéral à précipiter dans les eaux naturelles, ce minéral précipite suivant la réaction:



Si la concentration en espèces carbonatées, c'est-à-dire l'alcalinité de la solution, est supérieure aux équivalents de calcium, au fur et à mesure de la concentration des eaux, l'alcalinité augmente alors que la concentration en calcium décroît.

C'est ainsi que l'on a défini le concept de l'alcalinité résiduelle calcite:

$$\text{Alc. résid. calcite} = \text{Alcalinité} - 2\text{Ca} \quad (\text{en [meq./l]}) \quad (\text{VALLES et al., 1989})$$

2 cas peuvent donc survenir lors de la concentration d'une eau au-delà de la saturation en calcite :

- si l'alcalinité résiduelle est positive, la teneur en carbonates de la solution continue à croître alors que la teneur en calcium diminuera. Le sodium qui ne participe à aucune précipitation dans les domaines d'application agricoles, continue à se concentrer et le SAR s'élève (VALLES et al., 1989).

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}}{\sqrt{\frac{\text{Ca} + \text{Mg}}{2}}}$$

avec Na, Ca et Mg exprimés en [meq/l]

C'est la voie carbonatée.

- si l'alcalinité résiduelle est négative, l'alcalinité de la solution décroît et la teneur en calcium augmente lors de la concentration. Le SAR demeure dans des normes acceptables et le sodium est moins gênant que dans le cas précédent (VALLES et al., 1989).

On comprend donc que le mélange d'une eau d'irrigation à propriétés alcalisantes avec des sels non carbonatés de calcium (gypse principalement), augmentant la molalité de cet élément par rapport aux carbonates, aura un effet tampon qui retardera l'évolution alcaline prévue. L'effet prendra toutefois fin lorsque le stock de calcium sera épuisé.

c) L'alcalinité résiduelle généralisée :

Le concept d'alcalinité résiduelle a été étendu à la précipitation successive de plusieurs minéraux, on parle alors d'alcalinité résiduelle généralisée.

Ainsi, lorsque le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) précipite à la suite de la calcite, l'alcalinité résiduelle calcite + gypse s'écrit:

$$\text{Alc. rés. calcite + gypse} = \text{Alc. rés. calcite} - 2\text{SO}_4 \quad (\text{VALLES et al., 1989})$$

Le même raisonnement que précédemment peut être fait lorsque l'on atteint la concentration de saturation de l'eau en gypse. Si l'alcalinité résiduelle généralisée est positive, la concentration va mener à un accroissement du SAR, si elle est négative, la teneur relative de Ca augmentera malgré la précipitation du gypse et de la calcite (VALLES et al., 1989).

L'alcalinité résiduelle généralisée permet donc de prévoir le sens de variation des molalités dans les solutions au-delà de la précipitation de la calcite. Cependant, elle ne peut être utilisée après précipitation du gypse, du fait de l'intervention massive de phénomènes d'échanges cationiques (VALLES, 1985).

1.2.2 Evolution du sol irrigué en conditions arides

Dans le cas d'une alcalinité résiduelle positive, le complexe adsorbant ne reste pas sans action sur l'augmentation du SAR. Par libération de calcium, il tend à diminuer l'alcalinité résiduelle qu'il pourra limiter, voire inverser suivant sa charge en calcium. Les réserves du sol en calcium étant cependant limitées, cette résistance n'est que temporaire. A terme, la solution du sol s'enrichira tout de même en sodium et le SAR augmentera.

Or il existe une relation d'équilibre entre la charge en sodium de la solution et la fixation du sodium sur les argiles:

$$\text{ESP} = f(\text{SAR})$$

où ESP = pourcentage de sodium sur le complexe d'échange.

Il en résulte que les argiles se satureront en sodium (sodisation) et conféreront aux sols des propriétés défavorables. Les eaux imposeront aux sols une évolution vers la voie alcaline: le pH des sols augmentera sous l'influence des carbonates qui s'accumulent, pour atteindre des valeurs supérieures à 8.

Sous l'effet du sodium échangeable et du pH alcalin, dès le début de l'humectation des sols, les argiles défloculeront, avec des conséquences agronomiques désastreuses (BERTRAND et al., 1993).

2. Irrigation dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal

2.1 Généralités

Ce chapitre vise à situer la culture irriguée dans son contexte environnemental et humain.

Les deux premiers paragraphes seront une application des concepts développés au chapitre précédent aux conditions de la région de Podor. En effet, on peut grâce à quelques données chiffrées prévoir le sens théorique de l'évolution des sols irrigués.

Cependant, certains facteurs interviennent encore, qui affectent le déroulement des processus. Il s'agit principalement du type de sol concerné, des cultures pratiquées sous irrigation ainsi que des techniques de gestion de l'eau. Chacun de ces aspects sera appliqué à la région d'étude et son impact sur l'évolution des sols estimé.

Enfin, il convient de garder à l'esprit le contexte humain dans lequel la culture irriguée intervient. On serait tenté d'accorder une place capitale à ce mode de production dans l'économie locale, alors qu'elle ne fait que s'inscrire dans un ensemble de stratégies économiques dont nous parlerons au dernier paragraphe de ce chapitre.

2.2 Le climat

La région de Podor est soumise à un climat de type sahélien dont les principales contraintes sont la grande saison sèche et la faible pluviométrie. De 1931 à 1960, on a enregistré à la station de Podor une moyenne annuelle de 335 mm de pluie. Elle a chuté à 280 mm au cours des années 1961 à 1974, puis à 200 mm entre 1975 et 1987 (HECQ, DUGAUQUIER, 1990).

La température moyenne varie d'environ 23°C en janvier à 32°C en mai-juin et le bilan hydrique est largement déficitaire (SAED, 1989).

2.3 Qualité de l'eau d'irrigation de la région

Il est cherché dans ce paragraphe à déterminer la qualité de l'eau utilisée pour l'irrigation des périmètres de la zone d'études. Les concepts élaborés au chapitre précédent seront ainsi appliqués à des analyses d'eau prélevée dans les cours d'eau principaux, ce qui permettra une première appréciation des risques inhérents à son utilisation. Néanmoins, afin de tenir compte des conditions climatiques arides, il s'agira également de suivre la qualité de l'eau au cours de sa concentration dans le sol. Enfin, il sera tenté de simuler une interaction partielle des caractères physico-chimiques du sol avec l'eau. Cette démarche passe par l'utilisation d'un logiciel de simulation de concentration de l'eau. Il s'agit ici du logiciel SOPREX, élaboré par M. Rieu (ORSTOM) et qui permet, à partir des concentrations de K, Na, Ca, Mg, Cl et SO₄ de l'eau "brute", de déterminer la composition en diverses espèces en solution et la précipitation éventuelle de carbonates et de gypse. Le SAR, le pH, la conductivité électrique et les diverses formes d'alcalinité sont également calculées.

2.3.1 Méthodologie

a) Traitement et comparaison des données brutes d'eau d'irrigation.

Il s'agit d'analyses ponctuelles de prélèvements effectués sur le fleuve Sénégal à la hauteur de Richard-Toll (environ 100 km en aval de Podor) et sur le Doué à Guia (cf. carte page 4), portant sur les concentrations en éléments solubles suivants : K, Na, Ca, Mg, Cl et SO₄.

Remarques :

- Aucune mesure sur le Gayo, bras du Fleuve servant à irriguer des périmètres du village de Donaye, n'est disponible. Cependant, la proximité des périmètres de l'embranchement du Gayo avec le Fleuve laisse supposer une similitude avec la qualité de ce dernier.
- Le pH donné dans les tableaux est celui calculé à l'aide du logiciel et non le pH réellement mesuré, légèrement plus faible.

b) Choix d'une eau pour les simulations

Afin de respecter la cohérence des paramètres de l'eau, il a paru plus judicieux de tester une eau "réelle", plutôt qu'une eau "synthétique" moyennant les valeurs observées.

La dispersion des valeurs, relativement importante, a conduit à choisir une eau voisine des moyennes pour le Doué, les prélèvements effectués sur ce cours d'eau étant les plus proches des périmètres nous intéressant. Le choix s'est finalement porté sur l'eau prélevée dans le Doué, le 16.2.1993.

Concentration sans interaction avec le sol

Lors d'une campagne, l'eau est apportée à intervalles réguliers (tour d'eau), et se concentre jusqu'à un facteur d'environ 3 entre les irrigations. A la fin de la campagne, le sol se dessèche et la teneur en eau est réduite d'un facteur 6.

Le choix porte sur la simulation d'une campagne, durant laquelle 20.000 m³ d'eau/ha sont amenés. Le facteur de concentration global est évalué à 18, et aucune interaction avec les espèces chimiques éventuellement présentes dans le sol n'est prise en considération. Il n'a pas paru nécessaire de simuler plusieurs campagnes, le sens et un ordre de grandeur de l'importance des phénomènes étant seuls à nous intéresser.

Concentration et mélange intégral et immédiat de l'eau d'irrigation avec le gypse potentiellement présent dans le sol

Les échanges avec la solution du sol et les substances précipitées sont non négligeables lors d'une irrigation. Ils sont toutefois difficilement abordables et leur quantification exacte sort du cadre de cette étude. En revanche, il a été cherché à obtenir un ordre de grandeur de l'action du gypse du sol sur les propriétés alcalisantes de l'eau d'irrigation.

Il a donc été supposé ici que le mélange avec le gypse du sol est intégral et immédiat, et qu'aucun phénomène d'échange avec le complexe adsorbant (notamment Ca contre Na) n'a eu lieu.

Quant aux quantités dissoutes, elles proviennent d'analyses d'échantillons prélevés dans la région et connus pour leur teneur élevée en ce sel (15 meq/100g de Ca et 15 meq/100g de SO₄). La profondeur d'humectation est par ailleurs fixée à 1m de sol.

Le même facteur de concentration que ci-dessus est appliqué.

2.3.2 Traitement des données

a) Traitement des données brutes

tableau 1-Eau du Fleuve Sénégal

	unité	11-12 février 91	16-20 avril 91	12 juillet 90	15 août 90	25-27 nov. 91	moyenne
pH	-	8.19	7.98	8.27	7.83	7.92	8.04
SAR	-	0.52	0.41	0.88	0.38	0.28	0.49
Conductivité	dS/m	0.11	0.09	0.15	0.06	0.06	0.09
Alcalinité	meq/l	0.82	0.50	1.00	0.35	0.43	0.62
ARC	meq/l	0.42	0.17	0.51	0.11	0.21	0.28
ARC+G	meq/l	0.50	0.21	0.63	0.15	0.23	0.34
CaCO ₃ précip.	mol/l	0	0	0	0	0	0
CaSO ₄ précip.	mol/l	0	0	0	0	0	0

tableau 2-Eau du Doué

	unité	16 février 1993	29 juin 1993	19 août 1992	moyenne
pH	-	8.01	7.75	7.92	7.89
SAR	-	0.18	0.19	0.67	0.35
Conductivité	dS/m	0.08	0.06	0.10	0.08
Alcalinité	meq/l	0.53	0.29	0.43	0.42
ARC	meq/l	0.14	0.05	0.13	0.11
ARC+G	meq/l	0.15	0.07	0.23	0.15
CaCO ₃ précip.	mol/l	0	0	0	0
CaSO ₄ précip.	mol/l	0	0	0	0

D'après le diagramme de Richards (*RICHARDS,1954*), cette eau est classée C1-S1, c'est-à-dire présentant peu de danger de salinisation et de sodisation.

Cette méthode de classification est néanmoins statique et ne tient pas compte de l'évolution de la composition chimique des eaux lorsque celles-ci se concentrent par évaporation. Or, certaines, aux très peu salines au départ peuvent provoquer une alcalinisation des sols à la suite de leur concentration (*VALLES et al., 1989*).

En appliquant les concepts de l'alcalinité résiduelle, on peut en revanche estimer que l'eau utilisée dans les périmètres n'est pas exempte de risque pour le sol, les échantillons présentant tous une alcalinité résiduelle calcite et une alcalinité résiduelle calcite + gypse positives.

Un sol irrigué par une telle eau est donc susceptible d'alcalinisation dès le début de la précipitation de la calcite lors de la concentration de l'eau.

b) Simulation de concentration

Concentration sans interaction avec le sol

tableau 3-Concentration de l'eau du Doué, 16.2.93

	unité	eau brute	concentrée 18 fois
pH	-	8.01	8.62
SAR	-	0.18	1.28
Conductivité	dS/m	0.08	0.59
Alcalinité	meq/l	0.53	2.65
ARC	meq/l	0.14	2.33
ARC+G	meq/l	0.15	2.51
CaCO ₃ précipité	mol/l	0	3.44E-03
CaSO ₄ précipité	mol/l	0	0

La précipitation de la calcite fait s'élever le SAR d'un facteur 7, l'eau étant alcalisante au départ. Le pH, déjà alcalin, s'élève. L'évolution prévue en a) est donc confirmée.

Concentration avec mélange avec le gypse du sol

tableau 4-Concentration de l'eau du Doué, 16.2.93, mélangée à 15meq/100g de gypse

	unité	initial avec mélange de 15meq/100g gypse	concentré 18 fois
pH	-	7.85	7.81
SAR	-	0.04	0.60
Conductivité	dS/m	2.01	2.59
Alcalinité	meq/l	0.44	0.42
ARC	meq/l	-19.91	-20.89
ARC+G	meq/l	0.15	2.69
CaCO ₃ précipité	mol/l	4.47E-05	2.70E-03
CaSO ₄ précipité	mol/l	2.27E-02	6.63E-01

L'apport de calcium par le gypse inverse le signe de l'alcalinité résiduelle calcite tandis que l'alcalinité résiduelle calcite + gypse reste inchangée. La précipitation de la calcite ne va donc dans un premier temps pas provoquer de diminution de la concentration de calcium dans la solution. En revanche, au fur et à mesure de la précipitation conjointe du gypse, le calcium va à nouveau diminuer et le SAR s'accroître.

L'augmentation du SAR lors d'une campagne rizicole est réduite à un facteur 2. Le pH va même diminuer par rapport au pH initial, grâce à la baisse de l'alcalinité. Il est à prévoir toutefois qu'après quelques campagnes, l'évolution, bien que retardée, suivra la même tendance que dans un sol non tamponné par le gypse.

2.3.3 Résumé

Le risque d'alcalinisation par irrigation avec l'eau disponible pour les périmètres de la région de Podor est donc théoriquement démontré. Les mesures sur le sol lui-même, qui font l'objet du présent travail, permettront de confirmer ou non cette constatation. Certains facteurs, tels le gypse présent dans le sol, permettront néanmoins, le cas échéant, d'interpréter un retard dans le processus.

Remarque: les résultats complets des simulations sont donnés dans l'annexe A

2.4 Le sol

Le comportement des sols irrigués a été appréhendé dans les précédents paragraphes au travers de la qualification de l'eau. L'interaction de celle-ci avec le sol n'a cependant été évaluée que partiellement et dans un contexte bien précis. Il convient cependant de ne pas perdre de vue l'objectif même de cette étude, qui se propose de dresser un bilan de l'état sodique et alcalin des sols irrigués. A cette fin, et bien que la théorie ci-dessus donne quelques tendances évolutives, la connaissance des sols de la région avant et après irrigation est essentielle. Elle sera prioritaire lors de l'élaboration d'une méthodologie de travail, exposée en 2ème partie. A ce stade de l'étude, une première approche descriptive du milieu dans lequel se situent les aménagements est cependant proposée.

Le milieu est structuré en unités géomorphologiques distinctes. Elles correspondent à divers types de dépôts alluviaux récents dont la richesse fréquente en sodium est à attribuer aux sels sodiques d'origine fossile, apportés par d'anciennes invasions marines (LOYER, 1989). Des sols de texture différente y sont associés. On peut donc s'attendre à des comportements hydriques spécifiques à l'unité considérée et à une dynamique chimique différenciée.

Parmi les unités les plus caractéristiques, on observe principalement :

- les hautes levées : bourrelets de berge édifiés par le fleuve (sable, limon fin et argiles en proportions égales),
- les cuvettes de décantation : très étendues dans la vallée, occupent les parties basses du paysage. Sièges de décantation des sédiments apportés par la crue, leurs sols sont des vertisols topomorphes (argiles à forte proportion d'argiles gonflantes),
- les petites levées : de position topographique intermédiaire mais moins bien définies pédologiquement, elles peuvent correspondre soit à des sols vertiques équivalents aux cuvettes (> 50% d'argile), soit à des sols de texture mélangée (35-50% d'argile) (BOIVIN, 1993; MANE et al., 1993).

2.5 Cultures pratiquées

2.5.1 Généralités

La culture en place et les pratiques associées conditionnent la gestion de l'eau: fréquence et volume des apports, répartition de l'eau sur une surface plane ou entre des billons, paramètres qui ont une grande importance dans les phénomènes de lessivage ou au contraire de remontées capillaires.

Lors de la culture de riz, on est en effet en présence d'une lame d'eau importante après chaque tour d'eau, où peuvent intervenir certains phénomènes de lessivage. Le sol n'est que peu soumis à dessiccation pendant la campagne. En revanche, la culture sur billons provoque un dessèchement rapide du sol. Au cas où l'eau d'apport entre en contact avec la nappe, les remontées capillaires de celle-ci sont importantes.

Remarque :

Au cours de ce travail, la culture pratiquée n'a pas été prise en considération. L'historique des rotations pratiquées sur une parcelle n'est pas toujours facile à déterminer lors de la discussion avec les paysans, ce qui a incité à négliger ce paramètre.

2.5.2 Calendrier cultural

L'irrigation permet 2 campagnes de culture par an. Pour le riz, il s'agit de la campagne d'hivernage (saison des pluies : juillet, août), avec semis autour du 15 juillet et récolte vers le 15 novembre, et celle de contre-saison, où l'on sème en février et récolte en mai. Il est le plus souvent semé à la volée.

En ce qui concerne la polyculture (tomates, oignons), une seule campagne par an est possible, repiquée en novembre-décembre et récoltée de mars à mai.

On distingue ainsi les rotations suivantes:

tableau 5-Calendrier cultural

Hivernage	Contre-saison
riz	riz
riz	polyculture
-	polyculture

2.5.3 Mode d'irrigation

L'irrigation est toujours gravitaire, et se fait par submersion pour le riz et à la raie (billons) en polyculture.

2.6 Aménagements

2.6.1 Généralités

Parmi les caractéristiques des aménagements hydro-agricoles qui affectent la réponse des sols à l'irrigation, on peut citer le drainage, le planage et le mode de distribution de l'eau. Le drainage est cependant le facteur essentiel qu'il convient d'examiner lors de toute étude de sols irrigués.

Le drainage permet une évacuation de certaines espèces chimiques en solution, évitant leur accumulation dans le profil. Bien que son utilité pour les sols irrigués soit reconnue par tous, il est frappant de constater qu'il n'est présent dans aucun périmètre de la région. Seuls les grands aménagements comportent un réseau de colatures permettant la vidange des parcelles avant récolte sans qu'un drainage complet soit réalisé.

Dans ce contexte, on peut craindre de rapides accumulations de sels, sodiques ou non, dans les sols irrigués.

2.6.2 Types d'aménagements

Divers types d'aménagements coexistent dans la zone, parmi lesquels se distinguent notamment:

tableau 6-Types d'aménagements

	surface	planage	distribution de l'eau	drainage	exemples
Grands aménagements	>500 ha	mécanisé	tour d'eau vannes à glissière	fossés de colature pour eaux de débordement	Guédé Chantiers
Périmètres intermédiaires de type It	≥50 ha	mécanisé	tour d'eau, siphon	non	Donaye It2, It4
Périmètres irrigués villageois (PIV)	15-50 ha	manuel	tour d'eau vannes à glissière	non	Guia 1 Dado 1 et 2 Donaye 1
Périmètres privés	5-50 ha	manuel	tour d'eau vannes à glissière	non	Arsuka Betawe Ndiaye

(d'après HECQ, DUGAUQUIER, 1990; TARRIERE, 1993)

2.7 Les enjeux de l'irrigation

Ayant acquis depuis le début de la sécheresse des années 70 une place considérable dans les stratégies économiques des paysans du Fleuve, l'irrigation n'est cependant qu'une parmi les sources de revenus monétaires de ceux-ci. Il convient donc d'en situer l'importance afin de bien saisir les conséquences que pourrait représenter une éventuelle perte de fertilité des sols irrigués.

2.7.1 Historique de l'irrigation dans la région du Fleuve (d'après LAVIGNE DELVILLE, 1991).

Dès les années 30, le fleuve Sénégal a fait l'objet de nombreux projets d'aménagement hydro-agricoles. Il s'agissait de couvrir le déficit en riz du pays, en produisant sur de grands périmètres irrigués dans le delta du Fleuve.

Dans le contexte de sécheresse des années 1970, les périmètres villageois (PIV) ont vu le jour au Sénégal afin de garantir une meilleure sécurité alimentaire aux populations riveraines. En effet, cette période vit une baisse importante des rendements des cultures traditionnelles pluviales (mil essentiellement) et de décrue (sorgho). Plus récemment, la construction des barrages de Manantali (régulation du débit) et Diama (barrage anti-sel) ont accru la disponibilité en eau et donc la possibilité de mise en valeur de périmètres irrigués.

2.7.2 Approche socio-économique

La population de la moyenne vallée du fleuve est à majorité Haalpulaar (c'est-à-dire parlant le Pulaar). C'est une société rurale hiérarchisée (trois groupes : hommes libres et nobles, artisans, anciens captifs) qui vivait autrefois principalement de la guerre, du commerce et de l'élevage.

Les rapports sociaux se sont considérablement transformés depuis un siècle (fin de l'esclavage, ruine du commerce, sécheresse, etc.) et le repli sur l'agriculture et sur l'émigration a été général.

L'émigration sur le fleuve Sénégal est donc devenue une donnée structurelle de l'économie locale. C'est la réponse paysanne à des besoins monétaires croissants, dans des zones économiquement marginalisées. Et c'est aussi la réponse paysanne à la sécheresse. Il ne s'agit pas de fuir un milieu naturel devenu trop hostile, mais au contraire de trouver les moyens de continuer à vivre sur place, en envoyant les jeunes chercher ailleurs les ressources indispensables.

Dans certaines régions (environs de Matam), les villages voient émigrer jusqu'à 30 à 50% des hommes actifs, amenant un revenu représentant 30 à 70% du budget familial. Si les proportions sont moindres dans la région de Podor, elles ne sont néanmoins pas à négliger.

C'est aujourd'hui une stratégie économique, un choix d'affectation de la main d'oeuvre. L'intérêt des paysans pour l'irrigation dépend ainsi des disponibilités en force de travail et en ressources monétaires, toutes deux liées à l'importance de l'émigration.

Quant à l'importance accordée à la production agricole, il faut distinguer trois motivations qui forment trois "tranches" de production. La première, de loin la plus importante, concerne l'autoconsommation. Elle a valeur de sécurité - voire de survie - et, en ce sens, elle "n'a pas de prix"; mais grâce aux revenus migratoires, l'autosuffisance n'est pas un but en soi. La seconde partie sert à payer les charges, en totalité ou partiellement. En général, les paysans cherchent à réduire le plus possible cette part. La troisième, celle qui pourrait être commercialisée, dépend de l'efficacité et de la part des autres moyens d'obtenir de l'argent, la migration en particulier (LAVIGNE DELVILLE, 1991).

Seconde partie

La seconde partie de cette étude vise à concrétiser l'objectif de la recherche, qui est de définir dans l'espace et dans le temps le devenir des sols irrigués par rapport à l'alcalinisation. Le cadre dans lequel se déroulent les processus, les paramètres les affectant et les enjeux qu'ils représentent ayant été développés en première partie, il convient à présent d'élaborer une méthodologie de recherche applicable aux buts fixés.

3. Approche de la problématique

3.1 Généralités

Ce chapitre s'articule en trois parties. La première expose les diverses solutions méthodologiques à la problématique posée. Il s'agira de débattre des avantages et inconvénients des diverses approches, puis d'en choisir une qui fera l'objet d'un second paragraphe. Le choix des outils de traitement des données obtenues clora le chapitre.

3.2 Solutions méthodologiques

Quatre options peuvent être retenues pour aborder la problématique:

- **Modélisation:**
 - avantages: - rapidité d'application une fois le modèle mis au point
 - maîtrise de tous les paramètres
 - inconvénient:- simplification de la réalité
- **Essais au laboratoire (colonnes de sol):**
 - avantages: - étude fine de l'évolution temporelle du sol sous l'influence de l'eau
 - maîtrise de plusieurs paramètres
 - inconvénients:- étude sur un sol artificiel
 - réalité partiellement reconstituée
- **Suivi de terrain:**
 - avantage: - méthode retraçant le plus fidèlement la réalité
 - inconvénient:- durée pour l'obtention de données significatives
- **Echantillonnage de périmètres d'ancienneté différente et de sols non cultivés**
 - avantages: - durée réduite
 - diagnostic de l'état des sols à l'échelle d'une région
 - inconvénients:- comparaison de sols éloignés, de conditions stationnelles différentes et d'historique de culture peu comparable

La contrainte temporelle et la volonté d'obtenir un bilan de l'alcalinisation des sols irrigués de la région de Podor étant prioritaires, la dernière solution a été retenue. Elle est décrite au paragraphe suivant.

3.3 Echantillonnage

3.3.1 Echelle spatiale

Le choix d'un échantillonnage effectué dans les sols de la région a été dicté par un souci de représentativité. L'échantillon est donc large (69 points de sondage) et couvre un nombre relativement important de périmètres (8). En effet, le problème n'ayant auparavant jamais été étudié dans la région, il a semblé judicieux de raisonner de manière statistique afin d'éviter les cas particuliers.

3.3.2 Echelle temporelle

Le facteur temps est de première importance dans le suivi des processus. Toutefois, la durée accordée à cette étude étant limitée à quelques mois, il a fallu comparer entre eux des sols dont la culture est plus ou moins récente, ainsi que des sols non cultivés considérés comme référence. Pressentant que ce raisonnement, postulant un état initial plus ou moins uniforme, pouvait se révéler erroné, nous avons cependant veillé à grouper les prélèvements, afin de réunir sur de courtes distances des sols à ancienneté différente et des sols non cultivés. Le souci d'être significatif a donc peu à peu pris les pas sur la représentativité.

Remarque: L'ancienneté d'un périmètre ou plutôt le nombre de campagnes qui s'y sont déroulées, est établi après discussion avec le président du périmètre, voire avec les paysans eux-mêmes. Il faut en conséquence garder à l'esprit le risque d'erreur et d'incompréhension inhérent à ce genre d'enquête, en particulier pour les périmètres les plus âgés ou comportant des zones d'âges différents.

3.3.3 Echelle au niveau du profil

Les modifications des paramètres du sol au sein même du profil ont été abordés grâce à des prélèvements effectués à deux profondeurs pour chaque point de sondage. L'un en surface (0-20 cm), l'autre au niveau racinaire (40-60 cm), ces deux aspects étant d'un intérêt agronomique évident.

3.3.4 Echantillonnage adapté au problème étudié

Les sols les moins pourvus en sels de calcium (gypse surtout) sont en principe susceptibles d'évoluer plus rapidement vers la voie alcaline (cf. 1.2.1 b)). De plus, les sols riches en NaCl sont susceptibles de voir leur complexe d'échange saturé par le sodium, sans que le processus de sodisation par la voie alcaline ne se soit produit. Afin de se concentrer sur ce dernier problème, le choix des périmètres, puis des points de sondage, est guidé par la recherche des conditions les moins salées, ce qui est rendu possible par des mesures in situ au conductivimètre électromagnétique.

3.3.5 Type de sol

Ce critère, bien qu'à priori essentiel dans l'interprétation des mécanismes, n'a pas été déterminant dans les choix des points de sondage. Cependant, il a été veillé à ce que les deux principaux types de sol (argileux et à texture mélangée) soient représentés, afin de cerner une éventuelle différence du comportement évolutif.

3.3.6 Choix des sites

Les critères évoqués plus haut ont mené à la constitution d'un échantillon les satisfaisant au mieux. Les périmètres retenus se regroupent donc en les familles suivantes:

tableau 7-Sites de prélèvements

Famille de périmètres	Nombre de campagnes
Donaye It2- Betawe Ndiaye	0 - 6 - 14
Donaye It4 - Arsuka	0 - 7 - 11
Guia I	0 - 13 - 27
Dado I et II	0 - 4 - 6 - 9
Donaye I	0 - 29

cf. carte p. + annexe B

Pour chaque groupe, le nombre de points de sondage par ancienneté va de trois à six.

3.4 Méthode d'analyse

Les processus d'alcalinisation et de sodisation peuvent être appréhendés par divers paramètres, parmi lesquels on peut citer: ESP, alcalinité (teneur en carbonates), pH,... De même, d'autres grandeurs telles que la teneur en gypse ou en sels sodiques sont utiles à l'interprétation des phénomènes. Toutefois, le temps à disposition ne permettant pas de les aborder tous, un choix tenant compte de leur importance et de la facilité de leur analyse doit être effectué.

3.4.1 Variables retenues

La priorité est accordée à la caractérisation du complexe d'échange, plus particulièrement son état de saturation en sodium (ESP). Le paragraphe 1.2 a en effet permis de montrer que ce paramètre est un indicateur de sodisation et qu'il donne ainsi de précieuses indications sur une éventuelle dégradation alcaline.

A cette fin, une démarche analytique qui s'inspire des recherches de P. Podwojeski au laboratoire de chimie de l'ORSTOM à Noumea (PODWOJESKI, 1988) est choisie. Ces recherches visent à mettre en évidence la meilleure méthode de caractérisation chimique des vertisol à gypse et/ou à carbonates, en particulier à choisir les agents d'extraction les plus performants pour la détermination des bases échangeables. Quant à la solution du sol, son examen est tributaire des possibilités offertes par la démarche ci-dessus. Celle-ci permet le dosage des chlorures, alors que la quantification des sulfates et des carbonates n'est pas possible. Cette dernière grandeur est néanmoins capitale pour quantifier le mécanisme d'alcalinisation. C'est pour cette raison qu'une titration des carbonates est effectuée sur des échantillons à ESP et/ou teneur en Na en solution élevées. De même, le pH de la solution est un indice d'alcalinité de grande valeur.

Ainsi, les variables retenues pour l'analyse sont les suivantes:

- Complexe d'échange: CEC, Na échangeable, Ca échangeable, Mg échangeable, K échangeable
- Solution du sol: pH, conductivité électrique, Na en solution, Ca en solution, Mg en solution, Cl en solution;
- et à titre indicatif: SO₄ en solution, il s'agit de la faible quantité de SO₄ dissoute dans l'éthanol.
- dans certains cas: CO₃, HCO₃ en solution ou précipités

Plus précisément, les méthodes d'analyse sont les suivantes:

3.4.2 Sels solubles

Extraction: méthode Tucker (éthanol 70%)

Dissolution des sels solubles dans l'éthanol, principalement les chlorures. Pas de dissolution des sulfates ni des carbonates.

Dosage:

cations: spectrométrie d'absorption atomique; anions: colorimétrie

cf. protocole complet en Annexe C

3.4.3 Bases échangeables

Extraction: NH_4Cl en milieu éthanol

Le milieu alcoolique est conservé afin d'éviter la dissolution des sulfates (principalement le gypse) et des carbonates. Celle-ci ferait intervenir des phénomènes d'échange avec le complexe adsorbant, les ions Ca libérés pouvant remplacer peu à peu le Na et le Mg plus faiblement liés. Lors du dosage des bases échangeables, les cations du complexe et les cations dissous ne pourraient être distingués.

Dosage: cations: spectrométrie d'absorption atomique

cf. protocole complet en Annexe C

3.4.4 CEC

Cette méthode n'a pas été développée par P. Podwojeski et n'a malheureusement pas pu être testée avant utilisation

Extraction: KNO_3 1N

Dosage: NH_4^+ et Cl^- par colorimétrie

La différence de concentration $[\text{NH}_4^+] - [\text{Cl}^-]$ correspond à la CEC

cf. protocole complet en Annexe C

3.4.5 pH eau, conductivité électrique

Effectués sur extrait 1/5

3.4.6 Titration des carbonates

Effectuée sur extrait 1/5

Dosage: titration avec HCl N/10 *cf. protocole complet en Annexe C*

Troisième partie

Cette partie de l'étude comporte en premier lieu l'exposé des résultats obtenus lors de la campagne d'échantillonnage. Les paramètres seront tout d'abord examinés séparément, leurs interactions étant également discutées le cas échéant. La connaissance des caractéristiques générales de l'échantillon permettra ensuite l'étude simultanée de l'évolution des paramètres les plus significatifs au travers d'une analyse en composantes principales. Les tendances évolutives des sols irrigués pourront ainsi être abordées.

Dans un second chapitre, les principaux résultats seront discutés et leur interprétation tentée. Nous verrons que bien des questions restent sans réponse au terme de cette étude, ce qui mène tout naturellement au dernier volet de cette partie, consacré aux critiques de la méthode adoptée et à des propositions concrètes de recherche.

4. Exploitation des résultats

Les résultats d'analyse se trouvent en annexe D.
 NB. [meq%]: [meq/100g de sol sec]

4.1 Solution du sol

4.1.1 pH

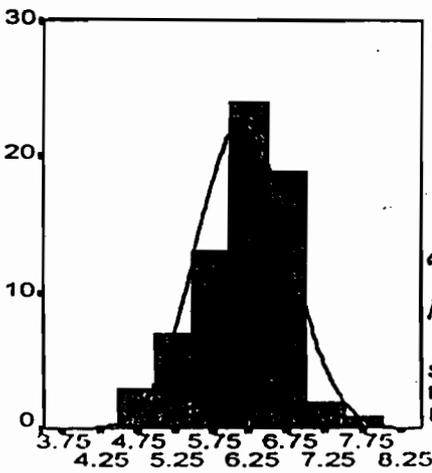


Fig. 3-
pH surface

Std. Dev = .60
 Mean = 6.17
 N = 69.00

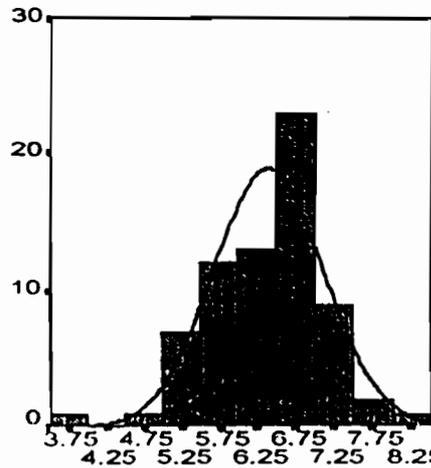


Fig. 4-
pH niveau racines

Std. Dev = .73
 Mean = 6.39
 N = 69.00

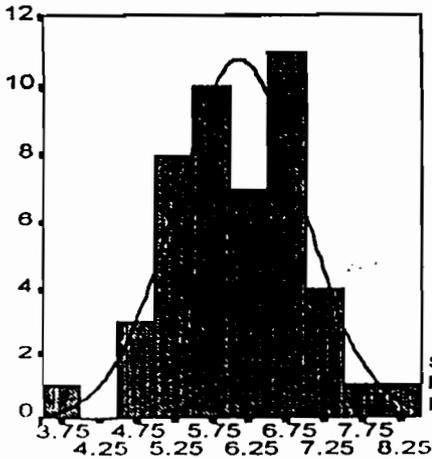


Fig. 5-
pH sols non cultivés

Std. Dev = .85
 Mean = 6.11
 N = 46.00

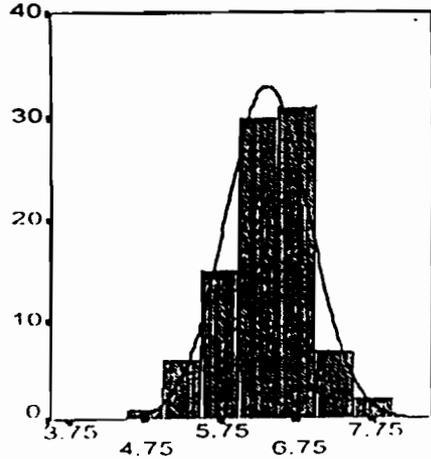


Fig. 6-
pH sols cultivés

Std. Dev = .55
 Mean = 6.37
 N = 92.00

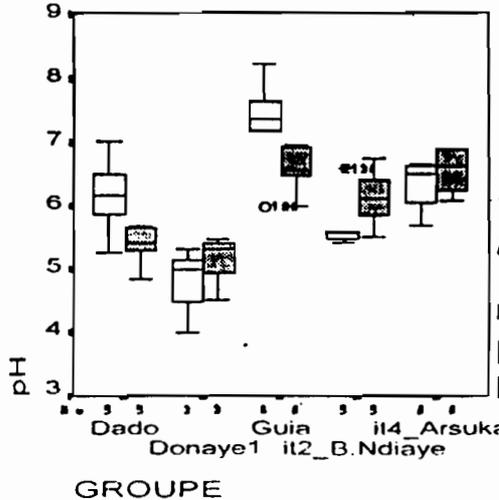


Fig. 7-
pH périmètres

Profondeur
 □ 40-60 cm
 ▨ 0-20 cm

Il existe une forte dispersion des valeurs des pH au sein des périmètres, ainsi que des écarts importants entre les groupes de périmètres. Néanmoins, on peut observer une différence significative entre profondeur et surface, le pH à la base des racines étant supérieur à celui mesuré en surface. Ceci n'est toutefois vrai que pour les sols considérés globalement ou les sols cultivés uniquement. En ce qui concerne les sols non cultivés, cette différence ne se retrouve pas. (résultats des tests statistiques en annexe E)

Il n'y a pas de différence significative entre sols cultivés et non cultivés pour le pH.

Remarque: tous les tests statistiques sont réalisés à un seuil de signification de 95%

4.1.2 Carbonates

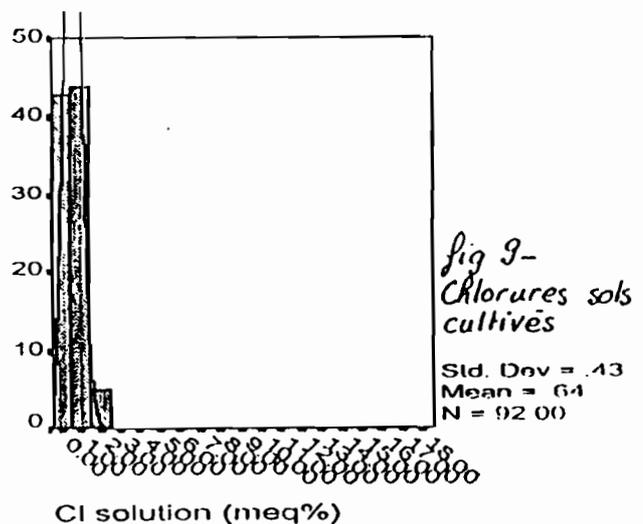
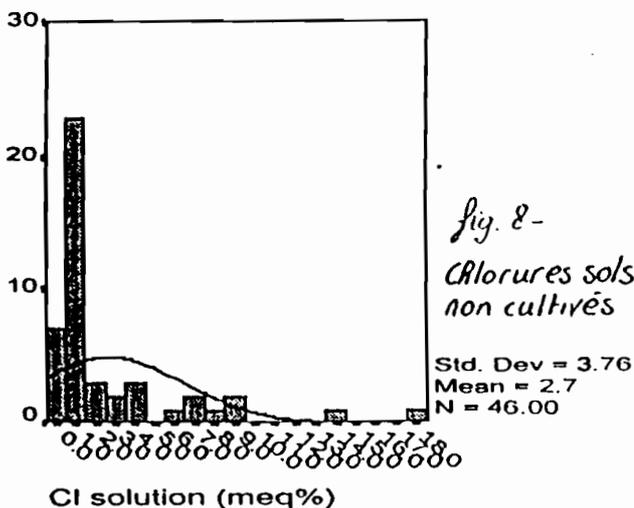
Résultats en Annexe F

Les teneurs en carbonates sont minoritaires par rapport aux concentrations en chlorures de la solution du sol. Il ne semble y avoir aucune relation entre ancienneté du périmètre ou ESP et richesse en carbonates.

4.1.3 Chlorures

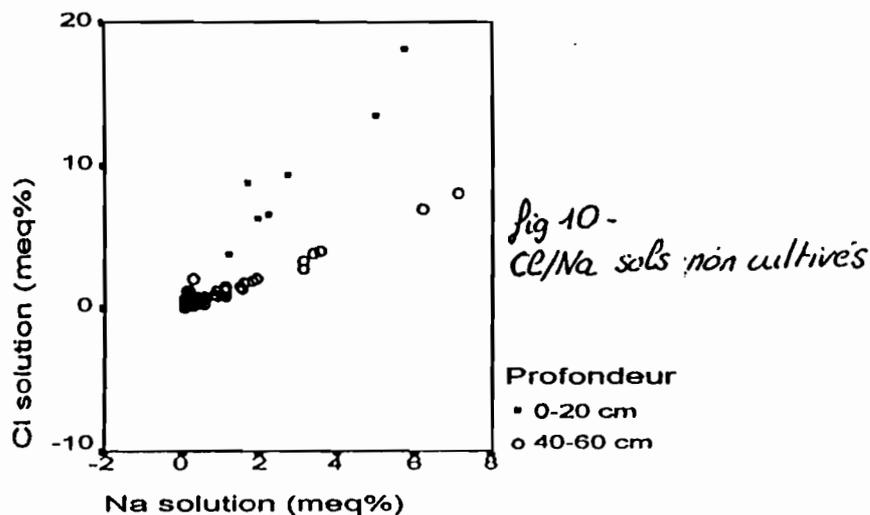
Remarque importante:

La stratégie d'échantillonnage est essentiellement basée sur la recherche des sols peu salés (cf. 3.3.4). Cependant, force est de constater que les tendances présentées ci-après n'ont pu être observées que sur des sols relativement riches en chlorures. Ceux-ci sont peu nombreux et l'on ne peut véritablement considérer les observations comme représentatives. De plus, les échantillons les plus salés, tous provenant de sols non cultivés ont une conductivité qui reste faible (<4dS/m: limite fixée par Duchaufour (DUCHAUFOUR, 1991) pour les sols salins). Dans la région, les valeurs peuvent être sensiblement plus élevées (campagnes de mesure réalisées précédemment par l'ORSTOM).

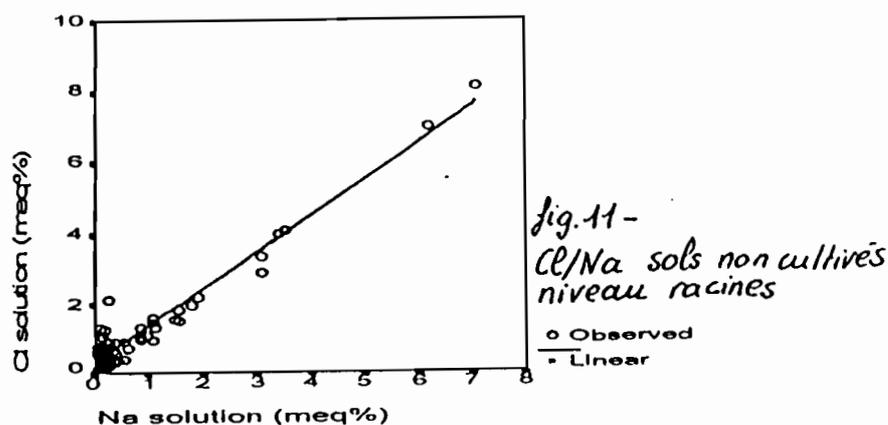


a) Sols non cultivés

Les différents rapports entre chlorures et sodium en solution, mis en évidence à la fig.10 font apparaître deux types de salinité chlorurée:



- en profondeur, elle est principalement chlorurée sodique



penste	ord.origine	Rsq
1.03	0.38	0.93

Evolution des sols irrigués dans la moyenne vallée du Fleuve Sénégal

- en surface, un mélange bien défini de différents chlorures prédomine. Il s'exprime par un rapport constant du type $2 \text{ NaCl} - \text{MgCl}_2 - \text{CaCl}_2$.

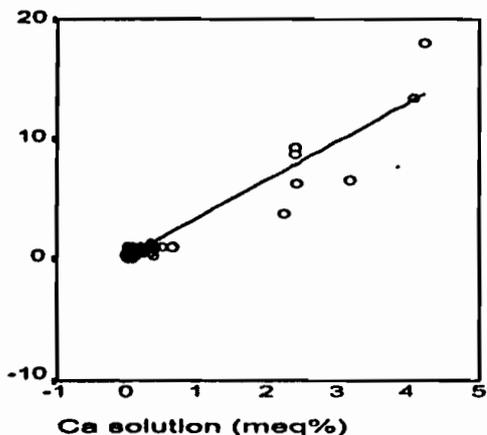


fig. 12 -
Cl/Ca sols
non cultivés
surface

○ Observed
— Linear

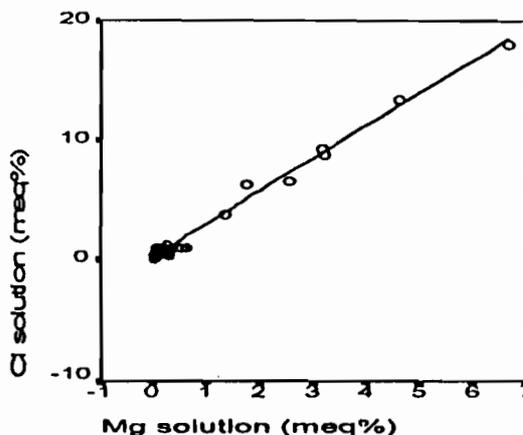


fig. 13 -
Cl/Mg sols non
cultivés
surface

○ Observed
— Linear

pente	ord.origine	Rsq
3.22	0.12	0.91

pente	ord.origine	Rsq
2.75	0.23	0.99

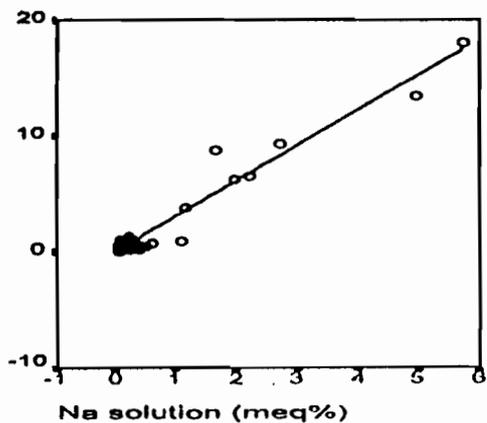


fig. 14 -
Cl/Na sols non
cultivés surface

○ Observed
— Linear

pente	ord.origine	Rsq
3.05	0.01	0.95

b) Sols cultivés

Les valeurs sont plus faibles et les tendances par conséquent moins marquées (valeurs proches des seuils de précision des mesures). On retrouve cependant la trace de NaCl en profondeur. En revanche, du fait des faibles valeurs, aucun renseignement quant à la répartition des espèces chlorurées ne peut être tiré des mesures de surface.

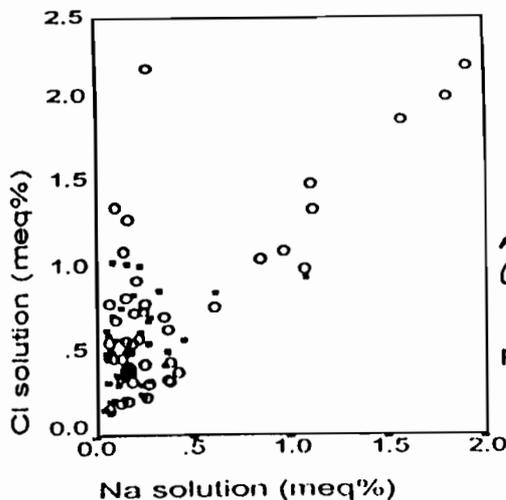


fig. 15 -
Cl/Na sols cultivés

Profondeur
• 0-20 cm
○ 40-60 cm

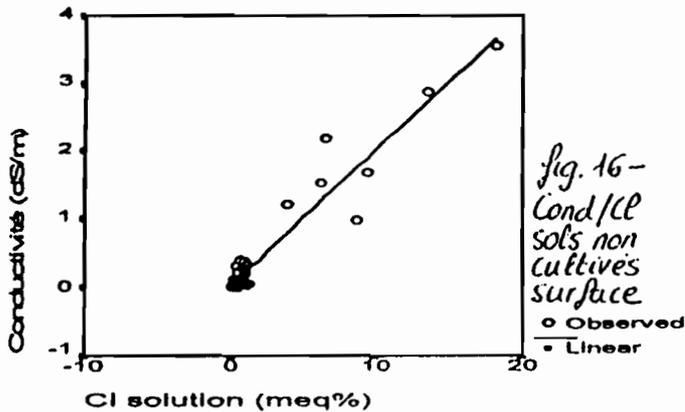
4.1.4 Autres sels solubles

L'extrait aqueux réalisé pour la mesure de la conductivité électrique donne des indications sur la présence éventuelle de sels non chlorurés, non détectables sur l'extrait éthanol (cf. 3.4). En effet, on considère que tous les sels sont mis en solution dans l'extrait aqueux, ce qui donne une idée de la salinité totale.

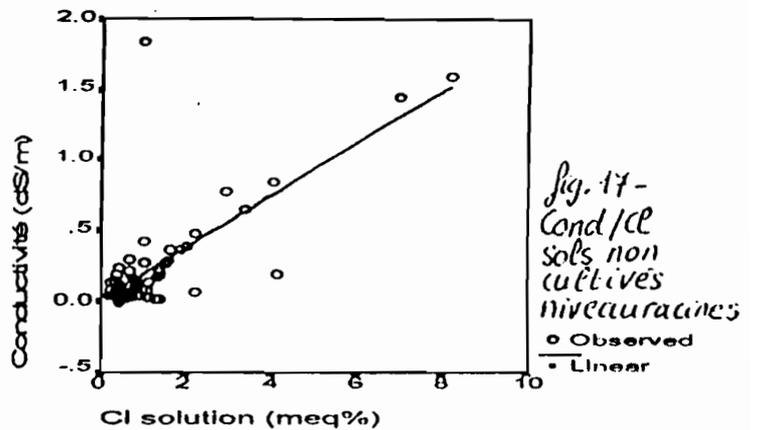
A nouveau, on peut distinguer:

a) sols non cultivés

En surface (mélange de chlorures) et en profondeur (chlorures sodiques uniquement), la corrélation est assez forte entre Cl et conductivité: la présence d'autres sels ne peut y être que minoritaire par rapport aux chlorures, ou alors directement proportionnelle à ces derniers.



pende	ord.origine	Rsq
0.20	-0.01	0.92



pende	ord.origine	Rsq
0.19	0.00	0.55

EN OTANT LE POINT J2 40-60

Cl/conductivité		
pende	ord.origine	Rsq
0.19	-0.03	0.83

b) sols cultivés

Très peu conducteurs, ils contiennent probablement peu de sels solubles, La relation Cl - conductivité est moins nette que précédemment, ce qui est dû aux valeurs faibles.

4.1.5 K soluble

Cet élément n'a pas été pris en considération car présent en quantités minimes.

4.2 Complexe d'échange

4.2.1 Le taux de saturation

Résultats et tests en annexe G.

Le calcul de ce paramètre fait intervenir 5 valeurs mesurées (bases et CEC), ce qui cumule les erreurs possibles. Il a toutefois été utilisé afin d'apprécier la cohérence des résultats et la fiabilité des méthodes d'analyse. Les extractions en milieu aqueux réalisées précédemment sur des sols comparables à ceux de l'échantillon laissaient en effet apparaître une large proportion de $T_{sat} > 100\%$.

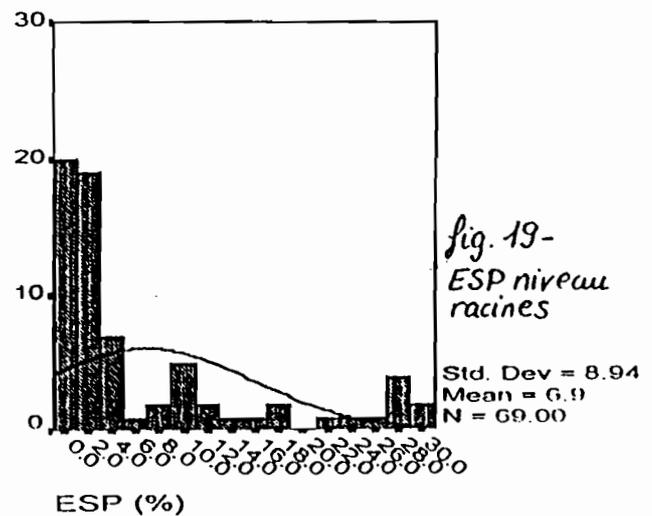
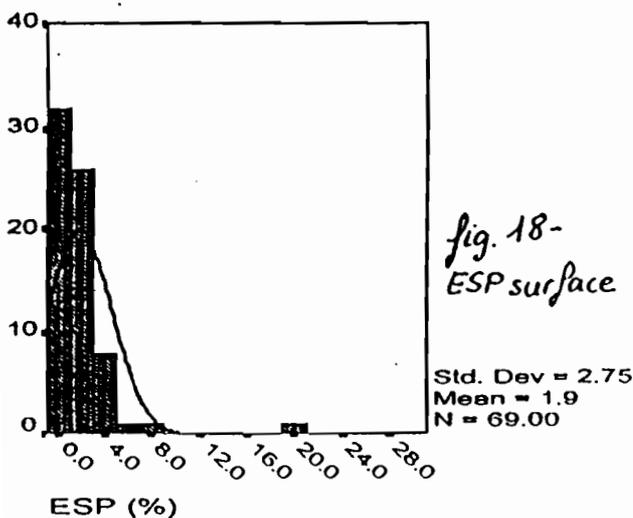
La méthode choisie ici réduit considérablement les valeurs aberrantes sans les éliminer totalement (14% de taux de saturation supérieurs à 100%).

Malgré une forte dispersion, les sols sont généralement saturés, les sols cultivés étant même légèrement plus saturés que les non cultivés.

Il n'y a pour ce paramètre aucune différence significative entre la surface et la profondeur.

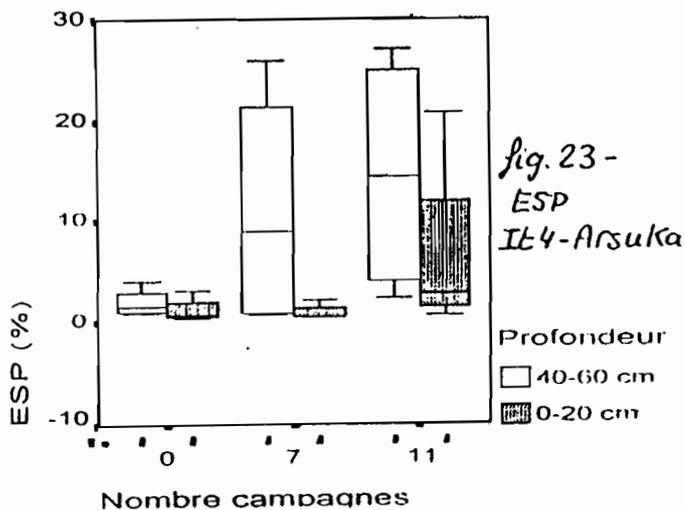
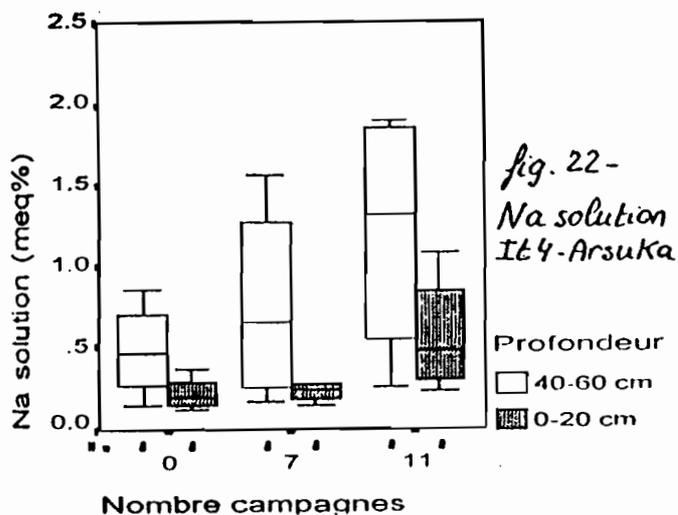
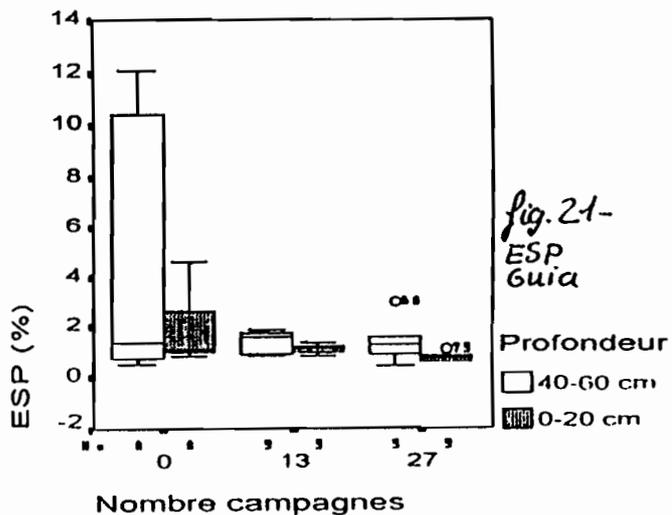
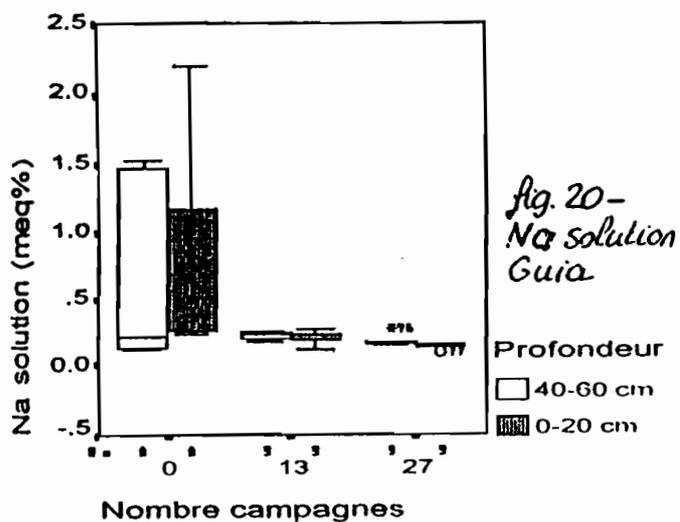
4.2.2 ESP

L'ESP est significativement plus forte en profondeur qu'en surface. (cf. Annexe H)

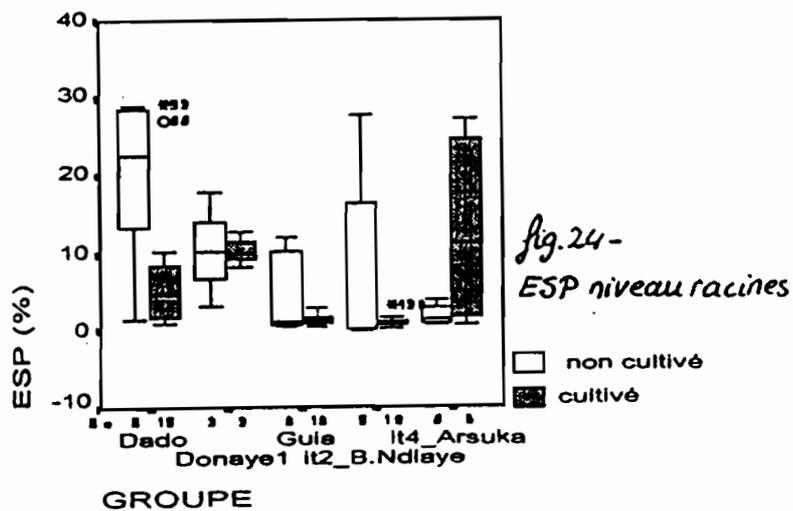


La comparaison globale des sols cultivés et non cultivés ne permet pas de dégager de tendance évolutive. En revanche, si l'on ne considère que les prélèvements en profondeur groupe par groupe de périmètres, certaines différences s'expriment, qui sont à prendre avec circonspection vu la taille réduite de l'échantillon.

Deux groupes semblent cependant se dessiner, l'un constitué par It4-Arsuka, où l'on assiste, à mesure de l'avancement en âge des périmètres, à un accroissement de l'ESP et du sodium en solution, surtout en profondeur. Dans tous les autres cas, l'évolution est inverse



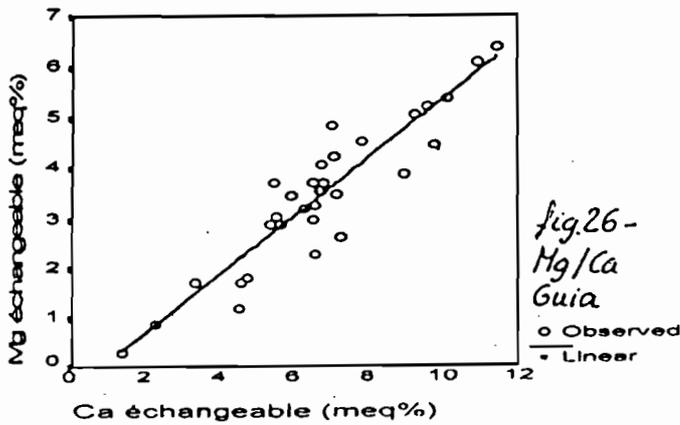
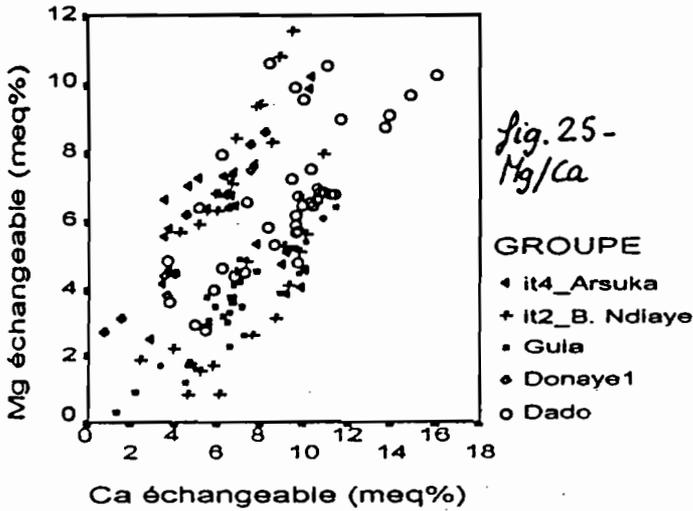
Des valeurs assez élevées (>jusqu'à 30%) sont présentes dans les horizons de profondeur, tant dans les sols cultivés que non cultivés.



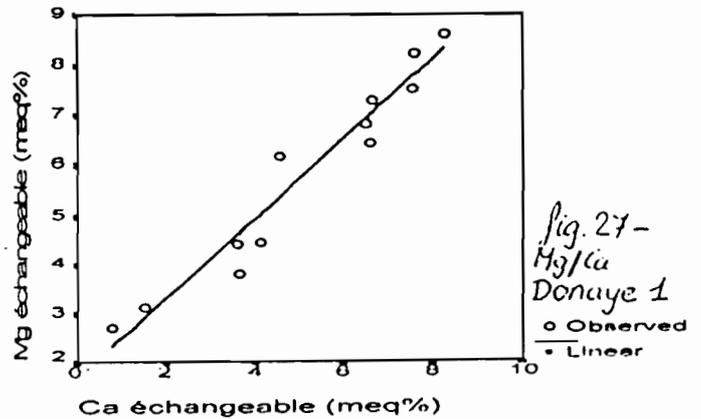
Les faibles valeurs des horizons de surface ne se justifient pas un tel examen.

4.2.3 Ca/Mg échangeables

Les figures suivantes mettent en évidence deux groupes distincts au rapport Ca/Mg échangeables défini. Une certaine discrimination semble stationnelle et l'on peut ainsi rattacher les périmètres de Guia et de Donaye 1 à une des deux familles, ce qui n'est pas possible pour les 3 autres groupes de périmètres.



pende	ord.origine	Rsq
0.85	-0.46	0.85



pende	ord.origine	Rsq
0.80	1.71	0.94

4.2.4 K échangeable

Même remarque que concernant K soluble

4.3 Relations solution du sol/complexe d'échange

Remarque importante:

Rappelons que seuls les chlorures sont quantifiés et que les relations entre complexe et solution ne sont évaluables que partiellement pour le sodium. Elles sont impossibles pour le calcium et le magnésium, théoriquement présents surtout sous forme de sulfates et de carbonates. (Même les échantillons contenant des chlorures de calcium et de magnésium n'ont pu révéler de lien entre le complexe et la solution pour les bivalents).

4.3.1 Na échangeable - Na en solution

Les graphes ci-dessous marquent l'existence de trois branches.

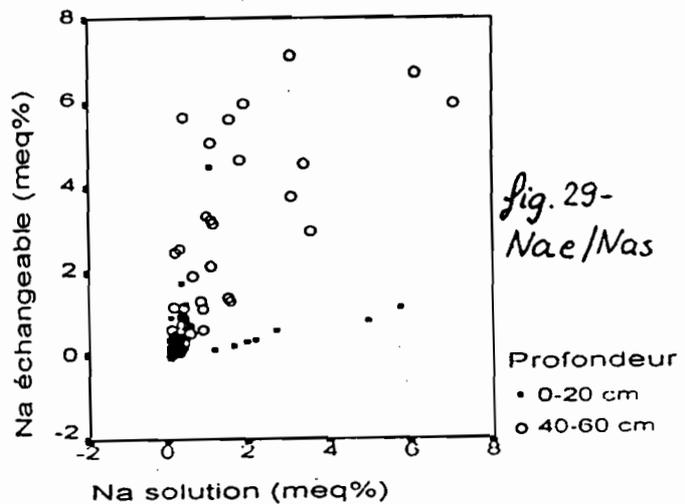
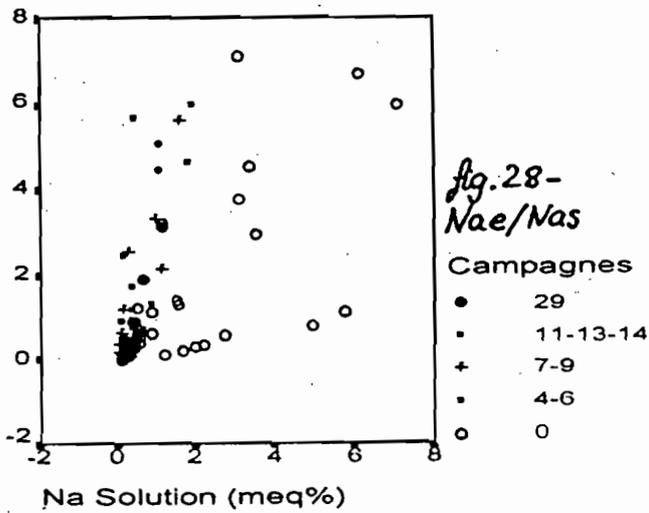


TABLE DES MATIERES

Avertissement.....	1
Remerciements.....	2
Introduction.....	3
Première partie	5
1. Irrigation en climat aride	6
1.1 Généralités	6
1.1.1 L'eau	6
1.1.2 Le climat.....	6
1.2 Evolution théorique d'un sol irrigué	7
1.2.1 Chimie des solutions en concentration	7
a) L'alcalinité	7
b) L'alcalinité résiduelle.....	8
c) L'alcalinité résiduelle généralisée :.....	9
1.2.2 Evolution du sol irrigué en conditions arides.....	9
2. Irrigation dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal	10
2.1 Généralités	10
2.2 Le climat	10
2.3 Qualité de l'eau d'irrigation de la région	11
2.3.1 Méthodologie.....	11
a) Traitement et comparaison des données brutes d'eau d'irrigation.....	11
b) Choix d'une eau pour les simulations.....	11
2.3.2 Traitement des données	12
a) Traitement des données brutes.....	12
b) Simulation de concentration.....	13
2.3.3 Résumé.....	14
2.4 Le sol.....	15
2.5 Cultures pratiquées	16
2.5.1 Généralités.....	16
2.5.2 Calendrier cultural.....	16
2.5.3 Mode d'irrigation.....	16
2.6 Aménagements.....	17
2.6.1 Généralités.....	17
2.6.2 Types d'aménagements.....	17

2.7 Les enjeux de l'irrigation.....	18
2.7.1 Historique de l'irrigation dans la région du Fleuve.....	18
2.7.2 Approche socio-économique.....	18

Seconde partie20

3. Approche de la problématique	21
3.1 Généralités.....	21
3.2 Solutions méthodologiques.....	21
3.3 Echantillonnage.....	22
3.3.1 Echelle spatiale	22
3.3.2 Echelle temporelle	22
3.3.3 Echelle au niveau du profil.....	22
3.3.4 Echantillonnage adapté au problème étudié.....	23
3.3.5 Type de sol.....	23
3.3.6 Choix des sites.....	23
3.4 Méthode d'analyse.....	24
3.4.1 Variables retenues.....	24
3.4.2 Sels solubles.....	25
3.4.3 Bases échangeables.....	25
3.4.4 CEC.....	25
3.4.5 pH eau, conductivité électrique.....	25
3.4.6 Titration des carbonates	25

Troisième partie26

4. Exploitation des résultats	27
4.1 Solution du sol.....	27
4.1.1 pH.....	27
4.1.2 Carbonates	28
4.1.3 Chlorures.....	28
a)Sols non cultivés.....	29
b)Sols cultivés	30
4.1.4 Autres sels solubles	31
a) sols non cultivés.....	31
b) sols cultivés.....	31
4.1.5 K soluble	31

4.2	<i>Complexe d'échange</i>	32
4.2.1	Le taux de saturation.....	32
4.2.2	ESP.....	32
4.2.3	Ca/Mg échangeables.....	34 b
4.2.4	K échangeable.....	34 b
4.3	<i>Relations solution du sol/complexe d'échange</i>	35
4.3.1	Na échangeable - Na en solution.....	35
	a)Prélèvements de surface de sols non cultivés.	36
	b)Prélèvements en profondeur de sols non cultivés.....	36
	c)Prélèvements sur sols cultivés.....	36
4.4	<i>Examen global des paramètres: tendances évolutives</i>	37
4.4.1	Méthodologie.....	37
	a) Première analyse.....	37
	b) Seconde analyse: normalisation des chlorures.....	38
	c) Troisième analyse: normalisation des chlorures et groupement des ions bivalents.....	39
4.4.2	Tendances évolutives.....	40
	a) Dado.....	40
	b) Donaye 1.....	40
	c) Guia.....	40
	d) It 2 - Betawe Ndiaye.....	40
	e) It4 - Arsuka.....	40
5.	Interprétation	41
5.1	<i>Sodium des sols non cultivés.</i>	41
5.2	<i>Sodium des sols cultivés</i>	41
5.3	<i>Evolution du complexe d'échange</i>	42
5.4	<i>pH</i>	43
5.5	<i>Enrichissement en carbonates</i>	43
5.6	<i>Rapport Ca/Mg échangeable</i>	43
6.	Propositions de recherche	44
	Conclusion	45
	Bibliographie	46

a) Prélèvements de surface de sols non cultivés.

Bien que le sodium en solution puisse atteindre des quantités relativement élevées, cet élément reste minoritaire sur le complexe et aucune relation ne peut donc être établie.

b) Prélèvements en profondeur de sols non cultivés

Na échangeable est bien corrélé à Na solution

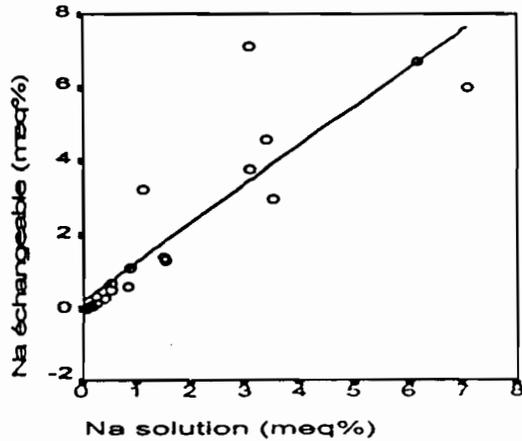


Fig. 30-
Nae/Nas sols non cultivés
niveau racines

○ Observed
— Linear

pente	ord.origine	Rsq
1.05	0.22	0.81

c) Prélèvements sur sols cultivés

La corrélation entre les deux grandeurs est moins forte qu'en a) et en b), et la pente différente. Pour des valeurs de Na en solution moindres, une quantité non négligeable de sodium peut se trouver sur le complexe (prélèvements en profondeur).

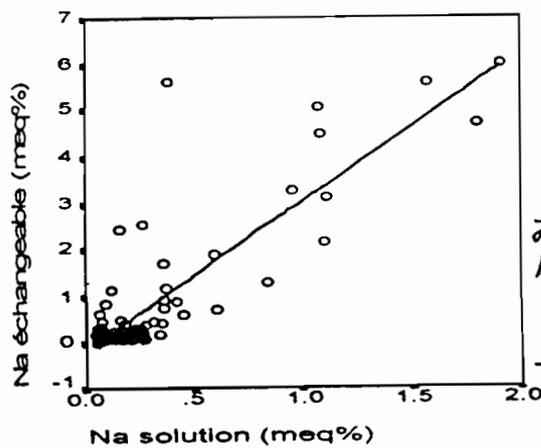


fig. 31-
Nae/Nas sols cultivés

○ Observed
— Linear

pente	ord.origine	Rsq
3.20	-0.15	0.72

4.4 Examen global des paramètres: tendances évolutives

4.4.1 Méthodologie

La prise de connaissance de l'échantillon et du comportement des paramètres mesurés permet non seulement une interprétation de certains phénomènes, mais aussi la sélection des grandeurs les plus susceptibles de contribuer à la détermination des tendances évolutives des sols irrigués. Par rapport aux variables retenues en début de chapitre, certaines ont ainsi été abandonnées car non exploitables (K échangeable, K solution, SO₄ solution), ou redondantes (conductivité électrique avec les chlorures en solution). De même, les ions du complexe ont été normés par rapport à la CEC, afin de s'affranchir des différences de concentration dues à la taille du complexe (i.e. à la texture).

Remarque:

Contrairement à nos prévisions, aucune différence n'a pu être mise en évidence dans le comportement des sols de texture distincte. Ce paramètre a donc été écarté de l'examen ultérieur des tendances évolutives.

A l'aide de ces variables, il a été procédé à trois analyses en composantes principales, dont deux seulement ont été retenues et discutées.

a) Première analyse

Variables retenues:

pH,
Na sol, ESP,
Ca sol, Ca éch./CEC,
Mg sol, Mg éch./CEC,
Cl sol

Il a vite été démontré que par cette sélection, seuls les sol riches en sels chlorurés émergeaient du lot de données. Ces sols ne faisant pas l'objet du travail, les paramètres de la solution du sol ont donc été normés par rapport à la concentration de chlorures.

b) Seconde analyse: normalisation des chlorures

Variables retenues:

pH,
Na sol/Cl, ESP,
Ca sol/Cl, Ca éch./CEC,
Mg sol/Cl, Mg éch./CEC

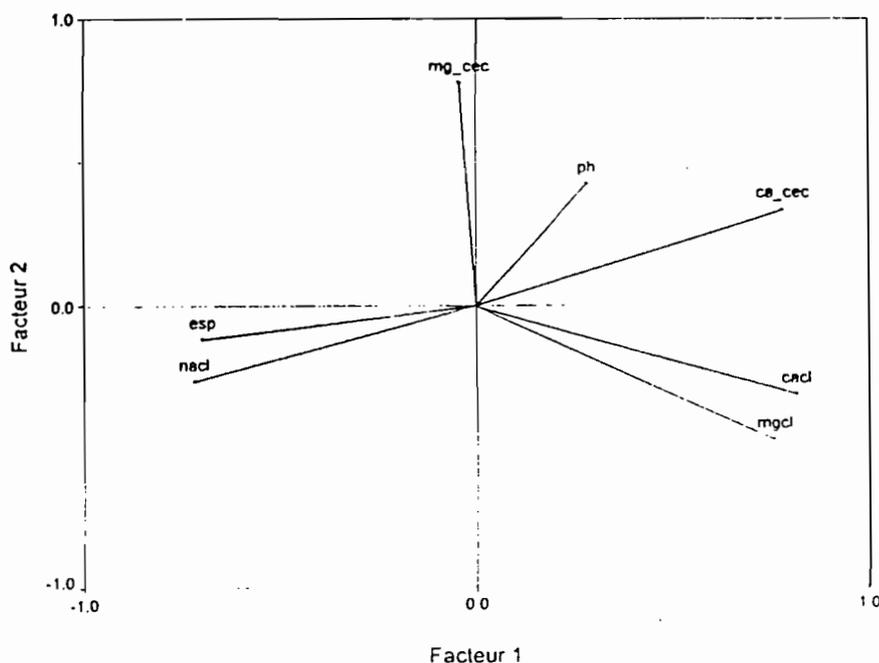
Matrice des corrélations en annexe I

Facteurs:

1er facteur: il oppose les bivalents en solution et le calcium échangeable à l'ESP et le sodium des chlorures

2ème facteur: surtout composé du Mg échangeable.

fig. 32 - Facteurs ACP Chlorures normés



Cette normalisation par rapport au chlorures a permis l'individualisation de certains nuages de points réunissant les âges de mise en culture au sein des groupes de périmètres (cf. annexe I).

Afin de mieux cerner le processus d'enrichissement en Na du complexe, une agrégation des deux ions bivalents (solubles et échangeables) a été effectuée, on obtient ainsi une troisième ACP.

c) Troisième analyse: normalisation des chlorures et groupement des ions bivalents

Variables retenues:

pH,
Na sol/Cl, ESP,
Bivalents sol/Cl, Bivalents éch./CEC

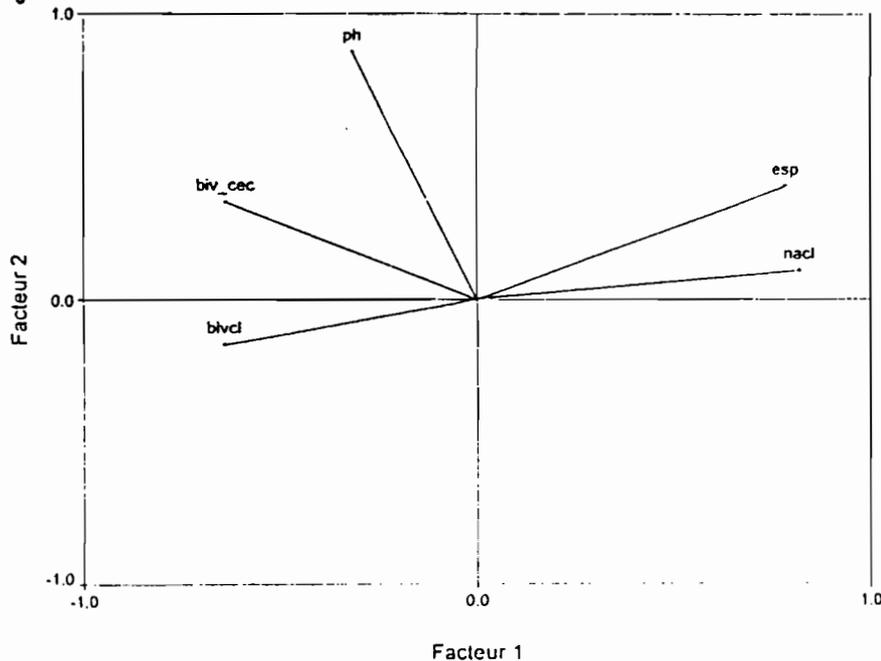
Facteurs:

1er facteur: discrimine entre les sols à ESP et chlorures sodiques et les sols à bivalents échangeables et chlorurés.

2ème facteur: presque intégralement constituée par le pH

Matrice des corrélations en annexe K

fig. 33 - Facteurs ACP Chlorures normés bivalents groupés



Cette dernière analyse réduit les variables introduites au maximum. L'individualisation d'autres nuages de points est alors réalisable (cf. annexe L).

4.4.2 Tendances évolutives

Une évolution unidirectionnelle n'a pu être mise en évidence pour l'ensemble des sols prélevés. La séparation et l'interprétation par groupe de périmètres s'est donc révélée indispensable. La stratégie d'échantillonnage n'a néanmoins pas été élaborée à cette fin et le nombre de prélèvements réduit par périmètre ne peut permettre d'interprétation fiable. Seules quelques tendances sont à dégager, qui ne font que confirmer celles remarquées auparavant à l'examen séparé des paramètres.

a) Dado

Un accroissement sensible du pH et de la part de cations bivalents sur la CEC émane de la mise en culture. En revanche, au sein des sols cultivés, aucune distinction entre âges de culture ne peut être effectuée. (*Annexe L*)

b) Donaye 1

Comme à Dado, le pH s'élève; en revanche, au niveau des cations échangeables, on assiste à une diminution du magnésium. Les paramètres tendent vers une certaine homogénéisation des valeurs. (*Annexe J*)

c) Guia

Pour ce périmètre, le sodium échangeable (ESP) et en solution (Na/Cl) semblent s'amenuiser progressivement au fur et à mesure de la culture. (*Annexe L*)

Comme pour Donaye 1, la dispersion des valeurs est moins forte pour les sols cultivés, qui ici paraissent tendre vers des sols à ESP faible et sels solubles rares.

d) It 2 - Betawe Ndiaye

La diminution des chlorures par la culture semble également affecter ces périmètres (il s'agit ici de chlorures calciques et magnésiens). Le pH et la part de bivalents sur la CEC s'accroissent lors de la mise en culture; cependant le périmètre le plus âgé (It 2) atteste une moins grande différence avec les sols sans culture que le périmètre récent (B. Ndiaye). (*Annexe J et L*)

e) It4 - Arsuka

Ce sont à nouveau les variations de pH et des bivalents solubles et échangeables qui se manifestent. Ici néanmoins, la culture semble provoquer une diminution de ces deux grandeurs. (*Annexe L*)

5. Interprétation

Si l'évolution des sols irrigués ne fait aucun doute - bonne individualisation des nuages de points sur les analyses en composantes principales - elle ne conduit manifestement pas à une dégradation (ESP et pH augmentant, présence massive de carbonates, etc.). De plus l'évolution semble plus conditionnée par des facteurs stationnels que par le nombre de campagnes.

Quelques phénomènes seront mis en évidence ci-après qui ne pourront être confirmés et expliqués qu'à l'aide d'investigations plus poussées, proposées ultérieurement.

5.1 Sodium des sols non cultivés.

La source de sodium se situe principalement dans la nappe salée d'origine marine, dont la composition chimique exacte n'a pas été étudiée dans le cadre de ce travail. On peut alors supposer que celle-ci n'a pas salinisé et sodisé les sols jusqu'en surface. Au sommet du profil, l'ESP est plus faible et la salure, si elle existe, n'est pas chlorurée sodique uniquement. Dans certains cas l'ESP et le Na en solution, même au niveau des racines, est minime (IT4 - Arsuka), on peut alors supposer que la limite d'influence de la nappe se situe plus bas. En revanche, elle semble jouer un rôle jusqu'à 40 cm au moins dans les autres sols non cultivés prélevés.

5.2 Sodium des sols cultivés.

Comme évoqué au paragraphe 4.4.2, l'évolution prend deux voies. L'une, suivie par la plupart des périmètres, semble se marquer par une diminution des Na soluble (à considérer avec réserve, vu le choix des situations les moins salées) et échangeable par l'eau d'irrigation. On n'assiste donc pas à l'évolution prévue au chapitre 2. Des hypothèses quant aux raisons de cette résistance des sols seront discutées plus loin.

La voie suivie par It4-Arsuka reste à expliquer. Il a été supposé plus haut que l'influence de la nappe aux profondeurs prélevées était faible sur les sols nus. On peut néanmoins supposer que l'irrigation fait remonter la nappe jusqu'en surface, le comportement hydrodynamique étant dans ce cas opposé à celui des autres périmètres pour une raison qui reste à déterminer. Il est également possible d'attribuer la hausse de l'ESP de ce groupe de périmètres à une eau d'irrigation éventuellement sodisante. En effet, il faut relever que ce groupe est le seul irrigué par le Gayo, source d'eau n'ayant pas fait l'objet d'analyses. L'hypothèse selon laquelle sa composition est proche de celle du Fleuve serait donc à vérifier. L'eau du Gayo montre ainsi peut-être un SAR sensiblement plus élevé que celle-ci.

5.3 Evolution du complexe d'échange

La baisse de l'ESP dans la plupart des périmètres ne s'accompagne pas d'une réduction conjointe du taux de saturation. Le sodium du complexe est remplacé par des cations bivalents, comme le confirment les résultats de l'ACP, et la saturation se maintient. Ceci apporte encore un démenti à l'hypothèse de l'alcalinisation par irrigation. Si le complexe s'enrichit en calcium, c'est que le mécanisme est ralenti par la présence de grandes quantités de calcium soluble et non carbonaté, ce qui n'a néanmoins pas pu être démontré par les mesures de conductivité électrique.

L'hypothèse selon laquelle l'eau se concentre d'un facteur d'environ 18 à chaque campagne est également à discuter. Il semblerait plutôt que la dynamique se rapproche d'un lessivage, auquel cas le maintien, voire l'augmentation de la saturation malgré une eau faiblement pourvue en cations n'est pas éclairci. Toutefois, ce comportement hydrodynamique serait surprenant pour des sols riches en argile, soumis à climat aride et de surcroît non drainés... De plus, une différence entre les sols de cuvette et les sols à texture mélangée devrait dans ce cas être perceptible. Dans des conditions de lessivage, on peut s'attendre à retrouver le sodium plus bas dans le profil, ou même dans la nappe, des mesures dans cette direction s'imposent.

5.4 pH

L'irrigation semble affecter le pH, dans le sens d'une différenciation entre surface et profondeur. Trop d'éléments intervenant lors de la mise en culture (changements dans la quantité de matière organique, l'aération, l'activité biologique,...) interviennent pour que ce comportement soit interprété.

5.5 Enrichissement en carbonates

La simulation de concentration des eaux d'irrigation fait apparaître des risques importants d'alcalinisation des sols. De même, un calcul simple de la quantité de carbonates apportés dans le sol à chaque campagne (*Annexe M*) présage d'une accumulation rapide. La non-accumulation des carbonates est donc à attribuer à une transformation en CO₂ gazeux et/ou une accumulation de carbonates dans les horizons inférieurs (le mouvement descendant concordant peut-être avec les constatations faites pour le sodium).

5.6 Rapport Ca/Mg échangeable

Les différences de rapport entre les deux principaux cations bivalents du complexe, partiellement liés à des paramètres stationnels, sont probablement dues à diverses compositions de la fraction argileuse.

6. Propositions de recherche

L'évolution des périmètres suivant des voies souvent fort différentes, il paraît illusoire de vouloir les grouper pour un suivi global de la qualité du sol. De plus, la couverture du nombre de périmètres implique la réduction du nombre d'échantillons prélevés pour chacun d'entre eux, ce qui rend douteuse la validité des observations et difficile leur interprétation.

Au terme de cette recherche, il apparaît cependant que la sodisation et l'alcalinisation des sols irrigués n'est pas un phénomène dominant. Des investigations plus poussées concernant les mécanismes de résistance à cette forme de dégradation et leur durabilité passent forcément par une étude plus ciblée sur un, voire deux groupes de périmètres.

Ainsi, un échantillonnage plus intensif pourra être effectué et un plus grand nombre de paramètres abordés.

Plus concrètement, il semble indiqué d'obtenir des informations sur.

- la quantité de carbonates et de sulfates dans le profil,
- l'état chimique du sol à des profondeurs supérieures à 60 cm,
- la position et les fluctuations de la nappe au cours de l'année, ainsi que sa composition chimique.
- le comportement hydrodynamique global des sols irrigués.

Une deuxième approche serait le suivi de terrain sur un sol dont la culture débute, ce qui permet la comparaison exacte des états non cultivé et cultivé.

Dans la région de Podor, la salinisation des terres irriguées paraît néanmoins un phénomène plus répandu et plus actuel, sur lequel il serait bon de concentrer le maximum d'efforts.

Conclusion

Un premier diagnostic de l'état des sols irrigués de la région de Podor n'a pas permis de mettre en évidence de dégradation par la voie alcaline. Une évolution chimique, dont le sens diffère selon les cas, est cependant perceptible. Des recherches complémentaires sont donc indispensables à la compréhension des phénomènes de résistance des sols, soumis à l'action d'une eau aux propriétés alcalisantes prouvées. Parmi ceux-ci, on peut avancer l'hypothèse d'un comportement hydrodynamique différent de celui postulé dans notre démarche, les mouvements descendants semblant prendre le pas sur les phénomènes de concentration prévus. La présence de sels calciques non carbonatés, surtout de gypse, non démontrable par la méthode analytique choisie, est également à vérifier. Cette dernière ne pourrait néanmoins que retarder la progression vers la voie carbonatée, prévisible dans le cas d'une concentration rapide de l'eau d'apport.

Cette étude, qui est la première consacrée à la problématique de la sodisation/alcalinisation dans la Moyenne vallée du fleuve Sénégal, pose ainsi les premiers jalons d'une recherche plus approfondie. Le bilan régional réalisé permettra ultérieurement de cibler les efforts sur la compréhension des comportements les plus caractéristiques.