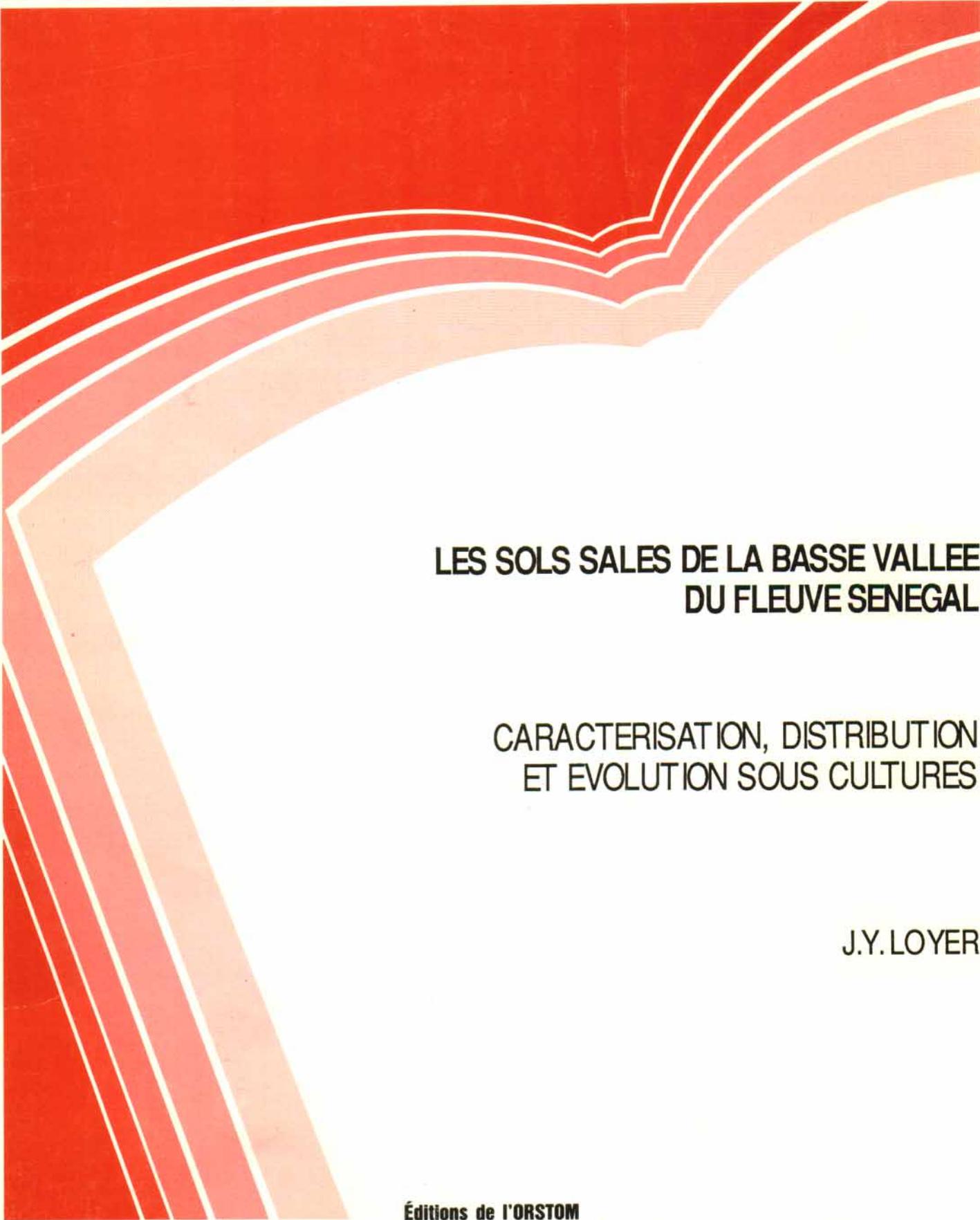


# Etudes et Thèses

The graphic design features a series of overlapping, curved lines in various shades of red and white. These lines originate from the top right and curve downwards and to the left, creating a sense of movement and depth. The background is a solid, vibrant red.

## LES SOLS SALES DE LA BASSE VALLEE DU FLEUVE SENEGAL

CARACTERISATION, DISTRIBUTION  
ET EVOLUTION SOUS CULTURES

J.Y. LOYER

Éditions de l'ORSTOM

INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

Hélène DARDENNE

Secrétaire Exécutif

du Comité des Editions de FORSTOM

u.c.t.s

J.Y. LOYER

**LES SOLS SALES DE LA BASSE VALLEE  
DU FLEUVE SENEGAL**

**CARACTÉRISATION, DISTRIBUTION  
ET ÉVOLUTION SOUS CULTURES**

---

**Éditions de l'ORSTOM**

INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

Collection **ÉTUDES et THÈSES**

PARIS 1989

La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (alinéa 1<sup>er</sup> de l'article 40).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

A LA MEMOIRE de Jean-Yves LE BRUSQ

REMERCIEMENTS.

L'auteur remercie les responsables des différents services de la S.A.E.D. (Société d'Aménagement et d'Exploitation des Terres du Delta) et leurs agents, pour leur contribution à la collecte de données sur le terrain et la communication de précieux renseignements agronomiques, en particulier MM Arouna FALL, Aly mohamed DIALLO, Ibrahima DIEME et Ousman SY, ainsi que M. FILNOIS responsable de la S.O.C.A.S. (Société des Conserves Alimentaires du Sénégal) à Savoigne, pour la fourniture des données évaporation.

## R E S U M E

La basse vallée du fleuve Sénégal est fortement marquée par une salinité marine résiduelle qui affecte loin vers l'amont les sols et les eaux des nappes superficielles. Cette salinité d'origine lagunaire ancienne, chloruro-sulfatée sodique et magnésienne, neutre à l'origine, a été influencée par l'acidité potentielle de la mangrove initiale. Dans le système naturel elle évolue actuellement dans le sens d'une concentration ascendante superficielle sous l'effet du climat très évaporant, et latéralement et longitudinalement, dans le sens d'une dilution sous l'influence des eaux douces de la crue du fleuve. Ces phénomènes induisent des variations de composition ionique des solutions, des précipitations (gypse) et des réactions d'échange avec les argiles (sodisation). Dans le système aménagé par irrigation sans drainage, la riziculture sous submersion permanente favorise, par rapport aux spéculations à irrigation intermittente, un dessalement important, d'abord des sols puis des eaux de nappe ; elle provoque par contre une alcalisation de ces sols due à une remontée de la nappe dont les mouvements sont mal contrôlés. Par ailleurs se pose le problème de l'évacuation des eaux d'exhaure des périmètres de culture, qui actuellement sont recyclées par des voies diverses, (nappes, vent). Dans le nouveau contexte de l'après-barrage, l'évacuation définitive de ces eaux superficielles mélangées à celles de la nappe alluviale peu profonde, pourraient permettre l'évolution de la salinité de la basse vallée vers un type sulfaté calcique, puis à beaucoup plus long terme bicarbonaté, nettement moins toxiques que la salinité chlorurée sodique actuelle.

## ABSTRACT

The lower Sénégal Valley is seriously affected by soil and water table salinity. This salinity with chloride and sulphate, sodium and magnesium is of ancient neutral marine origin interferred later on with potential acidity of the mangrove. It extends for inside the water basin. Nowadays the salts are under the dependance of severe evaporation. In addition their lateral distribution depends on the diluting effect of annual flood from the river. These phenomena induce variations of the ionic composition, precipitations (mainly gypsum), exchanges with clays (sodisation).

Rice cropping by irrigation without drainage induces desalinisation of soils and later on of the water table, but acts in favor of alcalisation. Evacuation of drainage water would lead to a salinity dominated by sulfate and calcium ions instead of sodium chloride as the case now ; long term evolution would be a salinity dominated with carbonate anions.

## AVANT-PROPOS.

La présente étude prend en compte un certain nombre de résultats des nombreux travaux entrepris sur la vallée depuis plusieurs années par divers pédologues et qui se sont intensifiés sur les problèmes de salure des sols à partir de 1978 grâce aux études de E. BRAUDEAU, J. BRITO, M. CHEVAL, M.A. DIALLO, I. DIEME, Ph. JOIN, J.Y. LE BRUSQ, J.Y. LOYER, B. MOUGENOT, A. M'TIMET L. SEINY-BOUKAR, P.ZANTE, dans le cadre d'un protocole général d'études établi entre l'ORSTOM et la SAED (Société nationale d'Aménagement et d'Exploitation des Terres du Delta).

Une partie de cette étude répond à une convention particulière signée entre ces deux organismes et dont l'un des objectifs principaux était de cerner l'influence jouée par certains paramètres pédologiques, principalement la salure, sur la productivité des sols de la basse vallée et au cours de laquelle des expérimentations ont été mises en place et suivies dans le Delta entre 1980 et 1984 (J.Y. LE BRUSQ - J.Y. LOYER).

## S O M M A I R E

### INTRODUCTION

Première partie : Caractères généraux du milieu naturel dans la basse vallée.

Deuxième partie : Les sols salés de la basse vallée.

- A - Caractérisation de la salinité.
- B - Distribution de la salinité.

Troisième partie : Evolution des sels sous l'influence de la mise en valeur.

- A - Les interventions humaines dans la vallée.
- B - Expérimentation : évolution de la salinité des sols et des eaux en relation avec la riziculture submergée dans le Delta du fleuve.

Conclusion générale.

## INTRODUCTION

Au Sénégal on estime à environ 1 000 000 d'hectares, représentant 5 % du territoire national, la superficie des sols affectés à des degrés divers par les sels au sens large. Cette salure se présente originellement sous deux aspects :

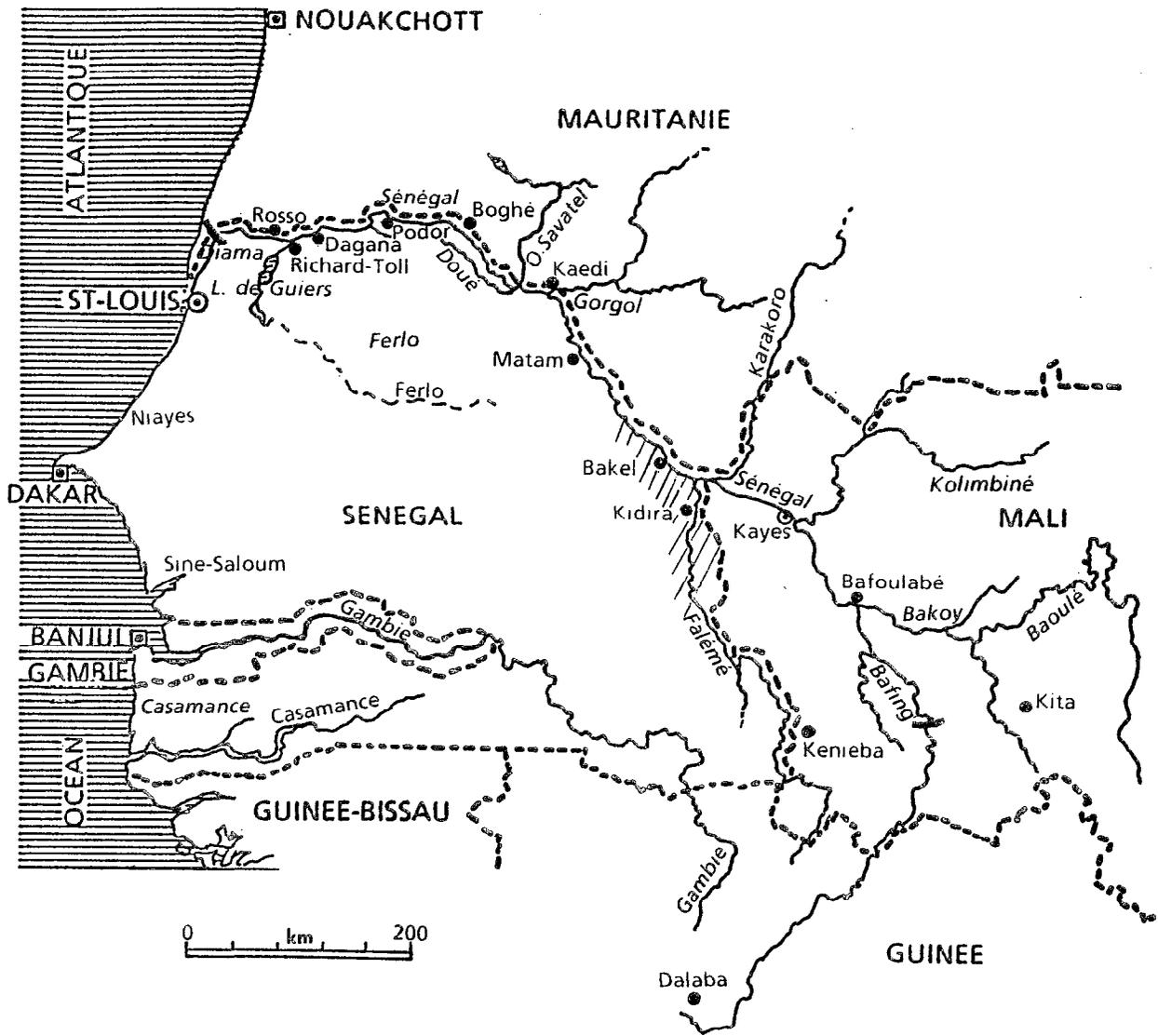
Dans la partie Est du territoire, en domaine continental de la région de Bakel (fig. 1), il s'agit d'une salure alcaline d'origine pétrographique, provoquée par les cations issus de l'altération des roches éruptives affleurantes. Le sodium et le magnésium libérés et véhiculés par les eaux superficielles se fixent sur le complexe adsorbant des sols, et en l'absence de sels solubles, leur confèrent des caractères structuraux particuliers induisant un comportement hydrique défavorable.

Dans toute la partie Ouest du territoire, le long de la bande côtière, il s'agit par contre d'une salure neutre chloruro-sulfatée sodique et magnésienne d'origine marine. Elle est soit fossile, issue d'anciennes invasions océaniques quaternaires larges et profondes à l'intérieur du continent, et aujourd'hui piégée dans les sédiments de remplissage (alluvions du Fleuve et dépressions interdunaires des Niayes) ; soit actuelle, liée à des intrusions marines saisonnières dans le lit des cours d'eau ou dans les nappes phréatiques ; le déficit pluviométrique de ces dernières années a encore tendance à accentuer celle-ci dans la partie aval des trois principaux bassins-versants du territoire (Fleuve, Siné-Saloum et Casamance).

- Sous ces climats tropicaux contrastés à très longue saison sèche et à fort pouvoir évaporant, ces sels sont le plus souvent conservés dans les différents milieux et ont plutôt tendance à se concentrer dans les solutions des sols et dans les eaux, influençant la physionomie de ces paysages sahéliens, soudaniens et même guinéens jusqu'au Sud du territoire.

- Par contre sous l'influence anthropique, ils peuvent présenter une dynamique différente sous l'impact de la mise en culture et des aménagements hydro-agricoles en particulier dans la vallée du fleuve Sénégal où ils représentent par ailleurs une contrainte parfois sévère de la mise en valeur agricole. Les projets d'irrigation déjà élaborés, et qui ne font que préfigurer les grands aménagements futurs de l'après-barrage, ont déjà des incidences visibles sur la dynamique de ces sels dans les sols et les paysages nouvellement aménagés.

Il paraît aujourd'hui important de caractériser et de suivre l'évolution des sols affectés, de façon à maîtriser les nouvelles distributions salines que pourront induire ces diverses interventions et préserver ces milieux particulièrement sensibles d'une éventuelle dégradation.



 Sites des barrages  
 sols alcalisés du haut bassin

Fig. 1 Le bassin du fleuve Sénégal

## PREMIERE PARTIE

## CARACTERES GENERAUX DU MILIEU NATUREL DE LA BASSE VALLEE.

\*\*\*\*\*

## 1. LE BASSIN DU FLEUVE SENEGAL.

Issu du massif du Fouta Djallon où il est soumis à un climat de type guinéen à précipitations abondantes, ce fleuve allogène atteint l'Atlantique à Saint-Louis du Sénégal, en domaine sahélien nettement plus sec, après avoir traversé sur 1 800 km des régions très contrastées qui peuvent être dans la partie sénégalaise, séparées en deux grands ensembles (Fig. 1) :

- Le haut bassin à l'amont de Bakel, où la partie alluviale de la vallée est réduite et alimentée par un réseau dense de cours d'eau issus de zones relativement montagneuses, avec en particulier dans cette partie sénégalaise du bassin, des massifs de roches éruptives qui fournissent les ions responsables de la salure alcaline. (cf § 8).

- Le bassin inférieur, où le relief s'aplanit très nettement et la vallée s'élargit ; le fleuve atteint difficilement la mer au travers de la vaste plaine sénégaléo-mauritanienne en y traçant de nombreux méandres. C'est là, dans la vallée proprement dite, et en particulier dans sa partie la plus aval, le Delta, que se manifeste la salure de type chlorurée et d'origine marine.

Cette distinction géographique se marque dans tous les éléments du milieu naturel, climat, géologie, morphologie, hydrologie, pédologie, végétation, et aussi dans l'occupation humaine. C'est dans la basse vallée en effet que se sont concentrées depuis toujours les activités fluviales, puis agricoles des populations, alors que la haute vallée moins fertile, est plutôt orientée vers des activités pastorales et forestières. Ces différents éléments du milieu physique et humain ont fait l'objet d'importants travaux de recherche parmi lesquels il faut citer les études géomorphologiques de J. TRICART, P. MICHEL, M. SALL, hydrologiques de C. ROCHETTE, J.Y. GAC, géographiques de A. LERICOLLAIS, S.M. SECK, botaniques de H. POUPON, et pédo-agronomiques de très nombreux chercheurs ORSTOM, FAO, ou ISRA.

## 2. APERCU SEDIMENTOLOGIQUE.

Si l'histoire géologique de la basse vallée a pu être retracée depuis le Jurassique, puis l'Eocène et le Miocène (P. MICHEL 1973), c'est en fait surtout à la période Quaternaire que s'est façonnée la morphologie de la vallée, sous l'influence des fluctuations climatiques alternativement sèches et humides qui ont affecté les débits continentaux et le milieu marin lui-même (MONTEILLET J. 1986).

- Après les phases de creusement du Quaternaire ancien et moyen au cours desquelles s'est façonné un vaste golfe marin, c'est au Quaternaire récent que la basse vallée prend progressivement son faciès actuel : Sous la phase aride de l'Ogolién (20 000 ans B.P.), les ergs anciens, à sables rubéfiés, sont modelés en cordons dunaires orientés NE-SW, qui ferment progressivement l'accès à la mer, soumettant la vallée à un régime endoréique.

- A cette phase de remblaiement succède vers 10 000 B.P., une phase pluviale qui opère un recreusement du lit du fleuve à travers ces dunes jusqu'à la mer, ce qui, vers 5 500 ans B.P., permet une intrusion marine très loin en amont atteignant Bogué et transformant la basse vallée en une vaste ria. Ainsi, par étalement des sables, se sont façonnés les niveaux de terrasses que l'on trouve aujourd'hui sur les bords de la vallée ; par ailleurs, des formations de vases marines ont été décelées très loin en amont jusqu'à Bogué (P. MICHEL 1973).

- A partir de 4 000 ans B.P., la dérive océanique favorise le façonnement de cordons littoraux sableux repris par le vent en un système de petites dunes jaunâtres qui barrent partiellement l'accès du fleuve à la mer. C'est à cette époque que la vallée prend sa morphologie définitive de pseudo-delta par colmatage progressif de l'ancienne lagune. Le fleuve en effet édifie sous l'influence d'une abondante sédimentation post nouakchottienne ses grands bourrelets de berge. Ultérieurement, sous l'influence d'une phase plus aride qui limite ses débits, le cours d'eau serpente sur une pente infime et trace des méandres en sapant progressivement ces hautes levées et en façonnant des systèmes de petites levées subactuelles allongées, plus basses, de texture légère, et d'autres accumulations deltaïques. Celles-ci isolent des dépressions où les eaux du fleuve décantent progressivement leurs argiles façonnant les cuvettes ou les sebkhas plus maritimes.

Au plan pédologique, les conséquences de cette morphogénèse sont :

- L'existence de zones alluviales plus ou moins hautes, levées fluviales et dépôts fluvio-deltaïques constitués de sédiments complexes relativement grossiers, sableux à sablo-limoneux principalement, parfois plus argileux pour les parties les plus basses du fluvio-deltaïque.

- En association avec ce système de levées, l'individualisation de zones basses de décantation, cuvettes, sebkhas, vasières, constituées de matériaux fins argileux à très argileux (jusqu'à 60-70 % d'argile) à kaolinite dominante, reposant localement sur d'anciennes vases lagunaires.

- La présence partout en profondeur sous ces dépôts (entre 0,3 m et 3 m dans les cuvettes), de sables fins remaniés provenant de l'étalement des sables nouakchottiens.

Le fait que ces formations se soient édifiées en milieu originellement marin plus ou moins confiné, a fait qu'elles ont toutes incorporé des sels dont on retrouve aujourd'hui les traces jusqu'à 350 km de l'embouchure soit dans les sols, soit dans les nappes partout présentes en profondeur. Une pédogénèse hydrique et une pédogénèse saline caractérisent donc essentiellement l'évolution de ces matériaux.

### 3. LE CONTEXTE CLIMATIQUE.

La basse vallée est couverte par le domaine sahélien et plus précisément par le secteur sahélo-saharien à deux saisons très contrastées :

- Une courte saison des pluies de deux à trois mois caractérisée par des précipitations faibles et inférieures à 400 mm, dont l'isohyète limite la bordure Sud du bassin, et de plus en plus faibles en allant vers le Nord. D'Est en Ouest, les variations sont peu sensibles, ainsi que l'attestent les relevés des trois principaux postes, Podor, Dagana et Saint-Louis qui couvrent le domaine salé de la basse vallée, (respectivement 325, 313 et 350 mm de précipitations pour la période 1930 - 1965).

- Une très longue saison sèche de 9 à 10 mois, ayant un indice xérothermique de 290 jours sans pluie entre Octobre et Juillet, selon les normes du diagramme de GAUSSEN.

La température de l'air est élevée, avec un gradient sensible et régulier d'Ouest en Est, passant de 25° C de moyenne annuelle sur la côte à Saint-Louis, à près de 30° C vers l'intérieur.

Le régime des vents est important à considérer sous ces climats secs par ses effets de dessèchement, d'arrachement et de transport de matériaux. Dans la zone du Delta, ces vents, à direction préférentielle Nord à Nord-Est, mais pouvant aussi venir de toutes les directions, soufflent en moyenne 260 jours par an à des vitesses supérieures à 50 km/h ; ils provoquent d'importants arrachements et mouvements de particules, avec accumulations diverses, simple voile éolien, nebkhas, lunettes, dunes. Vers l'intérieur, le caractère desséchant se fait plus sentir que sur la côte soumise aux alizés maritimes, par l'influence de l'harmattan dont les effets accentuent encore la sécheresse de la région.

L'évaporation calculée par la formule de Penman, est de 2 400 mm en moyenne ; elle est loin d'être satisfaite par la pluviosité et le déficit hydrique est important pendant toute la saison sèche, avec une moyenne évaporatoire de l'ordre de 7 mm par jour mais pouvant atteindre 15 mm/jour.

Le climat de la basse vallée, à l'instar de toutes les régions sahéliennes, tend depuis ces quinze dernières années vers une aridité nettement plus marquée, avec, non seulement un déficit hydrique important par rapport à la période antérieure (de l'ordre de 150 mm par an), mais aussi un rétrécissement de la saison pluvieuse aujourd'hui réduite à deux mois par an au lieu de trois autrefois.

l'influence du facteur pluviométrique est relativement faible sur l'évolution per descensum des sols salés, le drainage étant pratiquement nul, hormis dans quelques zones basses soumises à des accumulations d'eaux de ruissellement. Par contre, le facteur thermique a une importante considérable sur la dynamique per ascensum de l'eau et des solutés dans les sols, favorisant les concentrations salines en surface. Le vent par ailleurs est un élément important d'abrasion et de transport, particulièrement actif dans toute la zone du Delta peu protégée par la végétation.

#### 4. LA VEGETATION NATURELLE.

la couverture végétale naturelle des sols de la basse vallée est caractérisée, à l'extérieur de la zone inondable, par un peuplement arboré et arbustif clair, typique de la zone

sahélo-sahérienne, avec dominance d'*Acacia radiana*, *Balanites aegyptiaca*, *Boscia senegalensis* etc..., qui occupe la bordure du lit majeur, tandis que dans la vallée proprement dite, un peuplement hydrophile en voie de dégradation accélérée, occupe la zone alluviale basse. Représenté par un beau peuplement arboré d'*Acacia nilotica* ("Gonakié"), aux environs de Podor et dans l'île de Morfil, il est aujourd'hui en voie de disparition sous l'influence conjuguée de la sécheresse de l'endiguement et de l'exploitation humaine.

Dans la partie aval du Delta, près de l'embouchure, aux environs de Saint-Louis et dans le Gandiolais, une mangrove deltaïque relique à petits palétuviers (*Rhizophora mangle* et *Avicennia africana*), se maintient ; elle est considérée comme l'une des plus septentrionales des mangroves atlantiques (C. MARIUS 1985). Cette formation a eu au cours du Quaternaire, une extension beaucoup plus importante vers l'amont puisque des traces en ont été retrouvées, sous forme de racines fossilisées et de pollens, jusqu'à Bogué (P. MICHEL 1967). Cette formation particulière, fixatrice de sulfures, a eu une forte influence sur l'évolution physico-chimique de la plupart des sols du Delta qui ont gardé des traces de manifestations acides dues à la présence de sulfates en grande quantité et seulement partiellement neutralisés aujourd'hui.

A partir de ces palétuviers en allant vers le domaine continental, la séquence végétale arborée spécifique de la salure se poursuit avec des *Tamaris senegalensis*, abondants dans tout le Delta, puis des *Prosopis juliflora* et des *Acacia senegal* relativement tolérants aux sels. Parmi les herbacées vivaces, certaines espèces telles que *Borreria verticillata* et *Indigofera oblongifolia* occupent les sols de levée et de bordure de cuvette légèrement affectés par la salure ; en milieu plus salé, des halophytes plus strictes sont présentes sous forme de steppe basse et discontinue avec, *Sueda fruticosa*, *Arthrocnemum glaucum*, *Philoxerus vermicularis*, *Sesuvium portulacastrum*, *Cressa cretica*.

## 5. REGIME HYDROLOGIQUE.

### 5.1. Le régime hydrologique naturel.

A l'aval de la partie montagneuse de son bassin, à partir de Bakel, le fleuve Sénégal a édifié une longue plaine alluviale dans laquelle le lit mineur serpente avec de nombreux méandres en raison de la pente infime de cette partie du bassin versant. Il lui succède à l'aval de Richard-Toll, une vaste zone deltaïque débouchant sur la mer à travers un

cordon littoral fluctuant et isolant localement des zones lagunaires plus ou moins endoréiques (sebkhas). Le lit principal est doublé de Kaédi à Podor par un important défluent le Doué, auquel succèdent vers l'aval une série de petits marigots défluents (le Ngalenka, la Taouey, le Lampsar, le Gorom), à régime endoréique ou en confluence avec le fleuve (fig. 1 et 17). Une des caractéristiques principales du profil longitudinal de la basse vallée, est sa pente infime passant de 0,002 ‰ entre Boghé et Richard-Toll à pratiquement 0 ‰ en aval dans le Delta.

Au plan hydrologique du fait de la situation du haut bassin couvert par le domaine tropical humide du Fouta Djallon qui l'alimente à l'amont, et dans sa partie aval par le domaine sahélien pratiquement sans écoulement, la basse vallée est caractérisée par un régime hydrologique annuel à deux périodes très contrastées :

- Un régime de crue entre Août et Novembre, saison des pluies d'hivernage où les eaux sont abondantes et de bonne qualité (37 à 75 mg/l de charge dissoute). En plus de la variabilité interannuelle des débits écoulés, un des traits principaux de l'évolution récente est la diminution très sensible des volumes écoulés annuellement qui sont passés de 20 à 25  $10^9$  m<sup>3</sup> en moyenne avant 1965, à des volumes très déficitaires, atteignant un minimum de 7  $10^9$  m<sup>3</sup> dans la basse vallée, en 1983-84 (J.Y. GAC et A. KANE 1985).
- Un régime d'étiage caractérisé par de faibles débits, de l'ordre de 600 m<sup>3</sup>/sec à l'embouchure (C. ROCHETTE 1964-1974) qui, associé à la très faible pente longitudinale fait que chaque année à partir du mois de Décembre, le lit mineur et certains défluents et cuvettes du Delta sont contaminés par une intrusion marine océanique dont les effets saumâtres peuvent se faire sentir (à une salinité supérieure à 0,1 g/l), très loin en amont, atteignant certaines années Podor à 240 km de l'embouchure. Ce phénomène affecte de façon progressive la basse vallée pendant plusieurs mois par an, et influence considérablement la mise en valeur hydro-agricole, nécessitant des aménagements particuliers.
- En régime naturel, l'arrivée de la crue provoquait par refoulement de ces eaux saumâtres occupant le cours inférieur du fleuve, une inondation à l'eau salée de certaines cuvettes du Delta qui étaient ainsi alimentées en sel jusqu'à une époque récente.

Au plan qualitatif ce double phénomène hydrologique différencie dans la vallée, en dehors de tout aménagement, trois zones :

- Une zone amont que les eaux saumâtres n'atteignent jamais, située aux environs de Podor, et variable selon les années. Les eaux y restent douces toute l'année.
- Une zone dite tampon, influencée par la contamination marine au delà d'un seuil de 0,1 g de sel par litre, pendant un maximum de 260 jours et limitant la période culturale à un seul cycle d'irrigation.
- Une zone aval où l'intrusion des eaux salées est plus importante, interdisant toute utilisation agricole de l'eau.

## 5.2. Le régime hydrologique après aménagements.

Le rythme du fleuve s'est vu progressivement modifié pour des raisons hydro-agricoles. En 1964 à l'initiative de la Mission d'Aménagement du Sénégal (MAS), une digue de ceinture contre les débordements a été édiflée côté Sénégalais sur 80 km entre Dakar-Bango et Richard-Toll. Plus en amont, de vastes périmètres rizicoles sont ceinturés par la SAED de digues de protection (Dagana, Nianga, Guédé). La crue est partiellement maîtrisée dans ses débordements ainsi que les divagations salines qui deviennent très limitées dans le lit majeur. Des réserves d'eau douce sont créées dans les défluent (vallée du Lampsar, Taouey, et canal IV à Dagana) ; elles permettent pendant la période d'étiage saumâtre de boucler le cycle de certaines spéculations maraîchères.

La maîtrise totale de cette invasion saline intervient d'abord provisoirement et pour des raisons conjoncturelles pour compenser les crues déficitaires de 1983 et 84, par la création de la digue antisel de Kheune dans le lit mineur lui-même, à 114 km de l'embouchure. Elle est enfin définitive en novembre 1985 après la fermeture du barrage de Diama à seulement 36 km de l'embouchure ; barrage au fil de l'eau, il permet en outre un stockage de quelques 250 à 500 millions de m<sup>3</sup> selon la cote de retenue. il est d'ores et déjà complété côté amont par le barrage réservoir de Manantali (fermeture en juin 1987), régulateur de crue qui permettra de stocker et de libérer progressivement quelques 11 milliards de m<sup>3</sup> d'eau de bonne qualité, avec un débit régulé. Les conditions naturelles d'écoulement seront alors totalement modifiées. La première crue artificielle est prévue pour 1988.

## 6. HYDROGEOLOGIE.

En dehors de la nappe profonde fossile dite du Maestrichien qui couvre tout le bassin sédimentaire-sénégalomauritanien et la vallée du fleuve, et à côté de la nappe du continental terminal située dans le Ferlo en dehors de la vallée proprement dite, une nappe alluviale superficielle est présente dans tout le lit majeur. Son niveau aquifère principal est formé par les sables nouakchottiens situés sous les alluvions elles-mêmes et sa profondeur piézométrique diminue de l'amont vers l'aval (inférieure à 2 mètres dans le Delta), pour une épaisseur moyenne estimée à 25 mètres. En raison de l'hétérogénéité des alluvions et de leur stratification lenticulaire plusieurs nappes plus ou moins interdépendantes existent.

Ces nappes sont, au moins à proximité immédiate du lit mineur, sous la dépendance du niveau du fleuve, mais celle-ci paraît limitée à quelques dizaines de mètres du lit mineur (150 m à Kheune), (J.L. SAOS et P. ZANTE, 1985, M.A. DIALLO et al. 1985), probablement en raison des discontinuités texturales des matériaux alluviaux (présence de deltas de rupture en particulier). Actuellement l'alimentation verticale de cette nappe par les eaux de pluie ou de débordement du fleuve est réduite en basse vallée par la présence des endiguements et la diminution des débits liée à la sécheresse, ce qui n'est, par ailleurs, pas sans effet sur le peuplement naturel arboré (*Acacia nilotica*) ; par contre elle subit d'importantes fluctuations piézométriques saisonnières sous l'influence de la riziculture submergée dont les apports sont de quelques 12 000 m<sup>3</sup>/ha en une campagne, pendant une centaine de jours. En dehors de cette période, elle est soumise à l'évaporation par remontées capillaires, et le fait qu'elle soit souvent très chargée en sels solubles n'est pas sans influence sur la qualité des sols et le rendement des cultures.

## 7. PEDOLOGIE.

Les sols de la vallée ont fait l'objet de plusieurs inventaires cartographiques parmi lesquels le plus complet est celui du projet SEDAGRI-OMS (1973) qui a réalisé une étude à 1/50 000 depuis Bakel jusqu'à la mer couvrant les deux rives, sénégalaise et mauritanienne, sur 11 200 km<sup>2</sup> environ.

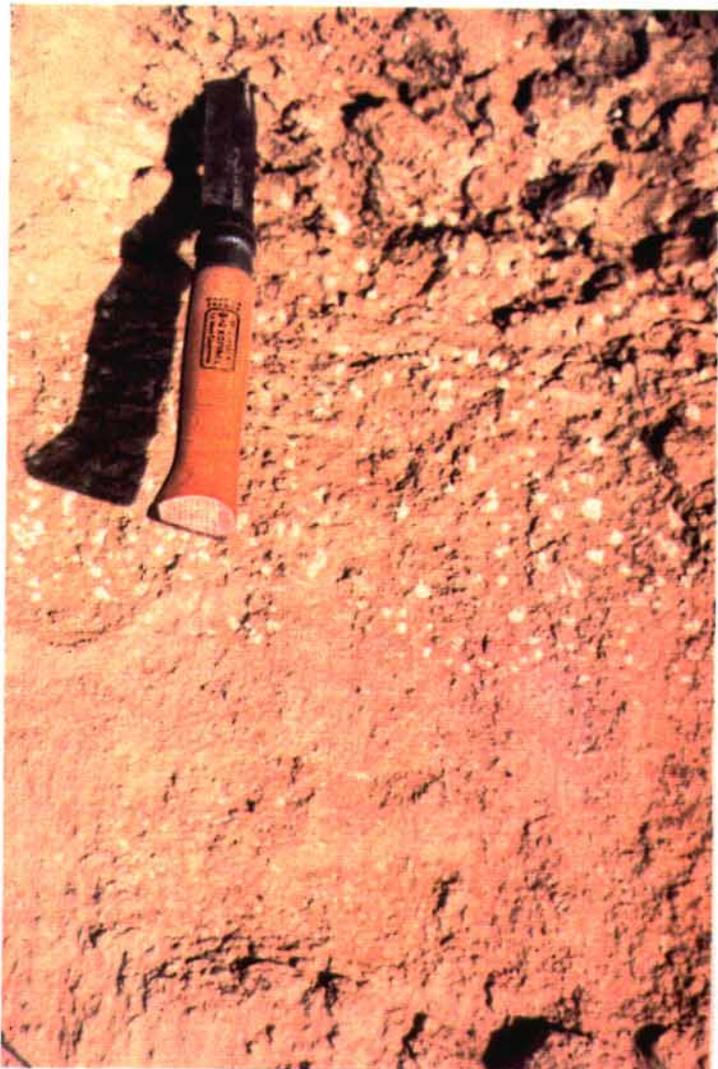
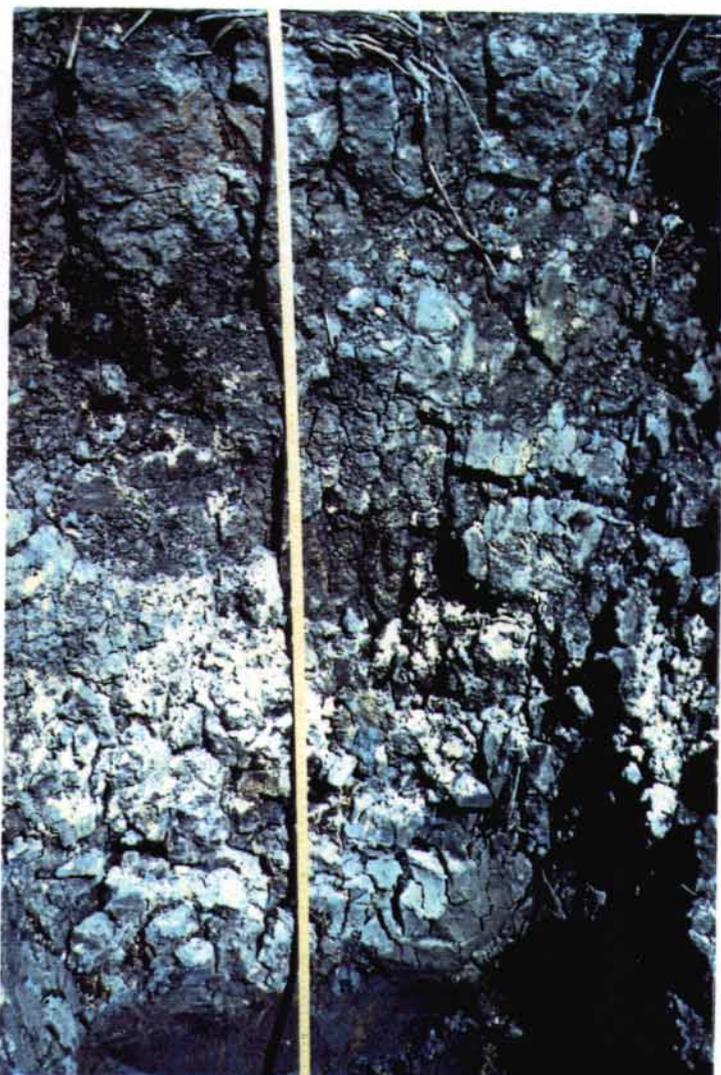


PHOTO 1. Manifestations gypso-salines dans un sol léger de levée fluvio-deltaïque. (NIANGA)

PHOTO 2. Manifestations de Jarosite dans un sol argileux de cuvette de décantation. (NDELLE)



La pédogenèse dans la basse vallée est essentiellement hydrique conditionnée par la durée d'inondation par la crue qui dépend de la cote topographique des différents ensembles géomorphologiques. Dans la partie la plus aval du Delta, elle est essentiellement saline due soit aux inondations par les eaux de surface saumâtres, soit aux mouvements ascendants de la nappe superficielle chargée en sels solubles. Des manifestations acides liées à la présence de composés sulfatés issus de la mangrove fossile, se surimposent fréquemment à cette salure. Le carbonate de calcium est très peu représenté sinon sur d'anciennes plages coquillières en bordure de la vallée.

La nature sédimentologique des matériaux, fins ou grossiers, permet en outre la différenciation de caractères vertiques ou peu évolués au sein des différentes unités dont la séquence classique transversalement à la vallée a été maintes fois décrite et se retrouve régulièrement répétée à tous les niveaux avec néanmoins un modelé nettement plus aplani dans le Delta que dans la basse vallée (Fig. 2).

On distingue depuis la dune jusqu'au lit mineur :

- Les sols bruns ou brun-rouge isohumiques de dune.
- Les sols peu évolués colluviaux de mi-glacis de raccordement dune-cuvette.
- Les sols hydromorphes colluviaux de bas glacis et de terrasse ou plage.
- Les vertisols modaux de cuvette et les vertisols hydromorphes de fond de cuvette.
- Les sols salés plus ou moins évolués, plus ou moins vertiques des levées fluvio-deltaïques.
- Les sols peu évolués des levées subactuelles.
- Les sols minéraux bruts des bourrelets de berge.

Les caractères spécifiques de la salure des sols de la basse vallée seront étudiés en détail dans la deuxième partie.

## 8. APERCU SUR LES SOLS ALCALISES DU HAUT BASSIN.

Les sols affectés par le phénomène d'alcalisation ont été reconnus par plusieurs auteurs ORSTOM dans le cadre d'études pédologiques régionales effectuées dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal, en amont de Bakel sur la Falémé (A. CHAUVEL, 1966 - B. KALOGA, 1966 - S.P. BARRETO, 1966 - C. FELLER, 1975 - B. MOUGENOT, 1984).

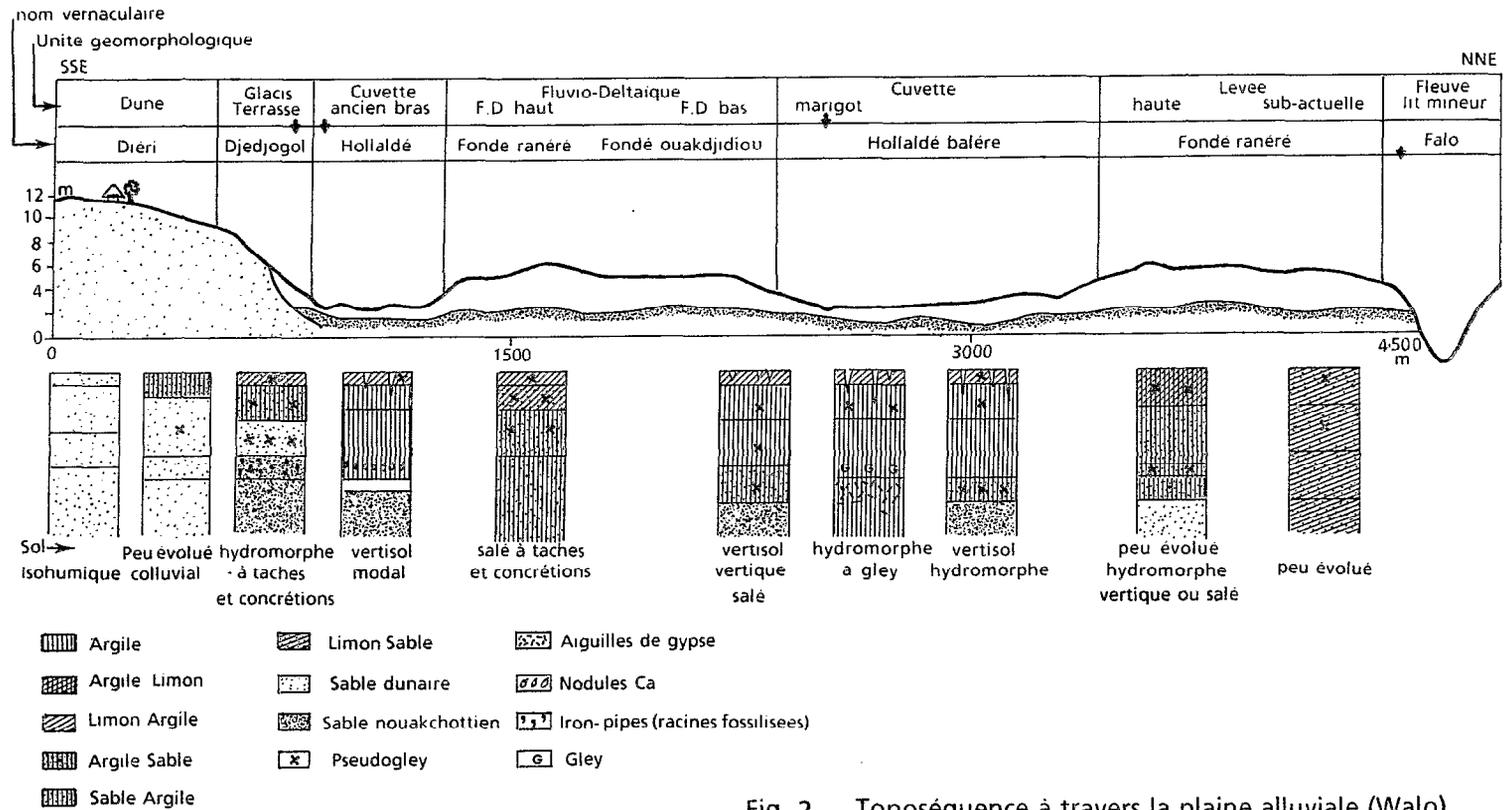


Fig. 2 Toposéquence à travers la plaine alluviale (Walo) au niveau de Ndiërba (A. MTIMET, 1979)

Le matériau géologique à l'origine de ce type de salure est essentiellement constitué par des schistes dits "de la Falémé", aux faciès très variés, souvent sériciteux, et qui ont subi d'importants remaniements avant d'être façonnés en vastes glacis d'épandage dominés par des reliefs quartziques plus résistants. La morphologie de ces surfaces est très plane avec une pente faible vers les axes du réseau hydrographique. Les matériaux originels des sols issus de ces remaniements sont hétérogènes, soit argilo-sableux, soit sablo-argileux gravillonnaires.

Ces unités sont soumises à un important ruissellement en nappe, très érosif, favorisé par une faible perméabilité et une surface très glacée. Une steppe arborée ou arbustive claire à base d'épineux s'y maintient, (*Balanites aegyptiaca* et *Acacia seyal*), associés à un couvert herbacé très discontinu.

Le profil type est un sol Sodique à structure dégradée, soit à morphologie indifférenciée, soit à horizon (B) solonetzique ; mais l'alcalisation peut aussi affecter des sols appartenant à d'autres unités tels que des sols Peu Evolués alluviaux ou colluviaux, des sols Hydromorphes ou Vertiques ou des sols Isohumiques de type Brun subaride.

#### Principales caractéristiques :

- Le passage des sols alcalisés aux sols sains se fait dans le paysage de façon brutale, sur quelque mètres, ce qui justifie le fait qu'ils aient été souvent cartographiés en unités complexes juxtaposées, par les différents auteurs. Ceci traduit une influence prépondérante de la roche-mère, dont la composition très hétérogène favorise ou non une pédogenèse sodique.

- Les horizons supérieurs de ces sols sont généralement érodés et appauvris en argile par drainage latéral ; les horizons B structuraux sont de type solonetzique sans accumulation d'argile, à très faible porosité intra-agrégats et à caractère très compact ; ils sont difficilement perméables comme l'atteste l'aspect bulleux du sommet des prismes structuraux.

- Le pH des horizons de surface est neutre ou faiblement alcalin traduisant une légère désaturation en sodium ; celui des horizons inférieurs est franchement alcalin (souvent supérieur à 9).

- L'altération des schistes sériciteux libère des ions sodium, calcium et magnésium dans le milieu. Sous les conditions climatiques soudano-sahéliennes (précipitations 700 à 800 mm), le drainage interne limité, permet la conservation du calcium qui précipite dans les profils sous forme de carbonate (nodules et amas calcaires), alors que le sodium devenu excédentaire par rapport au calcium, se fixe sur le complexe adsorbant favorisant des rapports Na/T élevés ; le rôle du magnésium est moins bien défini, mais il est probable que sous ces conditions acides celui-ci s'ajoute à celui du sodium pour renforcer l'alcalisation.

L'extension de ces sols alcalisés dans la partie Est du territoire sénégalais est de l'ordre de 500 000 hectares, répartis en bordure de la Falémé, entre Wassandra vers l'amont et jusqu'à Moudéri à l'aval de Bakel (Fig. 1).

Leur valeur agronomique est très faible en raison de leurs caractéristiques, tant physiques que chimiques, défavorables. Des plantations forestières adaptées pourraient y être introduites après des aménagements qui devraient faire l'objet d'expérimentations préalables. Dans leur état actuel ils constituent de vastes zones d'impluvium, très peu perméables, et érodibles non seulement en elles-mêmes, (érosion de nappe), mais aussi secondairement pour les sols situés immédiatement en contrebas, sur lesquels la vitesse et la concentration des eaux ruisselées provoquent une érosion ravinante très prononcée et parfois spectaculaire.

## DEUXIEME PARTIE

## LES SOLS SALES DE LA BASSE VALLEE

\*\*\*\*\*

Sur les 11 000 km<sup>2</sup> environ occupés par les terres alluviales des deux rives de la basse vallée du fleuve à l'aval de Bakel, on estime à près de 3 000 km<sup>2</sup> la superficie des sols affectés à des degrés divers par les sels dont les 2/3 sont sur la rive sénégalaise. Ceux-ci sont surtout concentrés dans la partie la plus basse de la vallée communément appelée "le Delta), qui va de Richard-Toll à l'embouchure, dont la quasi totalité de la superficie est occupée par des terrains salés. Néanmoins, des manifestations de salure affectent localement les sols situés plus en amont jusqu'à Podor, soit à 250 km de l'embouchure et même ponctuellement, à une centaine de kilomètres au delà, jusqu'aux environs de Saldé (cuvettes de Wassitagui et de Golléré)(SEDAGRI - 1973).

Il s'agit dans tous les cas ici d'une salure chloruro-sulfatée d'origine marine ou lagunaire, essentiellement sodique et magnésienne, à laquelle peut se superposer une alcalisation liée à une sodicité excessive et souvent due à une évolution secondaire. Dans la zone côtière, et localement, plus à l'intérieur des terres, une acidification plus ou moins prononcée due à l'oxydation des sulfures de la mangrove, se surimpose au phénomène de salure.

## A - CARACTERISATION DE LA SALINITE DANS LA BASSE VALLEE.

## 1 - SALURE ET ALCALISATION DES SOLS.

La salinité des sols et des eaux de la basse vallée est d'origine marine, plus ou moins modifiée par rapport à la composition initiale de l'eau de mer (tab. 1) soit dans le sens d'une dilution sous l'effet des apports d'eau de crue du fleuve, les précipitations étant très faibles, soit dans le sens d'une concentration sous l'effet de l'évaporation. Il s'agit d'une salure neutre essentiellement chlorurée, sodique et magnésienne, faiblement sulfatée ; les carbonates et bicarbonates sont pratiquement absents, les sources de calcium peu abondantes, et il y a peu de carbonate de calcium dans le milieu.

Tableau 1 - Composition chimique de l'eau de mer

Anions mg/l		Cations mg/l		
Cl <sup>-</sup>	19 215	Ca <sup>++</sup>	400	Total : 34 736 mg/l
SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	2 651	Mg <sup>++</sup>	1 270	CE : 52 m S/cm <sup>-1</sup>
CO <sub>3</sub> <sup>=</sup>	0	Na <sup>+</sup>	10 680	pH : 8,2
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	140	K <sup>+</sup>	380	SAR : 58
Rapports caractéristiques en me/l		Cl/SO <sub>4</sub> : 9,69	Ca/Mg = 0,18	
Na/K : 47,32		Na + K/Ca + Mg : 378		

Tableau 2 - S.A.R. calculés à partir des concentrations et à partir des activités pour diverses eaux de nappe du Delta.

Echantillons		S.A.R. concentration	S.A.R.* activité
PG1	(1979)	43	54
PG1	(1980)	34	43
PG2	(1980)	29	36
PG3	(1980)	32	40
T1	(1980)	25,6	33
T2	(1980)	24,5	33
T3	(1980)	23	30
T4	(1980)	41	50
T5	(1980)	39	49
ND1	(1980)	26	34,7
ND2	(1980)	10,8	13,6
ND3	(1980)	25	34

L'acidité résiduelle des sols est souvent forte (pH 3 à 6), ce qui n'exclut pas des phénomènes d'alcalisation secondaire dans ces sols.

Le pH neutre à l'origine en conditions de submersion alternativement marine et fluviale, a été fortement influencé dans ces sols par la transformation biochimique des sulfures de la mangrove, qui sous l'effet de l'abaissement du plan d'eau se sont transformés en sulfates par le processus habituel d'oxydation propre à ces milieux potentiellement acides.

- l'alcalisation des sols n'est pas aisée à mettre en évidence analytiquement en présence de quantités importantes de sels solubles. Pour des raisons pratiques les ions échangeables n'ont pas été régulièrement extraits et dosés dans cette étude. Sur un plan plus agronomique on peut par ailleurs se poser la question de la signification de cette mesure pour la nutrition des plantes cultivées quand la solution du sol est aussi riche en sels solubles.

Néanmoins, Il est difficile de concevoir qu'il n'existe pas une certaine proportion de sodium et/ou de magnésium qui se fixe sur le complexe adsorbant de ces sols. En effet le SAR calculé sur des extraits 1/5 va par exemple de 7 à 18 pour les sols du Lampsar (J.Y. LE BRUSQ, 1980), l'ordre de grandeur de ce rapport pour l'extrait à saturation serait alors d'au moins 15, en multipliant les concentrations par 7 (cf. ci-après) ; le taux de sodium échangeable sur le complexe risque fort dans ces conditions de dépasser le seuil limite de 10-15 % admis pour l'alcalisation. Le rôle du magnésium sur ce phénomène n'a pas été précisé ni dans le taux nécessaire relativement aux autres cations, ni dans ses effets spécifiques. Seul le rapport Ca/Mg fréquemment inférieur à 1 confirme sa dominance sur le calcium dans ces sols avec un effet probable de renforcement du rôle du sodium sur la dégradation des propriétés physiques.

Par ailleurs, le pouvoir alcalisant des eaux de nappes souvent élevé (SAR 10 à 15 calculé à partir des concentrations des eaux du Lampsar) est un autre argument en faveur de cette alcalisation des sols au moins en profondeur, mais pouvant aussi affecter par mouvement ascendant des nappes, les horizons intermédiaires

Divers auteurs (RAO T.S., et al, 1968, SPOSITO G., MATTIGOD S.V., 1977, OSTER J.D., SPOSITO G., 1980, RIEU M., 1981), ont montré qu'il était préférable de calculer le SAR à partir des activités plutôt qu'à partir des concentrations. Ce calcul fait pour quelques eaux du Delta permet de constater que la formule utilisant les concentrations sous-estime le pouvoir alcalisant des eaux (tableau 2). Ceci est lié à ce qu'un pourcentage important des ions  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$  sont dans ces eaux sous forme de paires d'ions  $\text{Ca SO}_4^\circ$  et  $\text{Mg SO}_4^\circ$ .

La connaissance du SAR permet, en utilisant certaines relations empiriques de prévoir le taux de sodium sur le complexe d'échange, du sol en contact avec cette eau, soit le ESP (Exchangeable Sodium Pourcentage =  $\text{Na}/\text{T} \times 100$ ), soit le ESR (Exchangeable Sodium Ratio  $< \text{Na} \times 100 / (\text{T} - \text{Na})$ ). Ces relations empiriques ont une base théorique, qui est l'équation de Gapon, liant les concentrations ou activités en solution, aux fractions équivalentes des cations échangeables.

Pour deux ions  $\text{N}^+$  et  $\text{M}^{++}$  on a :

$$K = \frac{\text{N}^+ + (\text{M}^{++})^{1/2}}{(\text{M}^{++}) (\text{N}^+)}$$

où  $\text{N}^+$  et  $\text{M}^{++}$  sont les fractions équivalentes des ions sur l'argile,  $(\text{M}^{++})$  et  $(\text{N}^+)$  les concentrations ou activités en solution (SPOSITO G. et MATTIGOD S.V., 1977, SPOSITO G., 1977, OSTER J.D., SPOSITO G., 1980).  $K$  est une constante de sélectivité, qui n'est en fait constante que sur certaines parties des isothermes d'échange. Or l'existence d'une relation SAR - ESP suppose la constance de ce coefficient. Le coefficient varie également avec les types de sol. Donc les relations empiriques SAR-ESP ne sont en toute rigueur valables que pour un certain type de sol, pour un taux de sodium échangeable ne dépassant pas une certaine valeur, et ont été établies, soit à partir des activités, soit à partir des concentrations des ions en solution.

Nous avons utilisé quatre relations pour calculer quelques valeurs de ESP :

$$(1) \text{ ESP} = \frac{100 (-0,0126 + 0,0147 \text{ SAR})}{1 + (-0,0126 + 0,0147 \text{ SAR})}$$

(US Salinity Laboratory 1954), établie à partir d'un important échantillonnage de sols des USA.

(2)  $ESP = 0,988 SAR - 0,61$  (CRUESI, 1970)  
 établie à partir de sols irrigués de Tunisie, riches  
 en sulfates.

(3)  $ESR = 0,014 SAR^* - 0,111$  (RAO et al. 1968)

$$ESP = \frac{100 ESR}{1 + ESR}$$

établie avec un sol argileux à montmorillonite du  
 Tchad.

(4)  $ESP = 4,902 \cdot 10^{-3} \cdot SAR^* \cdot (SAR^{*2} + 40,8 \cdot 10^3)^{0,5} - SAR^*$   
 (RIEU 1981)

établie avec un sol argileux à montmorillonite du  
 Tchad.

Les formules (1) et (2) doivent être utilisées avec le SAR  
 calculé à partir des concentrations, (3) et (4) avec le SAR\*  
 calculé à partir des activités.

Les calculs ont été effectués pour huit nappes du Delta  
 (tableau 3) : il est remarquable que, bien que les relations  
 (1), (2), (3), (4) aient été établies à partir de sols  
 différents, selon des méthodes différentes, elles donnent pour  
 chaque eau de nappe, des résultats très similaires qui  
 confirment le pouvoir alcalisant des eaux de nappe. Si l'on  
 considère que ces eaux de nappe remontent parfois à moins de  
 20 cm de la surface, sans que leur concentration ne baisse  
 sensiblement, on voit à partir du tableau 3 que le risque  
 d'alcalisation des sols par les nappes est très important.  
 Toute valeur du ESP dépassant 15 étant considérée excessive.  
 Des phénomènes de dispersion des argiles et  
 d'imperméabilisation du sol sont donc à craindre.

Cette "alcalisation remontante" a déjà été soupçonnée par  
 des manifestations morphologiques apparaissant dans certains  
 sols du Delta, en particulier dans les sols de cuvette soumis  
 aux plus fortes remontées de nappe en régime naturel. Elle se  
 marque par la présence au niveau du toit de la nappe, d'un  
 horizon de quelques centimètres, grisâtre, très compact, peu  
 poreux, mal structuré, en éclats. Des mesures de perméabilité  
 et de densité apparente effectuées dans cet horizon (2),  
 indiquent déjà une nette dégradation (tableau 4).

**Tableau 3 - Taux de sodium échangeable (ESP) prévisibles pour les sols en contact avec les eaux de nappe**

Equation		(1)	(2)	(3)	(4)
Nappe					
PG1	(1979)	38	42	39	41
PG1	(1980)	33	33	33	34,5
PG2	(1980)	29	28	28	30
PG3	(1980)	31,5	31	31	31,5
T1	(1980)	27	25	26	28
T2	(1980)	26	23,6	26	28
T4	(1980)	37	40	37	39
ND2	(1980)	13	10	7,3	12,6

**Tableau 4 - Données analytiques sur un sol de cuvette du Delta (Tilène)**

Profondeurs - Horizon	Argile %	pH/eau	Perméabilité K cm/h	Instabilité structurale (Is)	Densité apparente	Porosité %
1 0/40 cm h. argileux de surface	55 %	6,1	0,7	7,0	1,37	45
2 40/45 cm h. grisâtre intermédiaire	34 %	7,5	0,3	10,5	1,76	29
3 <45 cm sable sous-jacent	3 %	6,0	30,0	-	1,64	34

## 2. RELATION CONDUCTIVITE ELECTRIQUE ET CONCENTRATION IONIQUE.

Un certain nombre d'auteurs ont proposé des formules calculées par des méthodes empiriques pour établir une relation entre la conductivité électrique et la concentration ionique d'un extrait (in JOB 1985). Ces relations du type

$$C = a (CE)^\delta$$

où C est la concentration d'un ion donné, CE la conductivité de la solution ne contenant que ce cation, a et  $\delta$  deux coefficients dépendant de l'ion, présentent l'inconvénient de dépendre de la force ionique et de la composition relative des solutions et ne sont applicables qu'à un domaine géographique bien défini.

La relation de type statistique obtenue en utilisant les résultats analytiques de 90 extraits 1/5 de sols de la vallée s'écrit :

$$C = 8,9 CE^{1,075} \text{ avec un coefficient de corrélation } r = 0,97$$

Elle s'applique à des conductivités électriques inférieures à 60 mS/cm<sup>-1</sup>.

Dans le but de pallier les complications techniques dues à la fabrication de l'extrait de pâte saturée nous avons utilisé dans ces études sur le fleuve Sénégal essentiellement l'extrait 1/5 plus facile à mettre en oeuvre. Celui-ci présente en outre l'avantage par rapport à l'extrait saturé d'extraire un maximum des sels contenus dans l'échantillon et d'être plus proche de la réalité des conditions d'utilisation de ces sols en riziculture submergée.

Néanmoins dans le souci d'établir la correspondance entre les données obtenues sur différents extraits aqueux 1/2 et 1/5, nous avons cherché à établir la relation existant pour chacun d'eux avec l'extrait saturé utilisé le plus souvent comme référence internationale (J.Y. LE BRUSQ - J.Y. LOYER, 1982).

Approche pratique :

Les résultats obtenus sur les sols de la vallée montrent que la relation n'est pas directement proportionnelle au

volume aqueux en raison d'une plus ou moins grande redissolution de sels fonction de la dilution. Les variations sont liées d'une part au niveau de salinité, d'autre part à l'humidité à saturation (HS) donc à la texture de l'échantillon :

Pour des classes de salinités faibles (CE < 10 mS/cm<sup>-1</sup> sur ES) :

HS < 40 %	CES = CE 1/5 x 8,08 CES = CE 1/2 x 3,98
40 % < HS < 60 %	CES = CE 1/5 x 7 à 9 CES = CE 1/2 x 3,5
HS > 60 %	CES = CE 1/5 x 5 à 5,8 CES = CE 1/2 x 2,5

Pour des classes de salinités élevées (CE > 10 mS/cm<sup>-1</sup> sur ES) :

40 % < HS < 60 %	CES = CE 1/5 x 14 CES = CE 1/2 x 6
------------------	---------------------------------------

Approche statistique.

La recherche d'une relation plus précise entre la conductivité de ces différents extraits effectuée sur 60 échantillons représentatifs du Delta a donné les équations de prédiction suivantes, où, connaissant la conductivité 1/n et l'humidité à saturation, il est possible de calculer la conductivité de l'extrait saturé en mS/cm<sup>-1</sup>.

- (1)  $\log \text{CES} = 1,61 - 0,564 (\log \text{HS}) + 0,991 (\log \text{CE } 1/2)$
- (2)  $\log \text{CES} = 2,171 - 0,841 (\log \text{HS}) + 1,068 (\log \text{CE } 1/5)$
- (3)  $\log \text{CES} = 2,553 - 0,92 (\log \text{HS}) + 1,077 (\log \text{CE } 1/10)$

Par ailleurs, pour ces échantillons, la relation humidité à saturation (HS) par rapport au pourcentage d'argile (A) est la suivante :

$$\text{HS} = 0,91 \text{ A} + 20,38.$$

On a constaté en outre que les valeurs calculées par les relations statistiques ci-dessus, si elles n'étaient pas inversement proportionnelles à la dilution, étaient en général assez proches des valeurs obtenues par une relation théorique simplifiée de la forme :

$$(4) \text{ CES} = \frac{100}{\text{HS}} \quad \text{CE } 1/n$$

Les résultats obtenus (tableau 5) mettent en évidence d'une part la dissolution supplémentaire des sels apportée par la dilution, d'autre part le fait que cette dissolution supplémentaire devient négligeable dans le cas de fortes salinités comme c'est souvent le cas dans les sols de la basse vallée et surtout du Delta du fleuve

### 3 - SALINITE DES EAUX DES NAPPES PHREATIQUES.

Des variations considérables de salinité ont été relevées dans les nappes alluviales de la basse vallée. Cet aspect de leur variation dans l'espace sera abordé au chapitre de la répartition de la salinité dans les paysages de la vallée (cf § B).

#### 3.1 Caractères généraux.

Un échantillonnage de différentes nappes alluviales prélevées dans la basse vallée en février 1986 est présenté dans le tableau 6 en comparaison à la composition chimique de l'eau de mer.

- Du point de vue de l'intensité de la salinité, une large gamme est représentée atteignant et dépassant la salinité de l'eau de mer avec localement des conductivités extrêmes de 170 mS/cm mesurées dans certaines cuvettes endoréiques (Makhana et Ndiael).

- Les pH sont généralement voisins de la neutralité. Ils présentent néanmoins souvent un caractère fortement acide correspondant soit à une acidité minérale issue de la mangrove fossile et qui peut encore évoluer au cours de l'oxydation après prélèvement, soit à des acides organiques liés à la présence d'horizons tourbeux localement rencontrés en profondeur des sols alluviaux.

- La composition chimique des eaux confirme leur origine marine : elles sont nettement chloruro-sulfatées, les bicarbonates étant très faiblement représentés aux pH voisins de la neutralité, ou totalement absents. Le cation dominant est le sodium (60 à 75 %) suivi du magnésium. Le calcium est pratiquement toujours en plus faible quantité sauf en situation particulière de bordure de vallée sur d'anciennes plages coquillières enterrées, à Anadara senilis par exemple.

Extrait 1/2			Extrait 1/5			Extrait 1/10		
Valeur mesurée	Valeur calculée par (1)	Valeur calculée par (4)	Valeur mesurée	Valeur calculée par (2)	Valeur calculée par (4)	Valeur mesurée	Valeur calculée par (3)	Valeur calculée par (4)
300	540	564	410	900	1 234	410	530	914
480	481	486	480	515	729	480	737	1 148
700	474	428	600	1 026	1 403	870	1 115	1 714
870	1 149	1 257	610	811	1 014	940	1 078	1 626
1 200	915	888	1 400	1 690	1 714	1 020	1 125	1 735
1 310	1 846	1 852	1 800	2 137	2 751	1 130	1 525	2 292
1 400	1 847	1 755	1 850	2 210	2 627	1 200	640	967
1 800	2 253	2 296	4 090	5 582	6 153	1 600	1 019	1 528
3 700	4 288	4 123	10 000	8 250	9 750	2 140	3 175	4 519
13 000	10 912	11 500	13 000	11 426	12 903	4 090	4 608	5 846
60 800	47 339	55 736	21 000	18 350	20 316	13 000	10 184	12 298
129 750	142 930	137 142	60 800	44 649	50 156	31 759	24 928	30 792
331 600	359 700	444 666	331 600	394 000	391 660	60 800	41 721	50 157

Tableau 5 - Valeurs mesurées et valeurs calculées par les relations (1), (2), (3), (4) de la conductivité de l'extrait de pâte saturée, en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à  $25^\circ$

Les résultats sur une même horizontale ne correspondent pas toujours au même échantillon.

- Ces eaux présentent un SAR toujours plus élevé, généralement supérieur à la limite tolérée et les risques d'alcalinisation et de dégradation physique de sols en profondeur sont élevés, en particulier lors des remontées saisonnières dans les horizons argileux situés au dessus des sables Nouakchottiens ; sur ces derniers la nappe a peu d'influence et peut seulement provoquer une remontée du pH pouvant néanmoins aller jusqu'à une alcalinisation (pH 9,1 mesuré dans le Gandiolais).

### 3.2. Approche géochimique de la salinité des nappes.

L'évolution de leur composition chimique dans le temps en fonction de la concentration ou de la dilution des eaux influence fortement leurs relations avec le sol ; elle a été suivie en étudiant les variations des concentrations ioniques en fonction d'un ion supposé ne pas précipiter dans les eaux. L'ion magnésium dont la teneur augmente le plus avec la concentration, a été retenu comme indicateur de la concentration des eaux en calcium, potassium, sodium, chlorure et sulfate.

Les figures 3 et 4 représentent les logarithmes décimaux des concentrations en  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{SO}_4^-$  en me/l, en fonction du logarithme décimal de la concentration en  $\text{Mg}^{++}$  dans les eaux de nappe

Nous constatons les faits suivants :

a) cas des cations (figure 3).

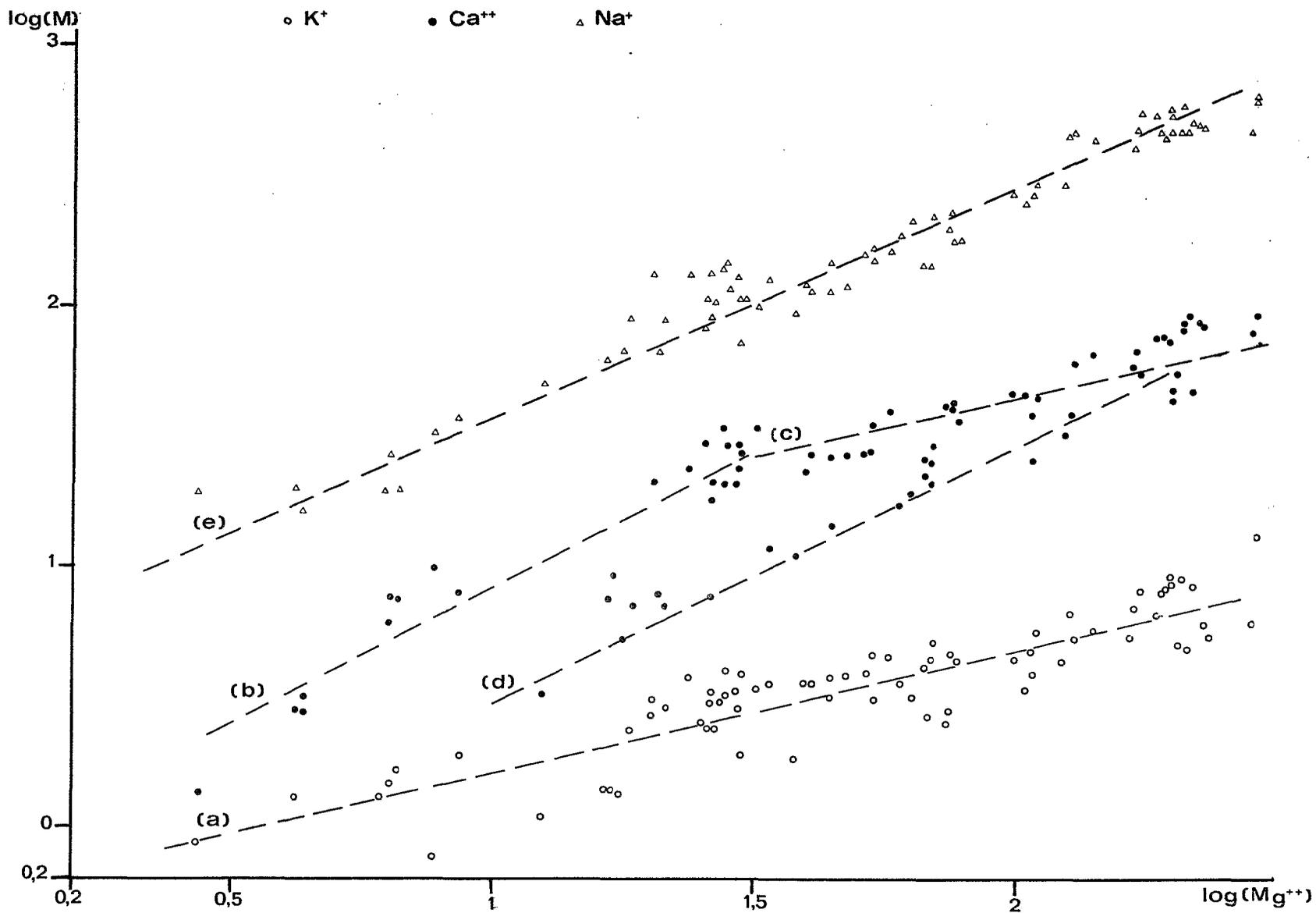
- La teneur en potassium croît avec le facteur de concentration, mais moins vite que celui-ci. Une partie du potassium est donc soustraite des eaux lorsqu'elles se concentrent.

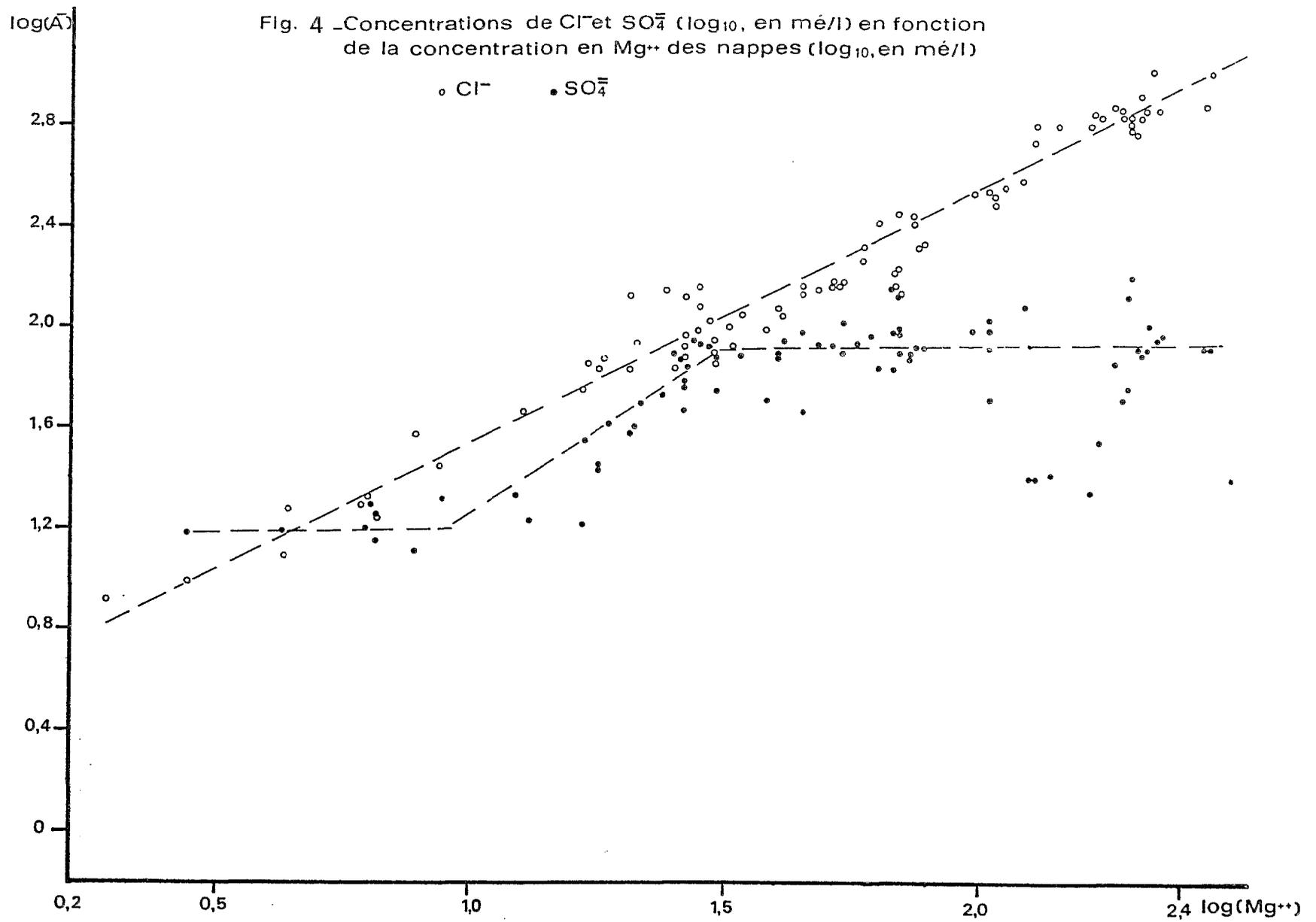
- La teneur en calcium augmente, dans un premier temps, à peu près aussi vite que celle en magnésium, jusqu'à des valeurs d'environ 26 me/l (segment de droite b) ; puis la teneur augmente beaucoup moins vite (segment c). On peut donc supposer qu'un minéral calcique commence à précipiter à partir d'une teneur de 26 me/l de  $\text{Ca}^{++}$ . Les points alignés sur le segment (d), dont la pente est 1, proviennent sans doute d'une dilution d'eaux plus concentrées.

Tableau 6 - Caractéristiques chimiques de diverses nappes alluviales du Delta comparées à celles de l'eau de mer \*

Identification	pH	CE mS/cm	Concentrations en mé/l							Cl/SO <sub>4</sub>	Na/Mg	Ca/Mg	SAR
			Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	Ca	Mg	K	Na				
Gandiol	2,9	2,5	16	4,7	0	4,5	3,6	0,35	12,3	3,4	3,4	1,2	6,1
Nianga	8,2	4,3	26,8	10,6	7,5	1,2	4,7	0,15	40,3	2,5	8,6	0,2	23,7
R. Toll	7,3	13	124	13,6	2,4	8,1	16	4,6	125	9,1	7,8	0,5	36
Tellel	6,3	25	259	50,3	0,3	30,8	80,4	5,0	222	5,1	2,8	0,4	29,8
3è marigot	3,4	32	321,6	95,4	0	50,1	79,4	8,8	285	3,4	3,6	0,6	35,6
océan*	8,2	47	541	55	2,3	20	107,5	9,7	464	9,8	4,3	0,2	58,1
Khant	7,4	50	641,7	61,6	4,8	77	117	5,6	504	10,4	4,3	0,6	51,1
C. Bang	7,9	61	768,7	68,6	6,5	24,6	173	12,2	628	11,2	3,6	0,1	63,4
Gandiol	7,7	88	1 114	134	5,0	71,4	195	6,9	946	8,3	4,8	0,3	82,2
Khant	7,5	92	1 128	176	4,7	65,8	278	25,6	946	6,4	3,4	0,2	72,2
Gandiol	8,0	140	2 080	206	3,8	81	360	50	1 790	10	4,9	0,2	121
Makhana	3,9	162	2 729	213	0	61,5	594	29,4	2 220	12,8	3,7	0,1	122
Ndiael	3,2	170	3 046	338	0	48	712	50	2 460	9	3,4	0,06	126

Fig. 3 - Concentrations de  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , ( $\log_{10}$ , en mé/l) en Fonction de la concentration en  $\text{Mg}^{++}$  des nappes ( $\log_{10}$ , en mé/l)





- La teneur en sodium croît régulièrement avec la teneur en magnésium, mais moins vite que celle-ci (segment e), de pente inférieure à 1). Ici aussi on peut supposer qu'une partie du sodium est soustraite des eaux se concentrant.

b) Cas des anions (figure 4).

- La teneur en chlore croît aussi vite que celle du magnésium. Cet ion ne précipite avec des cations qu'à des concentrations très élevées, qui ne sont pas atteintes ici. La concentration en chlore pourrait d'ailleurs être aussi utilisée comme mesure du facteur de concentration.

- La concentration en sulfate paraît d'abord à peu près constante, à 16 me/l jusqu'à une concentration d'environ 10 me/l de magnésium, puis croît jusqu'à 87 me/l et reste ensuite à peu près constante lorsque la concentration en magnésium croît ; à noter que l'augmentation des teneurs en  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{SO}_4^-$  est ralentie ( $\text{Ca}^{++}$ ), ou est arrêtée ( $\text{SO}_4^-$ ), pour un même facteur de concentration (30 me/l de  $\text{Mg}^{++}$ ).

Ces variations relatives des concentrations des ions peuvent être expliquées soit par la précipitation de certains minéraux, soit par des réactions d'échange avec les argiles :

Précipitations de minéraux

- En calculant les activités des ions dans les nappes, il est possible de déterminer si celles-ci sont ou non saturées vis-à-vis de tel minéral. Pour les sulfates et le gypse en particulier, lorsqu'il y a équilibre entre les ions en solution, et le minéral, on a :

$$\frac{(\text{Ca}^{++}) (\text{SO}_4^{2-})}{(\text{Ca SO}_4, 2\text{H}_2\text{O})} = K$$

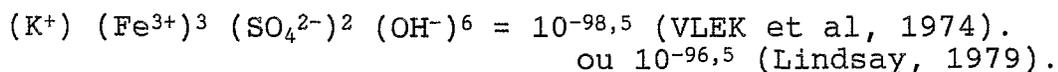
( $K = 10^{-4,6}$  à  $10^{-4,8}$  selon les auteurs)

Les activités chimiques sont placées entre parenthèses.

$K =$  produit de solubilité du gypse ; on a  $(\text{Ca SO}_4, 2\text{H}_2\text{O}) = 1$  par convention.

Les activités de  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{H}_2\text{O}$  doivent être calculées, car dans les solutions salines de dilution non infinie, on ne peut plus admettre l'égalité des activités et des concentrations. Le calcul des activités fait intervenir les interactions entre les ions, de nature électrostatiques, la formation de paires d'ions, telles  $\text{Na SO}_4^-$  ou  $\text{CaCO}_3^{\circ}$ ...

Ces calculs ont été effectués pour 13 eaux de nappe du Delta (tableau 7). Il en ressort que les eaux dont les teneurs en  $(Ca^{++})$  s'alignent sur le segment (c) (figure 2), sont très proches de la saturation vis-à-vis du gypse, voire saturées. Notons aussi que la valeur maximum du produit des activités  $(Ca^{++}) (SO_4^{2-})$  est d'environ  $10^{-4,6}$ . Cette valeur a également été trouvée sur des nappes de la vallée de l'Euphrate en Syrie (M. DOSSO 1980). Il y a donc très probablement précipitation de gypse à partir des eaux de nappe les plus concentrées. Cette précipitation s'accompagne d'une diminution des teneurs en calcium relativement au magnésium et au sodium, tandis que la concentration en sulfate reste constante. L'observation fréquente de cristaux de gypse et même, mais très rarement, d'encroûtements gypseux, dans les sols salés du Delta, voire au sein des nappes les plus concentrées, confirme cette hypothèse. Par contre, ces eaux ne peuvent précipiter de sulfate de potassium (Arcanite,  $K_2SO_4$ ), ou de sodium (Mirabilite  $Na_2SO_4 \cdot 10 H_2O$ ) dont les produits de solubilité respectifs sont  $10^{-1,73}$  et  $10^{-1,52}$ . Le produit d'activité de la Mirabilite, par exemple, est en général inférieur à  $10^{-6}$  dans les nappes. La précipitation de jarosite  $K^+Fe^{3+} (SO_4=)_2 (OH^-)_6$  ou Natrojarosite  $Na^+ Fe^{3+} (SO_4=)_2 (OH^-)_6$  à partir des eaux de nappe est une hypothèse plausible, mais sa vérification exige la connaissance du pH in situ. On a en effet :



La présence de jarosite ou de natrojarosite est constatée dans les sols du Delta, et les pH des eaux, mesurés au laboratoire, sont souvent suffisamment bas pour amener leur précipitation. Il est probable que la jarosite précipite en fait à partir des eaux de la frange capillaire et non au sein de la nappe. En effet, ces eaux se réoxydent lors de leur remontée dans le sol, ce qui est attesté par la présence des niveaux de précipitation d'oxyhydroxydes de fer au-dessus du niveau des nappes. Simultanément, le pH décroît, et la jarosite peut alors se former (J.Y. LE BRUSQ et al 1987).

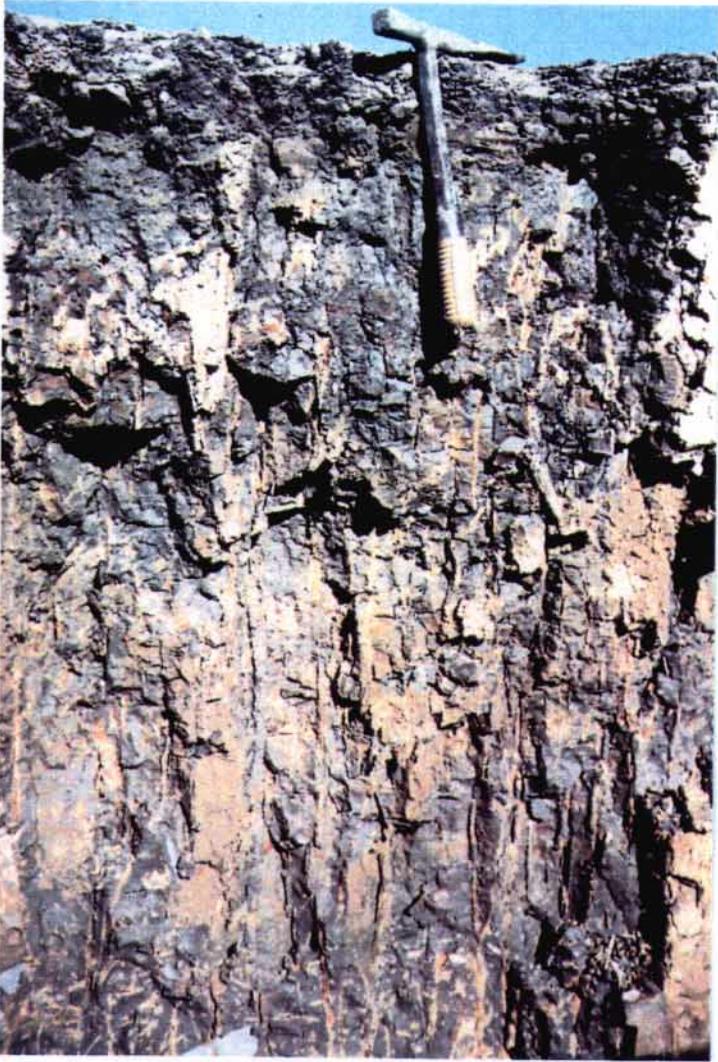


PHOTO 3. Racines de palétuviers ferruginisées (iron-pipes) dans un sol de cuvette (NDIAEL)

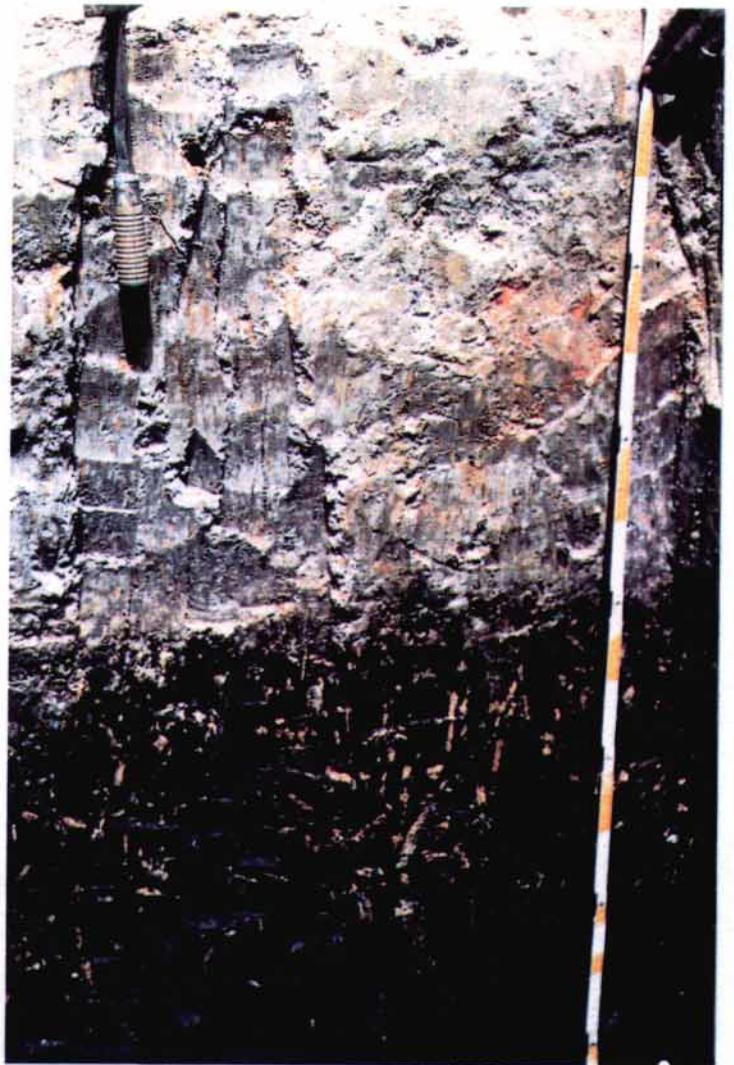


PHOTO 4. Tourbe enterrée tachée de jarosite dans un sol de cuvette (NDIAEL)

Nappes	ND 20/08/80		Ti 20/08/80		PG 20/08/80		Ti 20/08/80	
	Molalité	Activité	Molalité	Activité	Molalité	Activité	Molalité	Activité
Na <sup>+</sup>	0,142	0,095	0,091	0,066	0,27	0,173	0,162	0,107
K <sup>+</sup>	0,0031	0,0021	0,0024	0,0017	0,0045	0,0028	0,0046	0,003
Ca <sup>++</sup>	0,0175	0,004	0,0036	0,001	0,0235	0,0051	0,020	0,0046
Mg <sup>++</sup>	0,014	0,0037	0,0093	0,003	0,049	0,013	0,029	0,008
Cl <sup>-</sup>	0,121	0,084	0,076	0,056	0,35	0,223	0,188	0,126
SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	0,045	0,0066	0,021	0,004	0,05	0,0045	0,044	0,005
H CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,0003	0,0002	0,00024	0,00018	0	0	0,002	0,0014
pH		6,2		6,8		3,4		7,9
NaCl <sup>°</sup>	1,06 10 <sup>-3</sup>	1,12 10 <sup>-3</sup>	5 10 <sup>-4</sup>	5,2 10 <sup>-4</sup>	4,8 10 <sup>-3</sup>	5,4 10 <sup>-3</sup>	1,77 10 <sup>-3</sup>	1,91 10 <sup>-3</sup>
Na SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	9,9 10 <sup>-3</sup>	7,2 10 <sup>-3</sup>	4 10 <sup>-3</sup>	3,2 10 <sup>-3</sup>	1,28 10 <sup>-2</sup>	8,87 10 <sup>-3</sup>	9,06 10 <sup>-3</sup>	6,49 10 <sup>-3</sup>
KCl <sup>°</sup>	4,1 10 <sup>-6</sup>	4,3 10 <sup>-6</sup>	2,3 10 <sup>-6</sup>	2,4 10 <sup>-6</sup>	1,4 10 <sup>-5</sup>	1,6 10 <sup>-5</sup>	8,8 10 <sup>-6</sup>	9,5 10 <sup>-6</sup>
K SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	1,3 10 <sup>-4</sup>	0,9 10 <sup>-4</sup>	6,6 10 <sup>-5</sup>	5,1 10 <sup>-5</sup>	1,3 10 <sup>-4</sup>	8,7 10 <sup>-5</sup>	1,6 10 <sup>-4</sup>	1,1 10 <sup>-4</sup>
Ca SO <sub>4</sub> <sup>°</sup>	5,06 10 <sup>-3</sup>	5,37 10 <sup>-3</sup>	8,5 10 <sup>-4</sup>	8,8 10 <sup>-4</sup>	4,16 10 <sup>-3</sup>	4,7 10 <sup>-3</sup>	4,6 10 <sup>-3</sup>	5,0 10 <sup>-3</sup>
Mg SO <sub>4</sub> <sup>°</sup>	4,13 10 <sup>-3</sup>	4,38 10 <sup>-3</sup>	2,2 10 <sup>-3</sup>	2,3 10 <sup>-4</sup>	9,3 10 <sup>-3</sup>	1,04 10 <sup>-2</sup>	6,9 10 <sup>-3</sup>	7,5 10 <sup>-3</sup>
Ca CO <sub>3</sub> H <sup>+</sup>	1,9 10 <sup>-5</sup>	1,45 10 <sup>-5</sup>	4,2 10 <sup>-6</sup>	3,3 10 <sup>-6</sup>	0	0	1,4 10 <sup>-4</sup>	1,04 10 <sup>-4</sup>
Ca OH <sup>+</sup>	1,5 10 <sup>-8</sup>	1,1 10 <sup>-8</sup>	1,4 10 <sup>-8</sup>	1,1 10 <sup>-8</sup>	3,2 10 <sup>-11</sup>	2,19 10 <sup>-11</sup>	8,85 10 <sup>-7</sup>	6,27 10 <sup>-7</sup>
Mg CO <sub>3</sub> H <sup>+</sup>	8 10 <sup>-6</sup>	5,9 10 <sup>-6</sup>	5,5 10 <sup>-6</sup>	4,2 10 <sup>-6</sup>	0	0	1,1 10 <sup>-4</sup>	7,8 10 <sup>-5</sup>
Mg OH <sup>+</sup>	3 10 <sup>-8</sup>	2,2 10 <sup>-8</sup>	2,4 10 <sup>-7</sup>	1,8 10 <sup>-7</sup>	1,8 10 <sup>-10</sup>	1,24 10 <sup>-10</sup>	5,4 10 <sup>-10</sup>	3,8 10 <sup>-8</sup>
H SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	5,5 10 <sup>-7</sup>	4 10 <sup>-7</sup>	8,5 10 <sup>-8</sup>	6,5 10 <sup>-8</sup>	2,46 10 <sup>-4</sup>	1,71 10 <sup>-4</sup>	8,9 10 <sup>-9</sup>	6,39 10 <sup>-9</sup>
P.A.I. gypse	10 <sup>-4,59</sup>		10 <sup>-5,38</sup>		10 <sup>-4,65</sup>		10 <sup>-4,62</sup>	
P.A.I. mirabilite	8 10 <sup>-7</sup>		1,3 10 <sup>-6</sup>		4 10 <sup>-8</sup>		3 10 <sup>-7</sup>	

Tableau 7 - Molalités et activités des ions simples et complexes dans quelques nappes du Delta.  
Cuvettes de Ndelle (ND), Tilène (Ti) et Pont-Gendarme (PG) dans la vallée du Lampsar.  
P.A.I. gypse = (Ca<sup>++</sup>) (SO<sub>4</sub><sup>=</sup>) (H<sub>2</sub>O)<sup>2</sup>  
P.A.I. mirabilite = (Na<sup>+</sup>)<sup>2</sup> (SO<sub>4</sub><sup>=</sup>) (H<sub>2</sub>O)<sup>10</sup>

## Réactions d'échange avec les argiles.

Les proportions des différents cations fixés sur les argiles dépendent des activités des ions en solution. Or pour connaître les quantités totales des différents cations dans l'ensemble nappe + phase solide, il faut apprécier les quantités de cations échangeables. Approximativement, en supposant une porosité du sol de 40 %, un litre d'eau est en contact avec 1,5 dm<sup>3</sup> de sol supposé saturé. En prenant une teneur pondérale en argile de 20 % pour les horizons profonds, une densité de 2,6 pour l'argile, et une capacité d'échange de 39 me/100 g d'argile, on trouve qu'1 litre d'eau de nappe est en présence d'une capacité d'échange d'environ 300 me. On peut ensuite calculer le taux de sodium sur le complexe, en utilisant, par exemple la relation :

$$\text{ESP} = \% \text{ de sodium sur le complexe} = 0,988 \text{ S.A.R.} - 0,61$$

(CRUESI 1970)

où Na, Ca et Mg sont les concentrations, en me/l, en solution. On peut ensuite estimer que les pourcentages de Ca et Mg sur le complexe sont proportionnels aux pourcentages de ces ions en solution (FRITZ B., 1975, AL DROUBI A., 1976).

Nous avons considéré deux eaux de nappe du Delta, de compositions moyennes, l'une peu concentrée (solution 1), l'autre 25 fois plus concentrée en magnésium (solution 2). Les concentrations ont été déterminées sur les figures 2 et 3. On donne ci-dessous (tableau 8) les concentrations en me/l et les quantités de cations échangeables en équilibre avec 1 litre de solution.

On constate les faits suivants :

- en présence des eaux les plus concentrées, la quantité de sodium sur le complexe a augmenté de 115 me, celle de magnésium a baissé de 26 me, et surtout celle de calcium a diminué de 89 me par rapport aux quantités respectives en présence d'eau peu concentrée.

	Solution 1		Solution 2	
	ions en solution	ions sur le complexe	ions en solution	ions sur le complexe
Mg <sup>++</sup>	10	145	251	119
Ca <sup>++</sup>	8,32	121	67,6	32
Na <sup>+</sup>	36,3	34	645,65	149
K <sup>+</sup>	1,62	Non calculé	7,41	Non calculé
Cl <sup>-</sup>	36,3	-	911,25	-
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	19,1	-	87	-

Tableau 8

On peut alors expliquer pourquoi les solutions s'enrichissent relativement plus vite en Mg<sup>++</sup> qu'en Na<sup>+</sup> en se concentrant, sans faire nécessairement appel à la précipitation d'un minéral sodique : Na<sup>+</sup> passe de la solution sur le complexe, tandis que Mg<sup>++</sup> suit le chemin inverse conformément aux lois de sélectivité monovalents - bivalents. On comprend aussi pourquoi on n'observe pas d'inflexion dans la courbe (e) figurant les teneurs en Na<sup>+</sup> en fonction de la concentration alors que cette inflexion s'observe dans le cas du calcium, précipité sous forme de gypse (fig. 2). En effet, les réactions d'échange d'ions s'effectuent progressivement pendant toute la phase de concentration des eaux et non à partir d'un seuil, comme lors de la précipitation d'un minéral.

Alors que pour la solution 1, la teneur du sulfate en solution est 2,3 fois celle du calcium en solution, il y a en fait 6,8 fois plus de calcium total (en solution + échangeable) que de sulfate. Ceci explique alors que par concentration, certaines eaux deviennent plus riches en calcium qu'en sulfate : des ions Ca<sup>++</sup> passent du complexe vers la solution (89 me dans le cas présent), alors que le sulfate n'existe qu'en solution.. On explique ainsi l'apparition en surface des sols les plus salés, de chlorures de Calcium et Magnésium alors que la nappe ne contient que des sulfates de Calcium et Magnésium. Ce fait avait été constaté (LE BRUSQ, 1980) dans les zones salées des cuvettes du Lampsar.

## B. Distribution de la salinité dans la basse vallée.

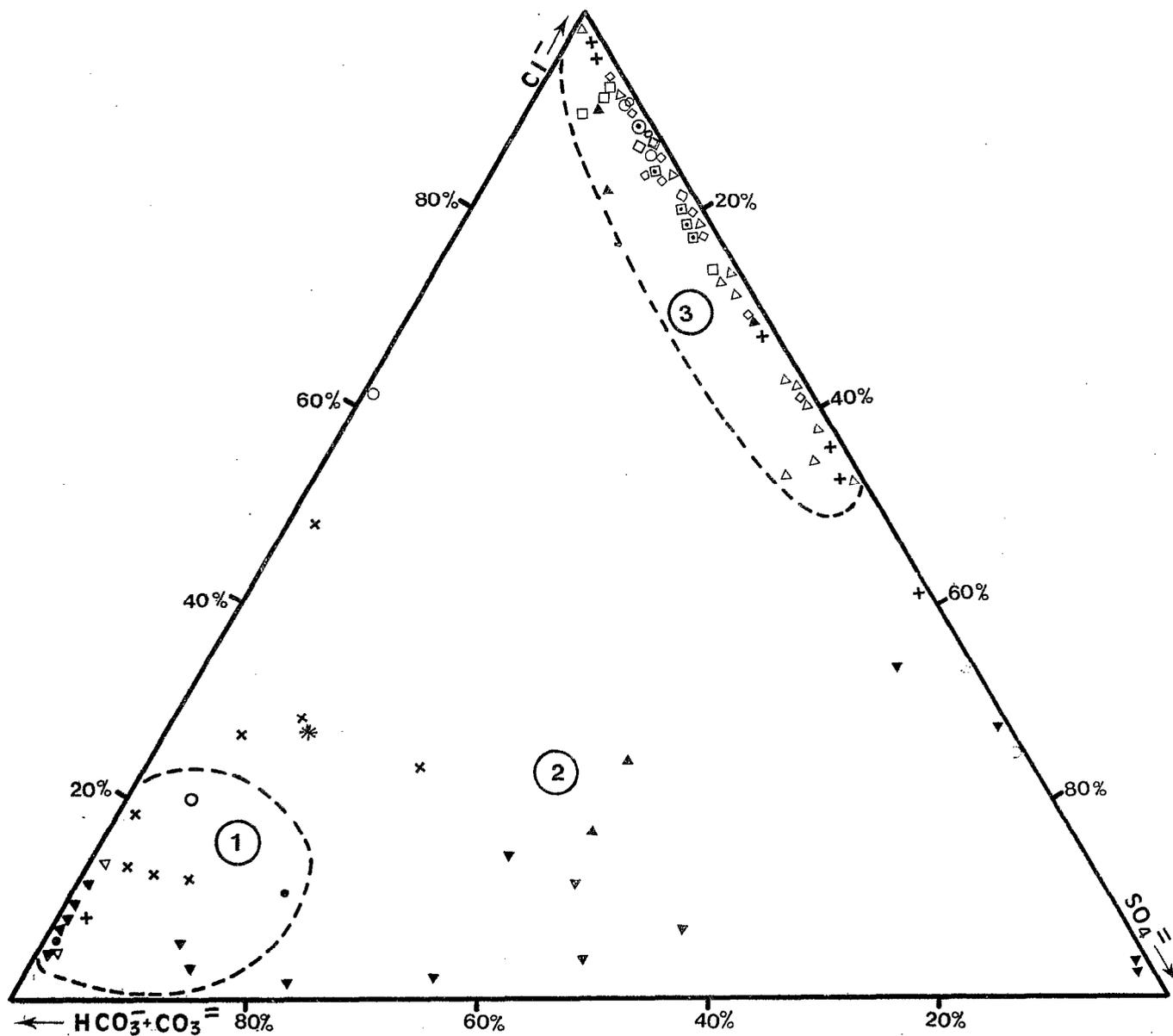
A l'aide des nombreuses analyses effectuées par différents auteurs sur les sols et les eaux de la basse vallée, nous avons tenté de préciser la répartition et l'organisation des sels en fonction de la situation longitudinale, de la morphologie transversale, ainsi que de la dynamique verticale dans les profils.

### 1. ORGANISATION LONGITUDINALE.

#### 1.1. Eaux de nappes.

L'interprétation des analyses d'eaux de nappes phréatiques prélevées depuis Matam (Kobilo) (BRITO J. 1982) jusqu'au littoral (Dakar-Bango, Gandiolais) dont les concentrations ioniques exprimées en me/l ont été reportées sur une représentation en diagrammes triangulaires de cations et d'anions, fait ressortir les faits suivants :

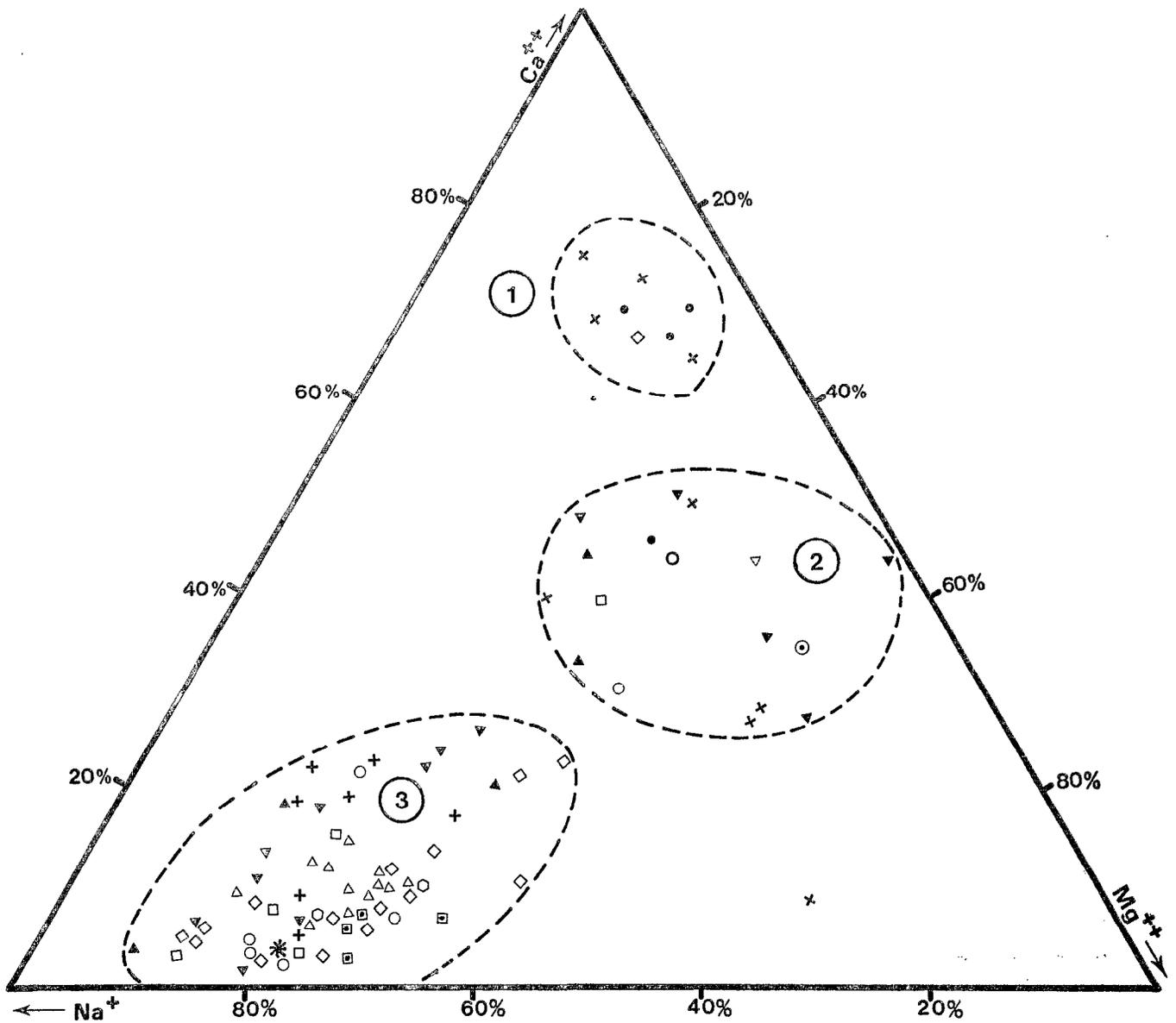
- . pour la composition anionique (fig. 5).
  - + Une dominance d'eaux chloruro-sulfatées caractérisant essentiellement la zone la plus salée du Delta.
  - + Un groupement d'eaux bicarbonatées, caractérisant les nappes les moins salées de la moyenne vallée.
  - + Une série d'eaux de composition intermédiaire
- . Pour la composition cationique (fig. 6).
  - + Un groupement d'eaux essentiellement sodiques proches de la composition relative de l'eau de mer, sensiblement plus riches en magnésium ( $Na > Mg > Ca$ ).
  - + Un groupement d'eaux à faciès calciques représentées dans la partie le plus amont de la basse vallée (Boghé - Kobilo).  $Ca > Mg > Na$ .
  - + Une série d'eaux intermédiaires calciques et magnésiennes, proches de la composition relative des eaux du Fleuve. ( $Mg \approx Ca > Na$ ).



Localisation des prelevements

- |                 |                  |                        |
|-----------------|------------------|------------------------|
| ● Kobilo        | ▼ Guède          | ◇ Ntiagar              |
| x Bogue         | ○ Dagana         | ◊ Boundoum             |
| ▽ Kanel         | ◻ Nder           | + Ndiaye Pont-Gendarme |
|                 | ▲ Ndiarba        | △ Lampsar              |
|                 | ◼ Djeuleuss      | ○ Dakar-Bango          |
| ① Amont,        | ② Intermediaire, | ③ Delta                |
| * Eau de mer    |                  |                        |
| ⊙ Eau du fleuve |                  |                        |

Fig. 5 Balance anionique des eaux de nappe de la vallée



Localisation des prelevements

- |                 |                  |               |
|-----------------|------------------|---------------|
| ● Kobilo        | ▼ Guédé          | ◇ Ntiagar     |
| ✕ Bogué         | ○ Dagana         | ◇ Boundoum    |
| ▽ Kanel         | □ Nder           | ✚ Ndiaye      |
| ① Amont,        | ▲ Ndiërba        | △ Lampsar     |
| ✱ Eau de mer    | ⊠ Djeuleuss      | ○ Dakar-Bango |
| ⊙ Eau du fleuve | ② Intermédiaire, | ③ Delta       |

Fig. 6 Balance cationique des eaux de nappe de la vallée

Ces différences permettent de séparer la basse vallée alluviale en trois provinces géochimiques :

. Une zone située à l'amont de Boghé où les eaux peu chargées (CE < 1 mS/cm), sont bicarbonatées calciques à calco-magnésiennes.

. Une zone intermédiaire où la minéralisation est faible à moyenne (CE de 1 à 20 mS/cm), représentée entre Guédé et Dagana, où les eaux sont bicarbonatées à sulfatées, parfois très sulfatées, calco-magnésiennes à sodiques.

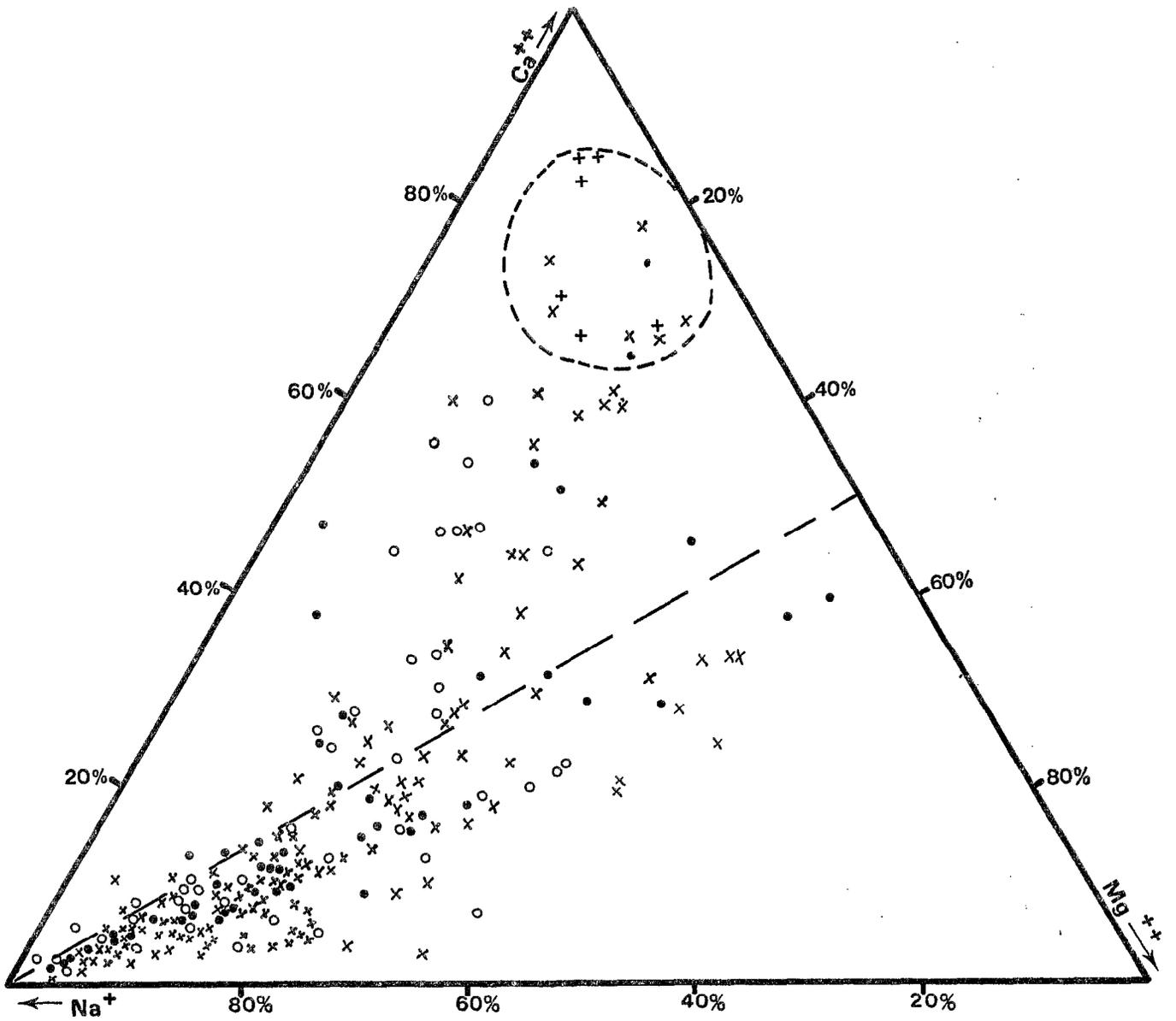
. Une zone aval dans le Delta entre Richard-Toll et Saint Louis, où les eaux sont salées à très salées (CE 10 à 80 mS/cm) parfois excessivement (170 mS/cm dans le Ndiael par exemple), et vont du pôle chloruro-sulfaté au pôle chloruré sodique à sodico-magnésien, proche de la composition relative de l'eau de mer.

## 1.2 Extraits aqueux 1/5.

Un certain nombre d'analyses d'extraits aqueux effectuées sur des sols salés de diverses situations ont été sélectionnées dans toute la partie de la basse vallée affectée par la salure ; les résultats reportés sur les diagrammes triangulaires ioniques font apparaître une grande dispersion, sans organisation géographique bien définie.

- Pour la balance cationique (fig. 7), on constate une forte concentration sur le pôle sodique et une faible dispersion vers les pôles calciques et magnésiens.

- Pour la balance anionique (fig. 8), la répartition chlorures-sulfates est similaire à celle des nappes avec une forte concentration des points sur le pôle chloruré, un étalement vers le pôle sulfaté et une très faible dispersion à partir de cet axe vers le pôle carbonaté.

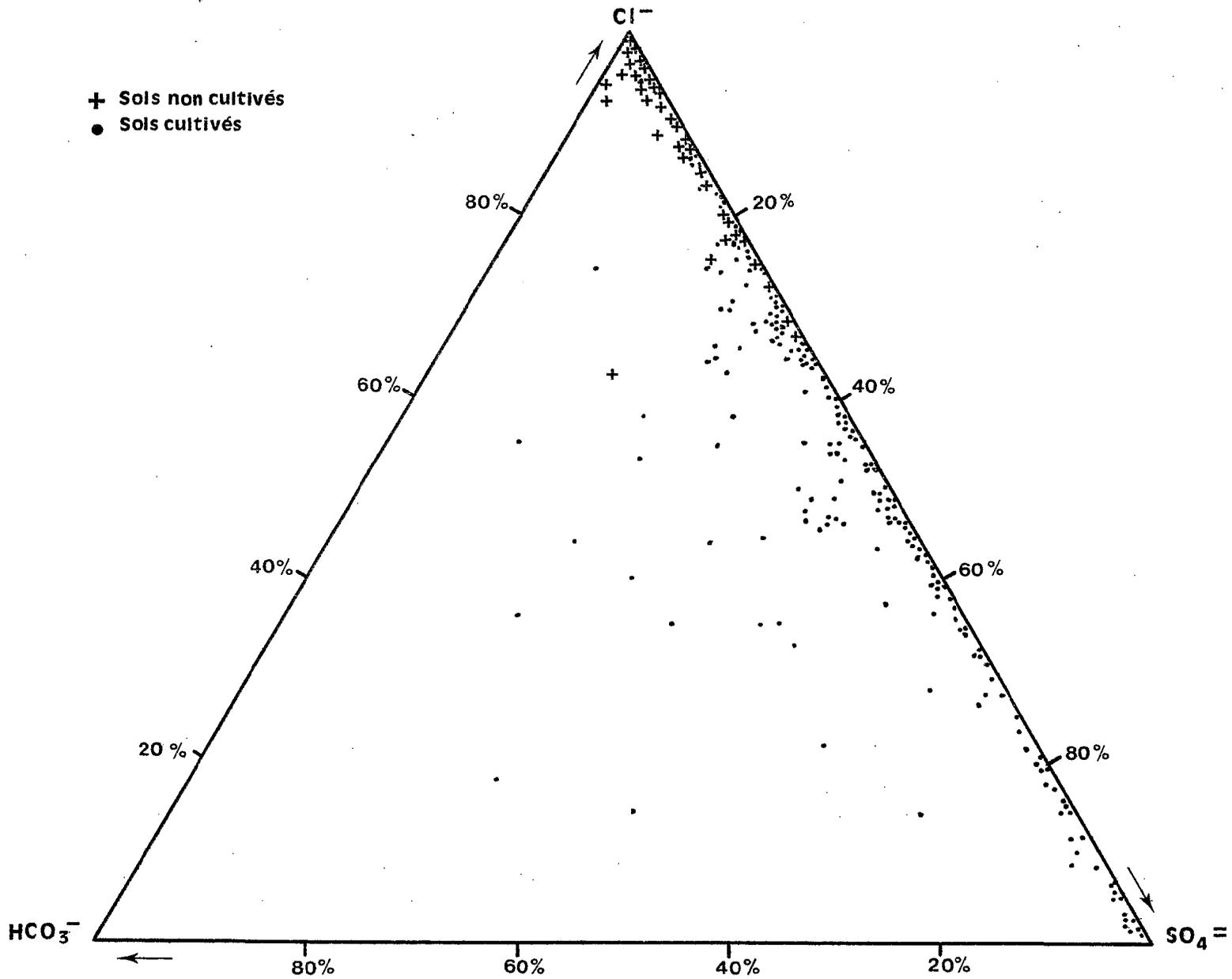


Localisation des prélèvements

- Lampsar
- + Ndelle
- Nianga
- × Balky
- (dashed) bordure de vallée.

Fig. 7 Balance cationique des extraits 1/5 de la basse vallée

Fig. 8 Balance anionique des extraits 1/5 des sols de la basse vallée



L'analyse de ces diagrammes ioniques et la dispersion constatée en particulier au niveau de la balance cationique des extraits, montrent qu'il est délicat de vouloir mettre en évidence une organisation chimique fine de la salure des sols dans le sens longitudinal de la vallée. D'une part des variations verticales et latérales (cf. ci-après) interviennent pour marquer cette organisation, ainsi que d'autres facteurs liés à l'inondation ou à la mise en culture ; d'autre part, la salure qui affecte les sols est de composition chimique homogène sur la vallée et varie seulement en intensité ; les sols non salés de l'amont n'étant pas pris en compte par cette analyse, ceci limite aussi l'interprétation longitudinale de ces données.

### 1.3. Cations échangeables.

Ceux-ci ont été déterminés uniquement sur les sols non salés alluviaux, depuis Matam jusqu'au Delta. Les résultats reportés sur un diagramme triangulaire font apparaître (fig 9)

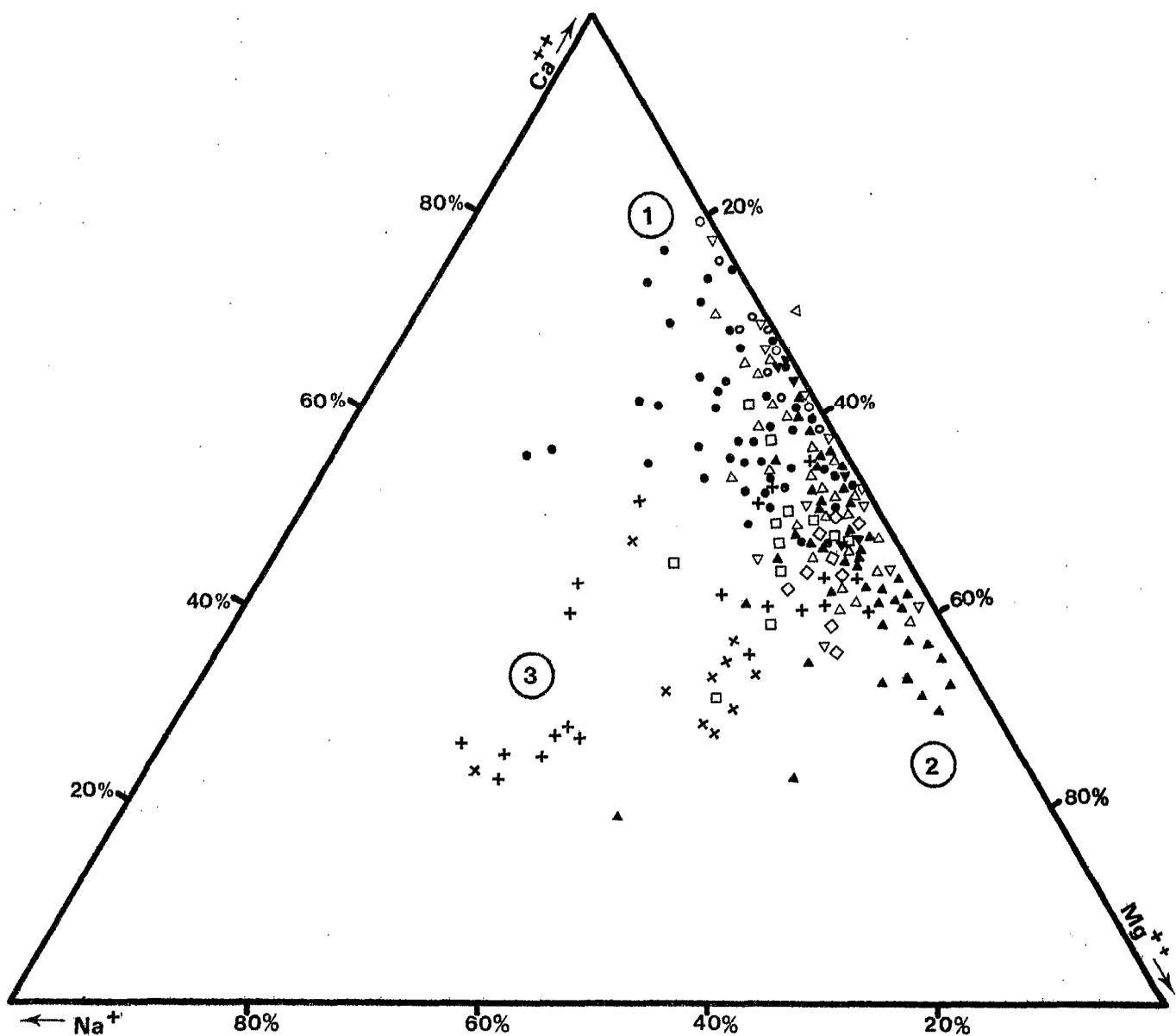
- une très forte concentration des points entre les pôles calcium et magnésium,
- une faible dispersion vers le pôle sodique.

On s'aperçoit que vers l'amont de la vallée (Kobilo - Matam - Kaedi - Guede), le cation dominant est le calcium (entre 60 et 80 %), suivi du magnésium ; en profondeur de certains sols une alcalisation limitée se manifeste (10 à 20 % de Na/T). Par contre en allant vers l'aval (Richard Toll, Balky, Ntiagar, Nder), le magnésium tend à augmenter de plus en plus en rapport au calcium sur le complexe adsorbant des sols.

## 2. ORGANISATION LATÉRALE.

### 2.1. Dans les eaux de nappe.

Dans une étude faite dans le Delta du Fleuve Sénégal (B. MOUGENOT 1982) met en évidence le fait que la nature chimique des nappes correspond à leur position dans les différentes unités morphologiques :



Localisation des prélèvements

- |                                       |                |           |
|---------------------------------------|----------------|-----------|
| ● Kobilo                              | △ Nianga       | × Bally   |
| ○ Matam                               | ▲ Ndiérba      | ◇ Ntiagar |
| ○ Kaédi                               | ▽ Ndiayène     | □ Nder    |
| ▼ Guédé                               | + Richard-Toll |           |
| ① vers l'amont (Kobilo)               |                |           |
| ② vers l'aval (Ndiérba)               |                |           |
| ③ sols cultivés (Bally, Richard-Toll) |                |           |

Fig. 9 Cations échangeables des sols de la vallée

. "Les nappes les plus chargées (CE = 50,1 mS/cm en moyenne) et à SAR élevé (35 à 60) donc pauvres en cations bivalents ( $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$ ), correspondent aux sols salés des zones hautes (levées du Fluvio-deltaïque indifférencié). Elles sont chlorurées sodiques et magnésiennes ( $\text{Cl}/\text{SO}_4 > 5$ ). Dans les parties basses (cuvettes), les eaux de nappes, à tendance chloruro-sulfatée ( $1 < \text{Cl}/\text{SO}_4 < 5$ ) possèdent une conductivité électrique moyenne de 22 mS/cm et un SAR souvent élevé (9 à 35). Les variations observées ne correspondent pas à des types précis de cuvettes plus ou moins marquées ou étendues dans le paysage.

. La balance cationique met en évidence une plus grande richesse en calcium et en magnésium des zones basses par rapport aux parties hautes plus sodiques (Fig 10). Les points de corrélation entre  $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{Na}^+/\text{Mg}^{++}$  (fig. 11) font état dans ce domaine d'une grande dispersion, alors qu'ils sont concentrés, avec des valeurs plus faibles, dans les parties basses.

. La composition des nappes semble en moyenne plus régulière au niveau des cuvettes que des levées et du fluvio-deltaïque indifférencié où des précipitations minérales sont fréquemment observées. Les caractères des domaines de transition sont moins tranchés".

## 2.2. Dans les sols.

En raison de l'hétérogénéité spatiale de la salure au sein des sols salés mise en évidence par différents auteurs (P. BOIVIN - 1984), il est délicat dans de tels milieux de définir des règles de répartition des sels dans les différentes unités morphologiques. Néanmoins outre la règle générale qui veut que dans les systèmes ouverts l'intensité de la salure dans les sols est fonction de la durée de submersion par les eaux de crue donc de la côte topographique, certains faits ont pu être mis en évidence (fig. 12) :

- Au niveau des bourrelets de berge qui bordent le fleuve et les défluent, on a mesuré le plus généralement une salure globale croissante au fur et à mesure de l'éloignement du lit mineur d'écoulement.
- Sur les levées du Fluvio-deltaïque haut, formations, les plus salées, le maximum de salure s'observe au milieu de la levée, point généralement le plus élevé de ces formations, pour décroître latéralement vers les bordures de cuvette.



PHOTO 5. Manifestations salines de surface dans les bas-fonds interdunaires (KHANT)

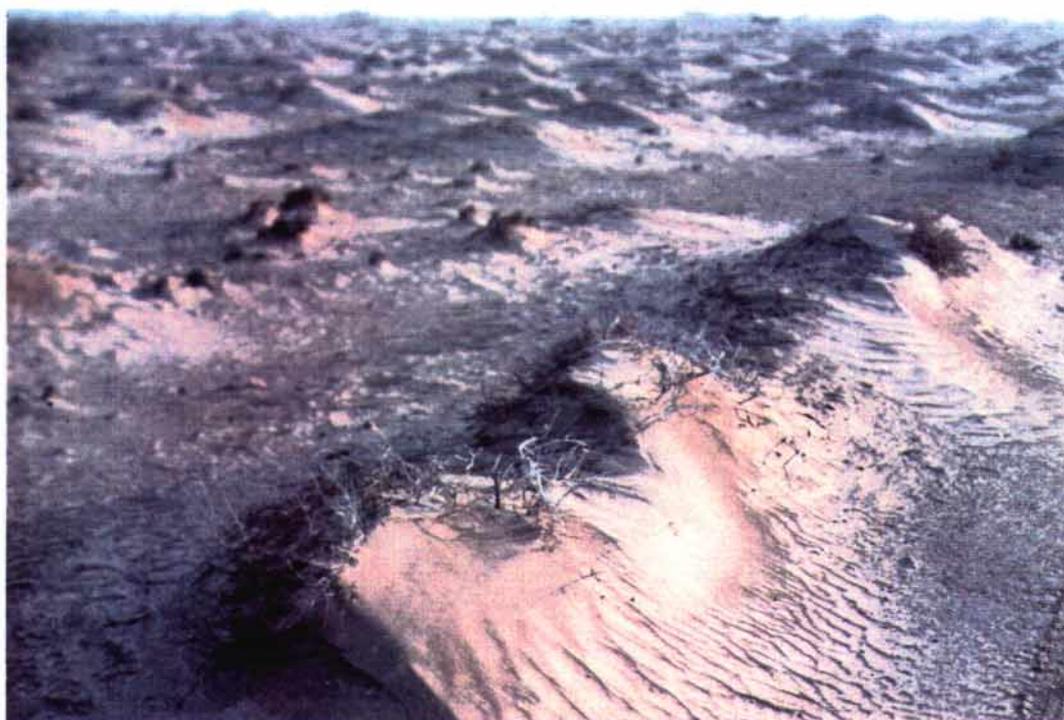


PHOTO 6. Remaniements éoliens des pseudosables superficiels (DIAMA)

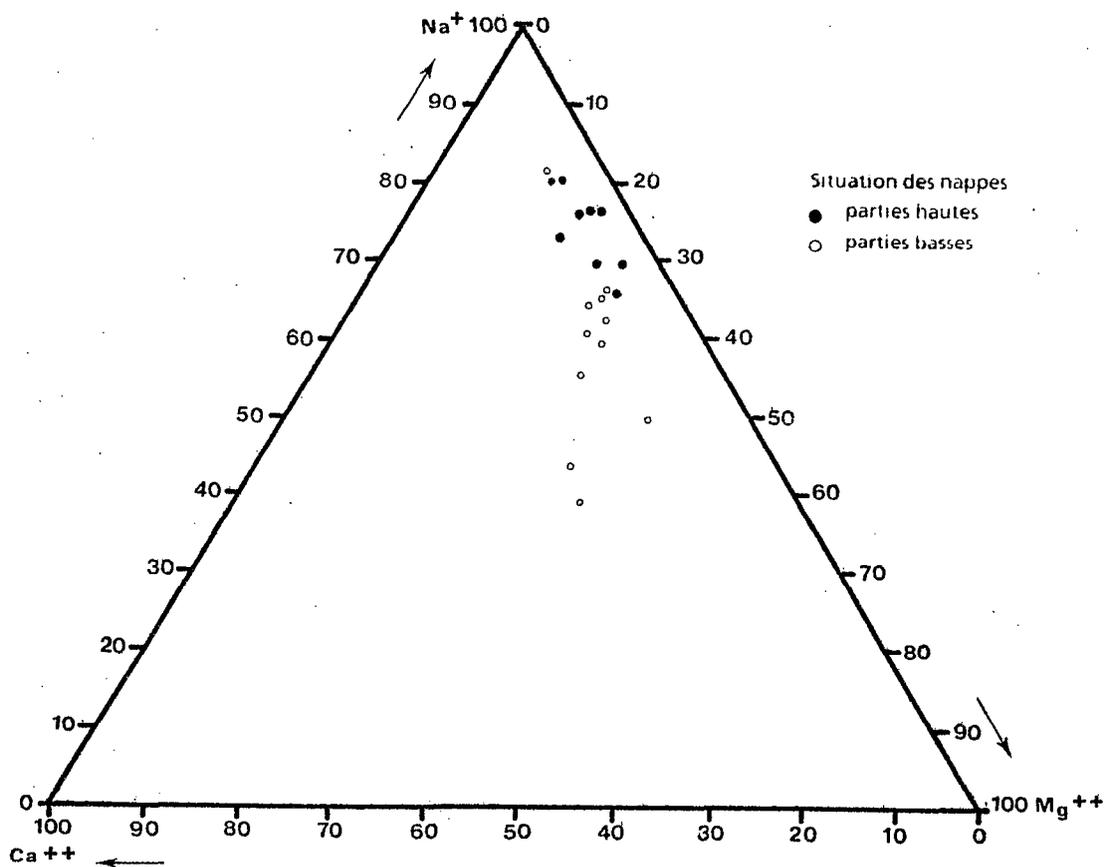


Fig. 10 Balance cationique des eaux des nappes de la cuvette de Ntiagar (B. MOUGENOT, 1982)

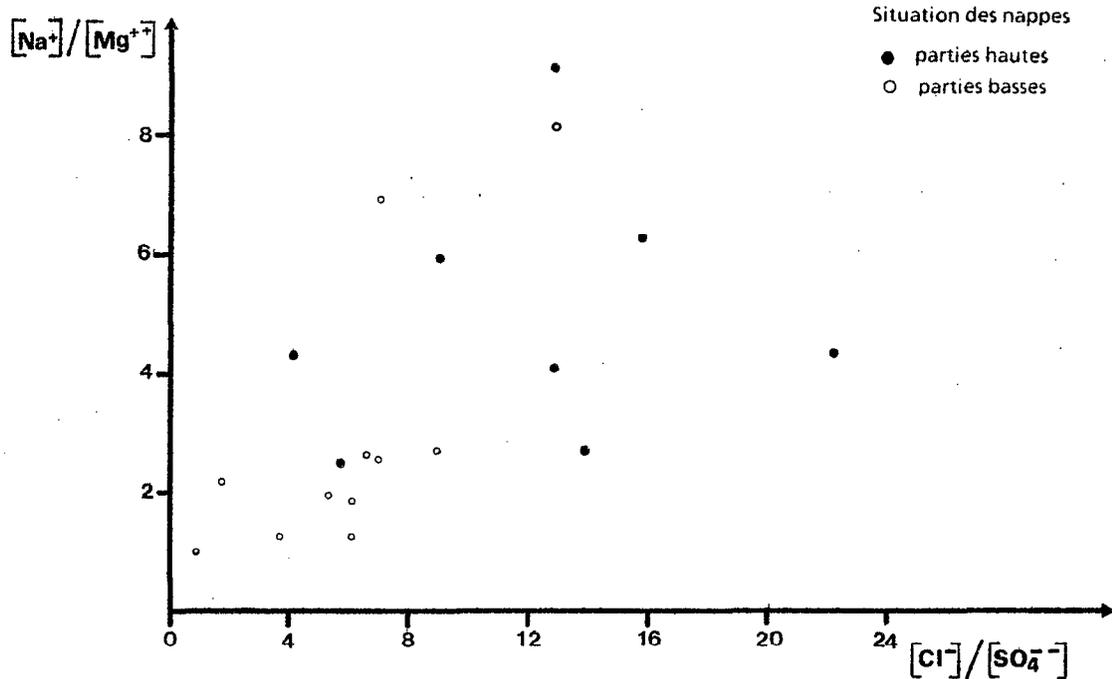


Fig. 11 Rapports corrélés entre  $\frac{[Cl^-]}{[SO_4^{2-}]}$  et  $\frac{[Na^+]}{[Mg^{++}]}$  dans la cuvette de Ntiagar (B. MOUGENOT, 1982)

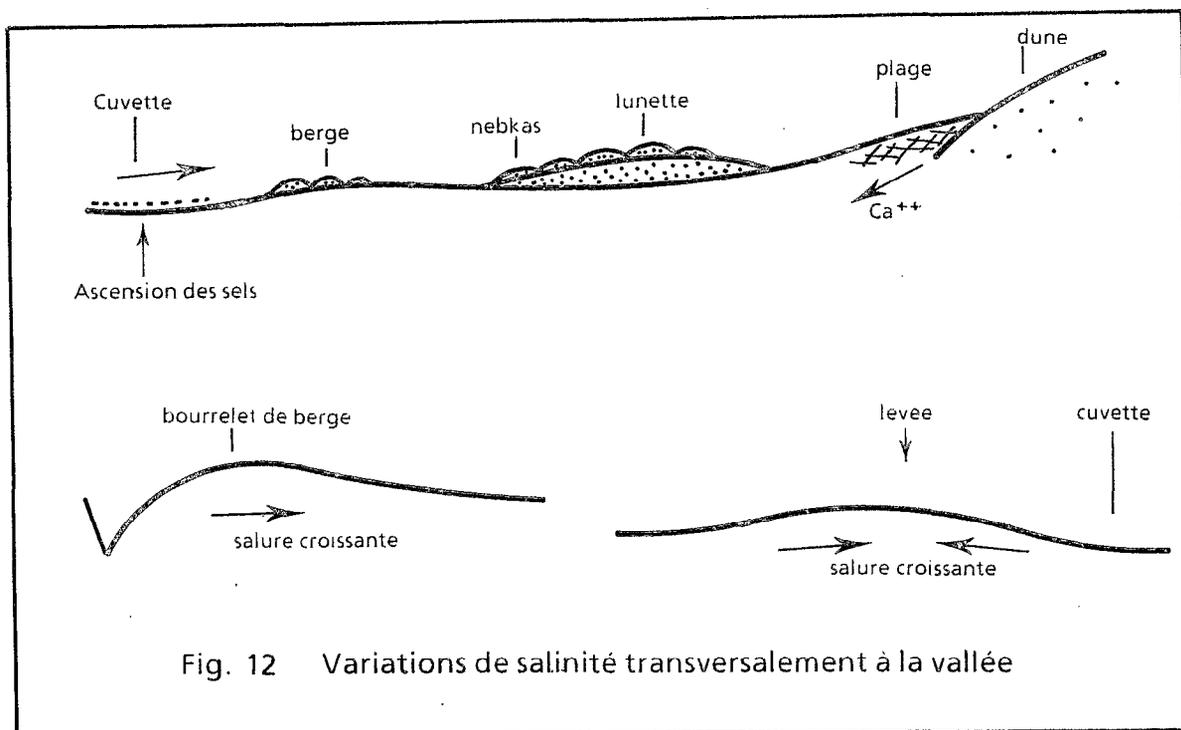


Fig. 12 Variations de salinité transversalement à la vallée

- Les deltas de rupture du Fluvio-deltaïque bas sont généralement moins salés et les sels répartis de façon plus hétérogène que dans les levées.

- Dans les situations basses de cuvette de décantation la salure globale des sols augmente du fond de cuvette parfois totalement déssalé, vers les bordures.

- Les dépressions endoréiques alimentées par les eaux de lessivage des sels superficiels, et sursalées, ainsi que les sebkhas proches du littoral alimentées par les eaux marines, présentent une séquence inverse : c'est le centre

de la dépression où s'évaporent ces eaux, qui est la plus salée. La croûte saline qui s'y forme évolue en horizon poudreux par foisonnement des sels qui soumis à la déflation éolienne peuvent s'accumuler sur les bordures sous le vent de ces dépressions en petites "lunettes" basses très salées, et dont la partie superficielle est modelée en microreliefs typiques (nebkas) (Ndiael et Gandiolais) (photo 6). Il faut noter que ces actions éoliennes à orientation N.NE - S.SE, donc transversales à la vallée se sont nettement accentuées ces dernières années soumettant les dépressions mal alimentées en eau en raison du déficit pluviométrique, à d'importants phénomènes d'arrachement et contribuant au transport et à une dispersion latérale des sels (P. MICHEL 1985).

- Le diagramme cationique des extraits de sols (fig. 7) fait apparaître une famille d'échantillons nettement localisée vers le pôle calcique. Ils appartiennent à des sols situés en bordure de vallée dans le Delta (Ndelle - Ndiaye) où ont été identifiées d'anciennes plages à coquilles calcaires qui influencent la solution de ces sols. Exceptionnellement de véritables encroûtements gypseux de quelques dizaines de centimètres d'épaisseur ont même été reconnus dans ces situations où les sulfates issus de la mangrove sont neutralisés par cette source de calcium (cuvette de Khant)

### 3. DISTRIBUTION VERTICALE DES SELS.

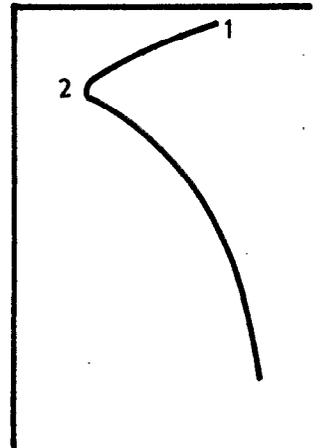
Verticalement, différents types de profils salins ont été identifiés, liés soit à une submersion par les eaux douces de crue vers l'amont, ou par les eaux saumâtres d'invasion marine vers l'aval, soit à la non submersion. C'était normalement le facteur topographique qui réglait cette inondation des zones basses par rapport aux zones hautes exondées, mais le facteur humain a récemment modifié par aménagements hydro-agricoles, le régime d'inondation de certaines cuvettes et aussi soumis des levées normalement exondées à l'action des eaux d'irrigation, grâce au pompage et aux canaux surélevés (cf. ci-après).

Dans leur état naturel les cuvettes de décantation argileuses sont soumises à une submersion plus ou moins prolongée par l'eau douce de crue, et c'est un régime d'engorgement et d'infiltration qui domine pendant plusieurs mois empêchant les remontées par capillarité ; lorsqu'il y a accumulation des sels, celle-ci se fait en profondeur et le profil salin global est descendant avec une salure nulle ou modérée en surface et surtout absence de concentrations superficielles en chlorures de calcium et de magnésium. Localement, essentiellement dans le Delta, se surimpose à cette salure des témoins de l'existence d'une ancienne mangrove sous diverses manifestations :

- présence de jarosite à moyenne profondeur, (photo 2)
- présence d'iron-pipées en profondeur, (photo 3)
- acidité plus ou moins forte (pH 3 à 5,5).

Ces profils de salure descendants se rencontrent depuis le Delta jusqu'à la cuvette de Wossitagui près de Saldé, représentant la manifestation de salure la plus amont rencontrée dans la vallée (SEDAGRI - OMVS, 1973). Le cas des zones basses soustraites aux inondations par la crue annuelle ((Ndiaél, Khant), ou plus littorales, soumises à l'influence des eaux marines ou saumâtres (sebkhas, tannes du Gandiolais), est différent. Ces zones généralement sursalées

%		Ca	Mg	Na	Cl	SO <sub>4</sub>
h. de surface	(1)	8,3	27,5	63,9	82,7	15,7
h. s/jacent	(2)	8,8	18,9	72	80,4	18,6



**Fig.13 Profil salin vertical et composition ionique des zones basses sursalées**

Prof

présentent en saison sèche une très forte concentration de sels en surface, alimentée à la fois par un processus ascendant à partir d'une nappe peu profonde souvent 2 à 3 fois plus salée que l'eau de mer, et par un phénomène de concentration des eaux saumâtres de surface par évaporation. Le profil salin vertical (fig. 14) présente une partie inférieure à gradient ascendant peu marqué, passant par un minimum vers 10 - 20 cm sous une concentration superficielle très marquée et caractéristique (croûte saline et horizon poudreux) où les conductivités peuvent être très élevées (Ndiael 47 mS/cm sur extrait 1/5). Au plan ionique, ces manifestations de surface montrent un enrichissement en magnésium relativement au sodium, par rapport aux horizons immédiatement inférieurs (fig. 13). Le minimum constaté vers 10 - 20 cm traduit probablement l'effet d'un dessalement antérieur, accentué ici par le phénomène de concentration des eaux d'inondation (J. SERVANT - 1975).

Aujourd'hui situés en amont des vasières de mangrove fonctionnelle de bord de mer caractérisées par une acidité potentielle, ces sols ont néanmoins gardé des traces de ces formations littorales dont ils sont issus : réaction souvent nettement acide ; des proportions importantes de soufre total (1 à 5 %) et des manifestations sulfatées de type Jarosite ; localement une acidité organique s'y ajoute due à la présence d'horizons tourbeux profonds (pH 2 à 3) (photo 4).

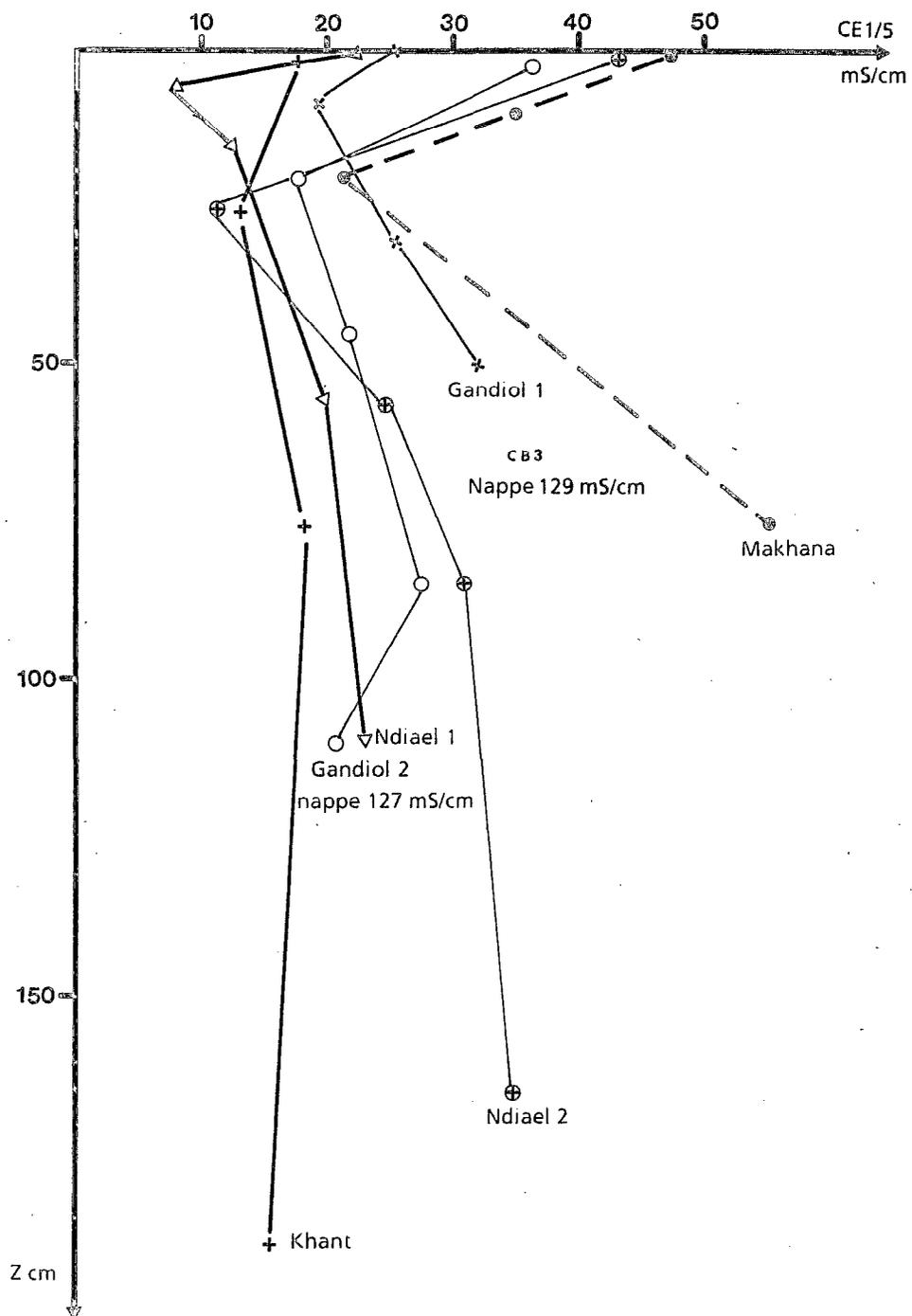


Fig. 14 Profils salins verticaux des zones basses sursalées

La réaction de ces sols est plus proche de la neutralité lorsque une source de carbonate de calcium est présente dans le milieu (débris coquilliers d'anciennes plages marines) ; et ceci permet la précipitation soit de gypse, décelé le plus souvent sous forme de cristaux aciculaires dans les sols, exceptionnellement sous forme de véritables encroûtements (cuvette de Khant), soit de carbonate de fer dans les horizons très profonds de certains sols affectés alors d'une couleur verte.

Les autres profils caractéristiques de ces zones alluviales sahéliennes soumises pendant 10 mois de l'année à un climat chaud et sec à fort pouvoir évaporant et situés hors d'atteinte de la crue annuelle, sont situés sur les levées du fluvio-deltaïque où la texture plus légère favorise les remontées capillaires. Le profil salin vertical est ici le plus généralement à dynamique ascendante et à peine contrarié par les faibles précipitations annuelles. Les manifestations de surface sont variables et évoluent saisonnièrement (photos 7 et 8) de la croûte de battance à la structure poudreuse plus ou moins foisonnée (B/ MOUGENOT - 1983). L'aspect de ces salants évolue aussi quotidiennement en raison de la forte hygroscopicité des sels chlorurés ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$ ) qui absorbent l'humidité atmosphérique et confère aux sols une teinte de surface brun rouge très soutenue le matin, disparaissant dans la journée dès que l'atmosphère se dessèche. La concentration en sels peut être importante en surface (jusqu'à 67 mS/cm, conductivité mesurée sur Extrait 1/5) ; la répartition ionique verticale présente les caractéristiques suivantes :

- Le sodium est toujours le cation dominant dans les extraits, mais sa proportion relative qui est de 70 à 95 % des cations dans les horizons profonds, n'est plus que de 50 à 70 % dans ceux de surface qui sont enrichis en magnésium puis en calcium (cf. fig. 15).

La proportion de potassium reste très faible dans tous les cas.

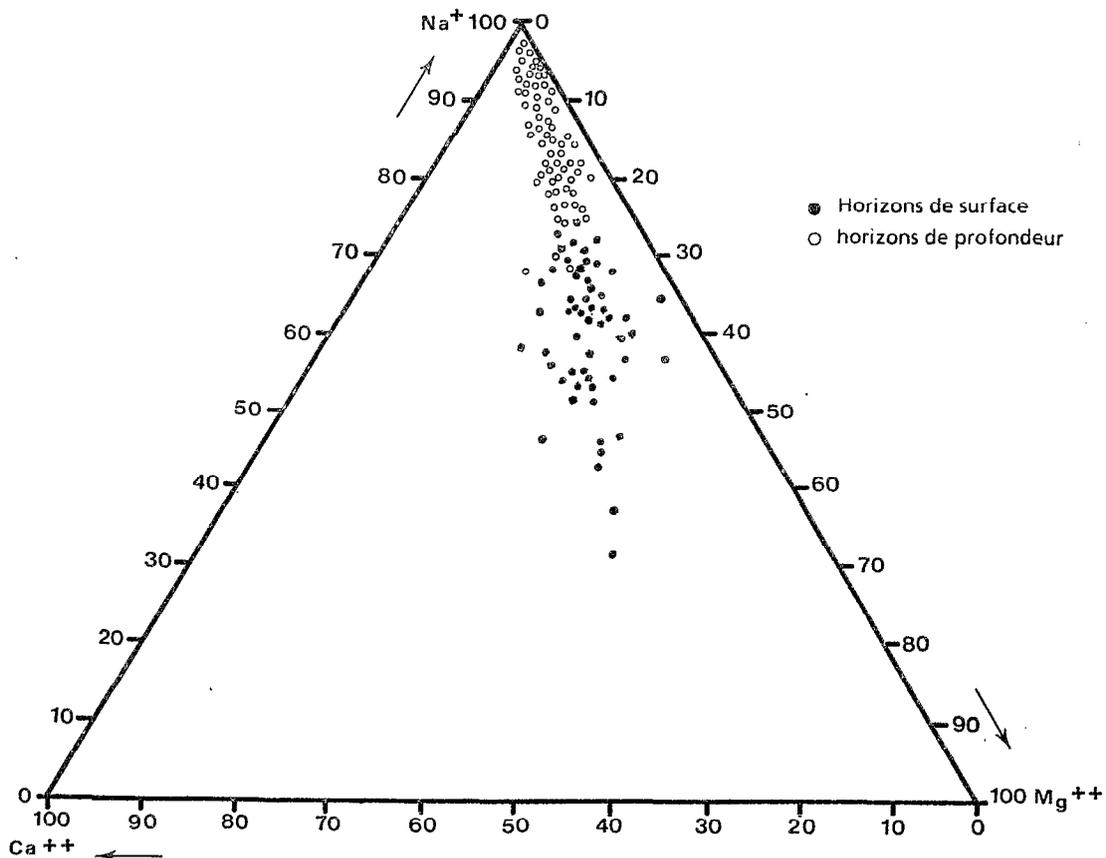


Fig. 15 Balance cationique des extraits 1/5 des sols salés de la cuvette de Ntiagar (Delta) (B. MOUGENOT, 1982)

- Le rapport chlorures sur sulfates est toujours supérieur à 1 et nettement croissant vers la surface où il peut atteindre des valeurs très élevées, jusqu'à 120 dans le Lampsar (LE BRUSQ 1980) plus généralement de 10 à 40 (cf. fig. 16).

- Les rapports  $\text{Ca}/\text{SO}_4$  et surtout  $\text{Mg}/\text{SO}_4$  généralement inférieurs à un dans les horizons de profondeur de ces profils, sont supérieurs à un dans les horizons superficiels (fig. 16). Ceci traduit un enrichissement de ces derniers en calcium et magnésium associés aux chlorures, qui explique l'hygroscopicité de ces matériaux superficiels et leur aspect de salant humide.

- Le rapport  $\text{Na}/\text{Cl}$  supérieur ou voisin de un dans les horizons inférieurs diminue avec l'augmentation de la salinité et devient nettement inférieur à un dans l'horizon de surface enrichi en chlorures de magnésium puis de calcium (fig. 16).



PHOTO 7 et 8. Evolution saisonnière des manifestations salines de surface : structure poudreuse à pseudosables et croûte saline (ROSSO)

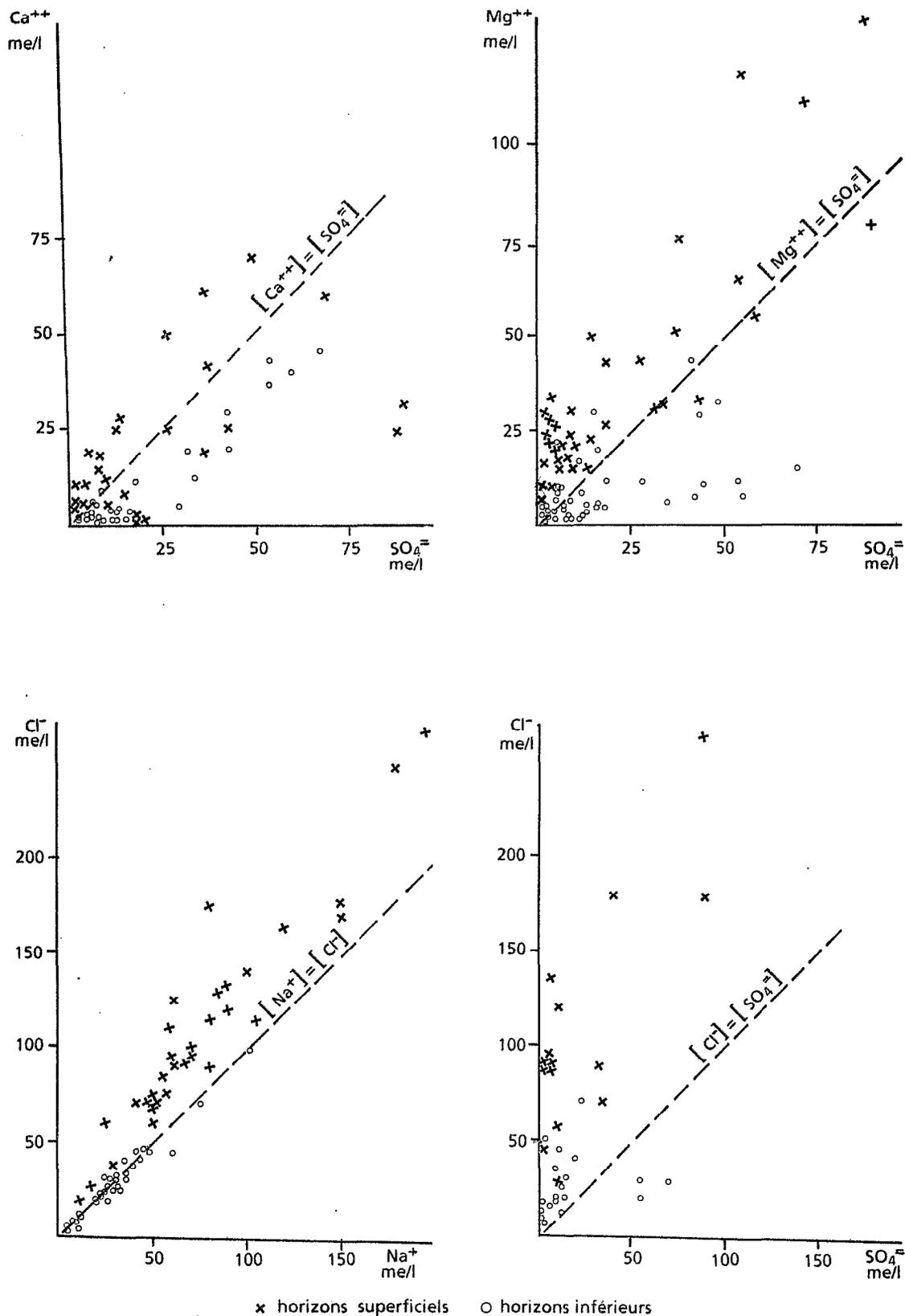


Fig. 16 Relations ioniques dans les extraits 1/5 des sols à profils salins ascendants.

Ces variations relatives des concentrations des ions au sein de la solution du sol ont été expliquées (cf. 3.2) par la précipitation de certains minéraux au cours de la phase d'évaporation et de concentration des solutés ou par des réactions d'échange avec les argiles :

- précipitation de gypse dans les horizons de profondeur des sols dont la nappe est suffisamment concentrée et aussi dans les horizons de surface par évaporation des solutions déjà très proches de la saturation vis à vis de ce minéral (cas de profils salins ascendants).

- Précipitations de jarosite à moyenne profondeur à partir des eaux de la frange capillaire de réoxydation des nappes grâce à des pH suffisamment bas dans les sols de cuvette.

- Apparition en surface des sols les plus salés, de chlorures de calcium et magnésium par réaction d'échange du calcium et magnésium du complexe adsorbant avec le sodium de la solution. Les eaux les plus concentrées s'enrichissent ainsi en calcium et magnésium par rapport au sulfate et peuvent alors précipiter sous forme de chlorures dans les horizons superficiels poudreux.

## TROISIEME PARTIE

### EVOLUTION DES SELS SOUS L'INFLUENCE DE LA MISE EN VALEUR.

Si les événements naturels qui se sont succédés au cours du quaternaire ont donné à la vallée sa physionomie saline actuelle, à une échelle de temps beaucoup plus réduite, l'intervention humaine, qui s'y est exprimée avec une plus ou moins forte intensité depuis plusieurs siècles et s'est intensifiée au plan agricole au cours des dernières décennies grâce à la mise en oeuvre de moyens technologiques puissants, joue un rôle non négligeable sur le maintien dans leur état initial ou l'évolution de ces terres salées et sensibles.

#### A. Les interventions humaines dans la vallée.

Depuis la réalisation au début du XIX siècle du jardin d'essai de RICHARD, au confluent du Fleuve et de la Taouey jusqu'à nos jours où le 13 Novembre 1985 est intervenue la fermeture du barrage antisel de Diama, divers modes d'interventions agricoles se sont succédés dans la vallée à partir des cultures paysannes traditionnelles jusqu'aux aménagements hydro-agricoles des sociétés d'intervention (LOYER et al 1986).

##### 1. L'ère des cultures de décrue.

Le premier mode d'utilisation des terres de la vallée a débuté par la pratique des cultures de décrue sur les cuvettes de décantation par inondation gravitaire (photo 11) :

- En période de crue, le fleuve n'étant pas aménagé fonctionne en régime d'inondation non contrôlée et ses débordements, à partir du lit mineur, envahissent les défluent et atteignent les cuvettes de décantation par gravité ; la durée de submersion y est variable selon la cote topographique, du fond de cuvette très déprimé aux bordures de cuvette. Suivant la baisse du plan d'eau qui s'épuise par évaporation et infiltration, les cultures de décrue (sorgho principalement), sont installées vers la

mi-octobre et bouclent généralement leur cycle grâce à la forte capacité de rétention de ces sols. Selon A. LERICOLLAIS (1981), les surfaces ainsi cultivées ont atteint 180 000 ha sur l'ensemble de la vallée certaines années (1950). Actuellement, du fait des profondes modifications naturelles ou anthropiques qui ont affecté la vallée (sécheresse, endiguement), elles atteignent à peine 10 000 ha. Les sols faiblement salés à l'origine, inondés à l'eau douce, se dessalent progressivement et subissent une pédogenèse hydrique qui favorise les processus d'hydromorphie par engorgement temporaire. En outre, la qualité de ces eaux, dont la charge dissoute était inférieure à 50 mg/l, a favorisé sur certains sols sains la dispersion des argiles et contribué avec les particules décantées au colmatage et à la dégradation des propriétés physiques de ces sols en surface, baisse de porosité et diminution de perméabilité (SEDAGRI-OMVS, 1973).

- En période d'étiage par ailleurs, du fait du faible débit du fleuve et de la pente infime de la basse-vallée (inférieure à 0,05 ‰ sur 400 km), les eaux marines envahissent le lit mineur très loin en amont et surtout soumettent les cuvettes du Delta à une submersion à l'eau saumâtre. Dans cette partie de la vallée, les cuvettes restent généralement très salées.

Ces deux régimes d'inondation à l'eau douce ou saumâtre, sans maîtrise de l'eau, affectent sélectivement les zones basses d'une pédogenèse hydrique ou saline. Les unités les plus hautes du lit majeur (levées fluviales et fluvio-deltaïques) ne sont pas atteintes par les eaux et la pédogenèse y reste figée, dominée par l'excès de sel d'origine fossile, hérité du façonnement de la vallée (cf. 1ère partie § 2).

## 2. L'ère des aménagements hydro-agricoles.

En 1964, sous l'impulsion de la Mission d'Aménagement du Sénégal (MAS), une digue de protection contre les débordements du fleuve est construite dans le Delta, de Dakar-Bango à Richard Toll, sur 80 km. Parallèlement, l'entrée d'eau dans les défluent est contrôlée de façon à n'y admettre que des eaux douces de crue et tenter d'entraîner les sels résiduels. La crue est désormais maîtrisée dans ses débordements. Plus en amont, de grands périmètres à but hydro-agricole sont ceinturés par la "Société d'Aménagement et d'Exploitation des



PHOTO 9. Salinisation latérale à partir des canaux d'irrigation façonnés sur les sols de levée (TELLEL)

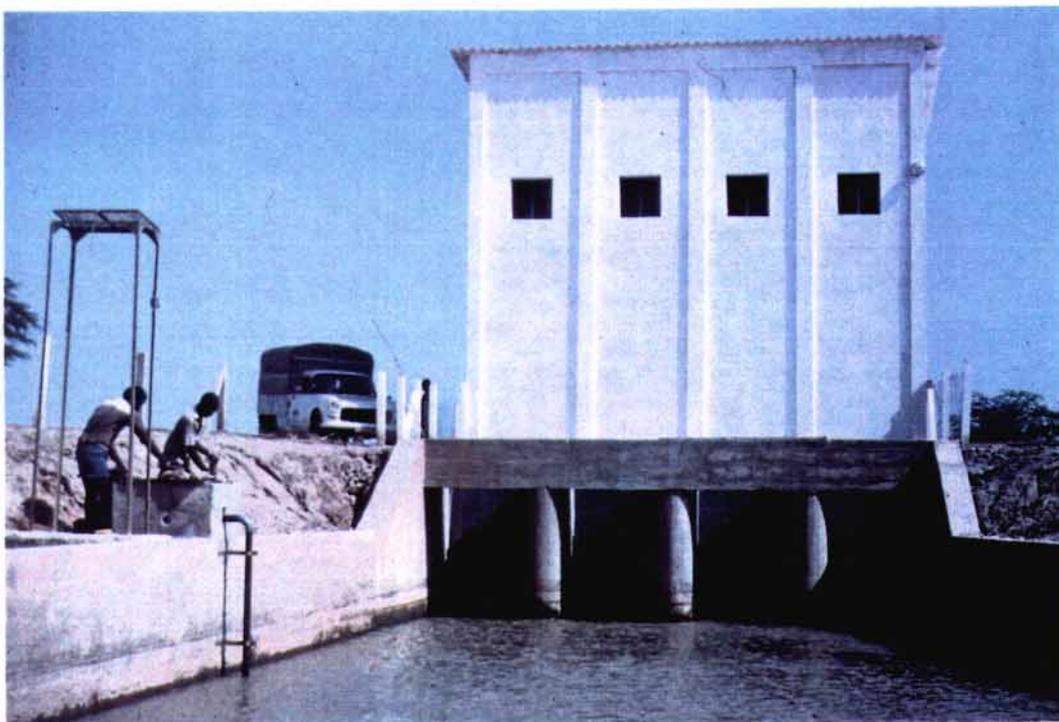
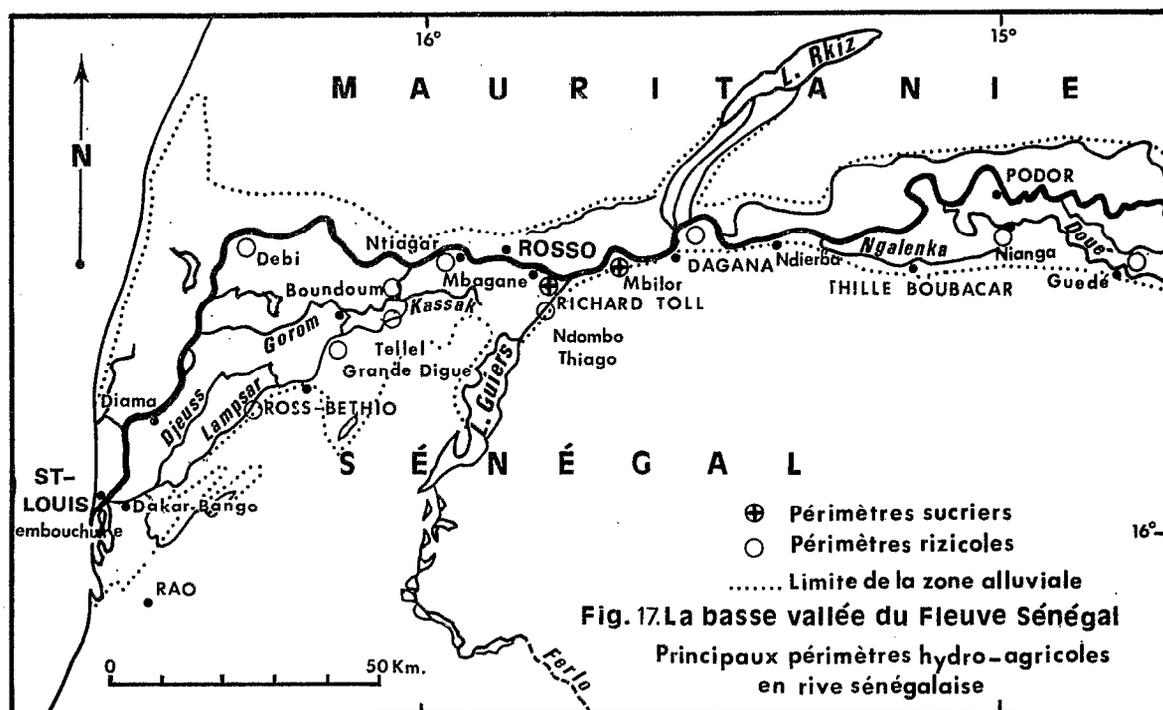


PHOTO 10. Station d'exhaure et dispositif de mesure automatique de la qualité des eaux (PONT-GENDARME)

terres du Delta" (SAED), d'une digue de protection (Dagana, Nianga, Guédé). (Fig. 17).



La principale spéculation agricole conduite actuellement sous irrigation à côté des quelques 12 000 ha de canne à sucre, est la riziculture sous submersion permanente. Les cultures maraîchères (tomate industrielle) sous irrigation intermittente, occupent quant à elles des espaces très limités. Les différents types d'aménagements rizicoles réalisés par la SAED se sont progressivement améliorés dans la maîtrise de l'eau pour aboutir à partir de 1972 aux "aménagements tertiaires" avec planage, pompage, distribution et évacuation de l'eau à chaque parcelle grâce à un réseau de canaux hiérarchisé (photo 12). La particularité de cette irrigation est d'être conduite sans drainage sous-terrain ; en fin de cycle rizicole, les eaux excédentaires sont évacuées hors des parcelles par un réseau de drains à ciel ouvert et hors des périmètres généralement grâce à une station d'exhaure par pompage (photo 10).

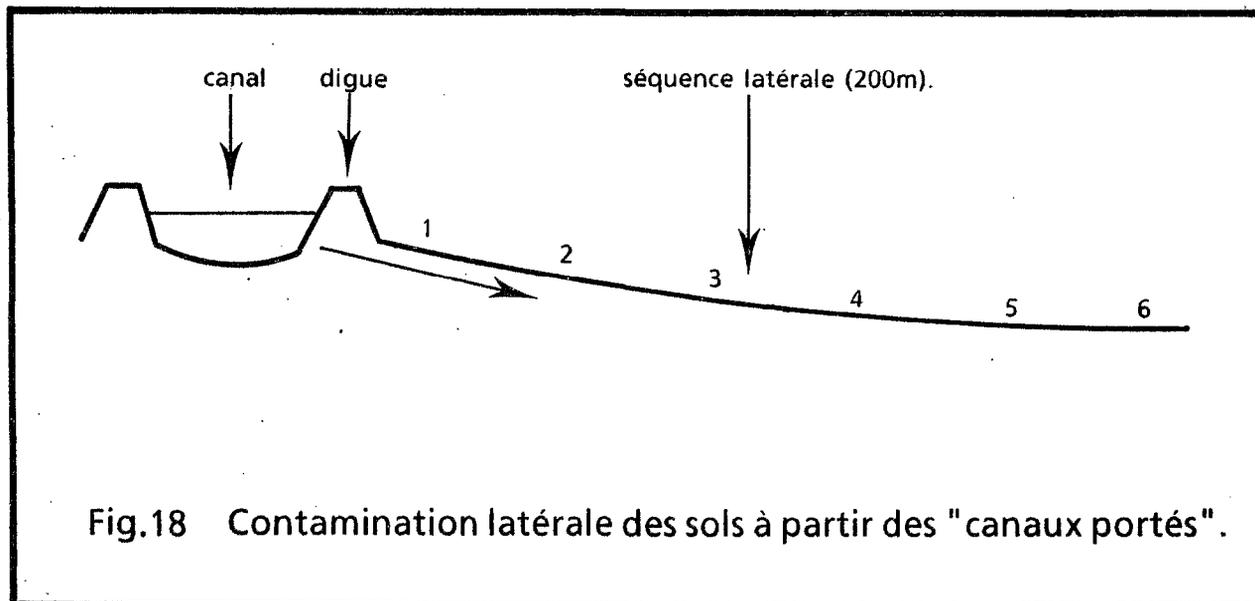
Ces eaux de colature sont déversées soit directement dans le fleuve lui-même (à Dagana, Débi, Mbagane), soit dans les défluent (Gorom, lac de Guiers), soit encore dans les dépressions situées aux limites immédiates des périmètres (Lampsar, Grande Digue, Tellel, Kassack, Nianga). Deux facteurs ont permis ces dernières années une extension des superficies cultivées à d'autres terres que les cuvettes : la mise en place de stations de pompes plus puissantes et l'élévation générale du réseau d'irrigation par la réalisation de "canaux portés", surélevés. Ceci a permis la mise en eau de terres hautes de levée, plus légères, du fluvio-deltaïque et des levées subactuelles (Fleuve, Doué, Ngalenka), mais qui sont aussi les plus salées. Cette intensification de la mise en valeur induit une pédogenèse saline au second degré qui affecte à des niveaux divers la quarantaine de milliers d'hectares de terres actuellement mises en eau dans la basse vallée.

### 3. Conséquences sur la dynamique des sels.

Ces aménagements hydro-agricoles ont donc récemment introduit dans le système pédologique de la basse vallée un facteur humain dont les effets sur l'évolution des sols en général et des sels en particulier sont et seront importants à considérer par rapport au système naturel non aménagé.

La simple mise en eau grâce au pompage et aux canaux surélevés des terres hautes de levée les plus salées et restées hors d'eau jusqu'ici est déjà un bouleversement par rapport au système traditionnel qui ne touchait que les cuvettes.

L'édification même de ces "canaux portés" en terre a peu d'impact sur la salinisation des eaux d'irrigation au contact du canal depuis le pompage jusqu'à la parcelle. Par contre l'influence de ces irrigateurs peut être importante pour le transfert latéral de sels à travers les matériaux légers et filtrant des digues. Des contaminations latérales des sols de bordure et des nappes ont été constatées (Tellel, Grande-Digue, Dagana) (photo 9). A Dagana par exemple les parcelles les plus salées du périmètre de culture sont situées de part et d'autre d'une réserve artificielle dite du canal IV, qui a été édifiée sur une levée initialement salée. Les eaux de nappe prélevées à partir de ce canal montrent un gradient latéral de salinité important, correspondant à un transfert préférentiel des ions les plus solubles. ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{Mg}^{++}$  et  $\text{Na}^+$ ). (fig. 18 tab. 9).



Site des prélèvements (Fig. 18)		1	2	3	4	5	6
CE $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$	510	3030	12600	24900	31200	38300	45300
Cl <sup>-</sup> me/l	1,0	2,6	35,6	56	98	132	160
SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	1,4	32,6	154,3	205,7	265,7	334,2	359,9
Na <sup>+</sup>	2,5	55	122	145	185	230	322
Mg <sup>++</sup>	1,7	8,8	53,2	74	110	140	156
K <sup>+</sup>	0,2	1,5	4,4	4,6	6,3	6,5	6,2
Ca <sup>++</sup>	0,8	4,4	22,4	21,8	22,8	24,8	22,4

Tableau 9 - Evolution latérale de la salinité de la nappe alluviale à partir du canal (Dagana)

Les digues bordant les canaux d'irrigation et de drainage peuvent emmagasiner au bout de plusieurs années par ascension capillaire des quantités importantes de sels. C'est ainsi que, après nivellement et comblement des ces canaux pour la culture de canne à sucre après riziculture dans le périmètre de Richard-Toll, des effets dépressifs dûs à la salure se sont manifestés le long d'anciens canaux dont le tracé était repérable dans la végétation par survol aérien. (C. CHARREAU 1972).

L'intensification des cultures par irrigation contrôlée, implique un planage des parcelles, ce qui, en raison du modelé initial des sédiments et de la précision des 20 cm de dénivelée retenue, suppose d'importants transferts de matériaux. La technique consiste à utiliser comme carrières, les terres hautes des levées pour combler les cuvettes qui se retrouvent fréquemment coiffées de plusieurs décimètres de terre salée rapportée (vallée du Lampar)

L'endiguement des périmètres de culture a également une influence sur la nature et la répartition des sels. Près du littoral à Dakar-Bango par exemple, un secteur fluvio-marin présente la particularité d'avoir été séparé de l'influence marine par une digue édiflée en 1937 et destinée à la protection de la réserve d'eau douce servant à l'alimentation de St Louis. Deux domaines initialement identiques ont ainsi été soumis à des facteurs d'évolution différents pendant près de 50 ans, l'un fluvio-marin, l'autre uniquement fluvial (Ph. JOIN 1982). La comparaison des bilans ioniques des extraits aqueux 1/10, effectués sur les sols des deux secteurs, fait aujourd'hui apparaître les tendances suivantes (fig. 19) :

- pour les anions, la composition relative initialement chlorurée s'oriente vers le pôle sulfaté sous l'influence des eaux fluviales,
- pour les cations, à partir du pôle sodique représentant le domaine fluvio-marin, la balance ionique tend à s'orienter vers le pôle magnésien sous l'influence de l'inondation par les eaux du fleuve.

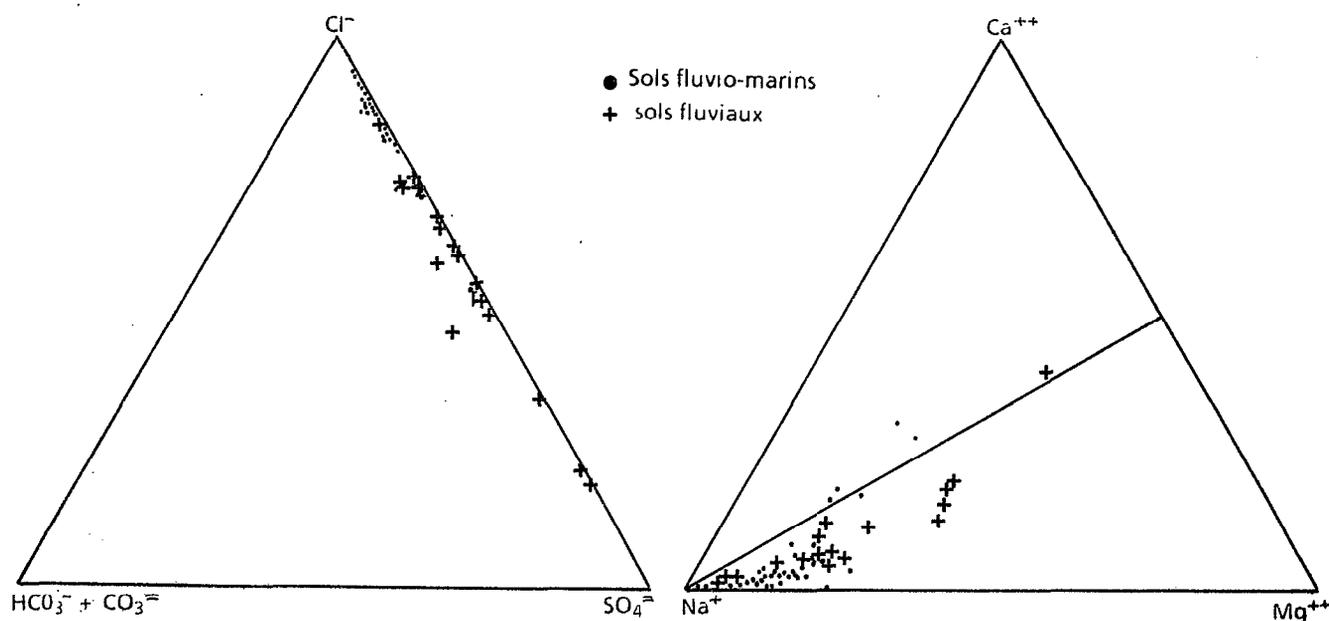


Fig. 19 Balances anionique et cationique des extraits 1/10 des sols de Dakar-Bango

Par ailleurs le diagramme anionique des extraits 1/5 de sols de la vallée montre une répartition rectiligne de la plupart des points entre les pôles chlorurés et sulfatés (fig. 7). On s'aperçoit que les points chlorurés appartiennent à des sols non cultivés (Ntiagar) alors que ceux des sols cultivés (Balky, Richard-Toll) sont nettement plus sulfatés. La mise en culture essentiellement en riziculture submergée tend donc vers un enrichissement relatif de la solution du sol en sulfates par élimination des chlorures.

Sur le diagramme des bases échangeables (fig. 8) on remarque que les points qui s'écartent le plus de l'axe calcium - magnésium vers le pôle sodium, appartiennent à des sols dessalés par la culture (Balky, Richard-Toll) qui sont donc partiellement alcalisés bien qu'ayant des pH acides.

Le mode d'irrigation des sols diffère dans la vallée selon la spéculation retenue, il intervient également dans la dynamique des sels :

- sous submersion permanente en riziculture pratiquée sur les sols les plus lourds, la dynamique est descendante pendant le cycle cultural et les remontées capillaires faibles, en contre saison,

- sous irrigation intermittente, à plat ou le plus souvent à la raie, pour les cultures maraîchères et la canne à sucre, sur des sols plus légers, les remontées capillaires et salines favorisées par la texture et l'alternance humectation-dessiccation, sont importantes, le billon fonctionnant classiquement comme piège à sel et en dynamique ascendante (LOYER - DIALLO 1979) (photo 13).

L'utilisation d'engrais potassique sous forme de chlorure et à des doses relativement fortes (250 à 400 kg/ha en cultures maraîchères) accentue encore la salinisation des horizons supérieurs de ces terres.

#### 4. L'ère de l'après-barrage.

En novembre 1985 est intervenue la fermeture du barrage de Diama sur le fleuve, à 36 km de l'embouchure. Il a pour fonction essentielle d'empêcher toute intrusion marine dans le lit mineur et aussi d'assurer une réserve de quelques 500 millions de m<sup>3</sup> d'eau selon la cote de retenue. Ceci devrait permettre l'augmentation des superficies irriguées à 240 000 ha en rive sénégalaise, contre 40 000 environ actuellement et aussi la pratique de la double culture annuelle grâce à la régulation de l'écoulement par le grand barrage réservoir amont de Manantali, d'une capacité de 1 milliard de m<sup>3</sup>, fermé depuis juin 1987, en cours de remplissage, et dont la première crue artificielle est prévue en 1988.

La présente étude pédologique a été entreprise pour déterminer dans cette perspective d'extension considérable des terres rizicultivées, l'incidence d'un tel système de culture avec maîtrise totale de l'eau mais conduit sans drainage, sur l'évolution des sels dans les sols et les eaux de la vallée.

## B. EXPERIMENTATION : EVOLUTION DE LA SALINITE DES SOLS ET DES EAUX EN RELATION AVEC LA RIZICULTURE DANS LE DELTA DU FLEUVE.

### 1. Etudes antérieures.

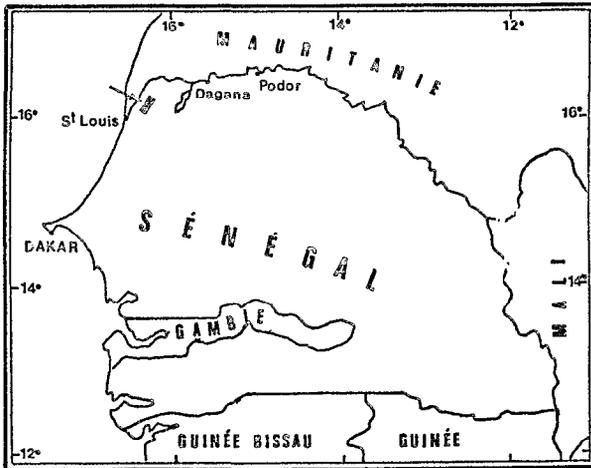
Une première étude avait été effectuée pendant deux années dans la cuvette du Boundoum Ouest, située dans le Delta (G. BEYE, 1972). Elle avait permis de suivre l'évolution de la salinité dans un système non aménagé alternativement soumis à l'inondation semi-contrôlée par la crue, permettant la riziculture pendant trois mois de l'année, et à l'influence temporaire des marées pendant la saison sèche. Les résultats avaient montré que la salinité globale de la cuvette restait constante et était même en augmentation après endiguement par évaporation sur place des eaux d'irrigation, et qu'il était illusoire de vouloir aboutir à un dessalement permanent sans une maîtrise plus complète de l'eau.

Les travaux ultérieurs de M. MUTSAARS et J. VAN DER VELDEN (1973) sur le dessalement des terres salées du Delta du Fleuve Sénégal durant trois années d'expérimentation (1970-1973) sur la même cuvette du Boundoum Ouest (100 ha) dans le cadre d'un projet FAO, ont montré les possibilités de dessalement de ces terres. Le système expérimenté comportait alors un drainage profond enterré à différentes profondeurs et à différents écartements, en présence d'une couche argileuse de moins de un mètre sur des sables et limons stratifiés ; des situations diverses ont été étudiées :

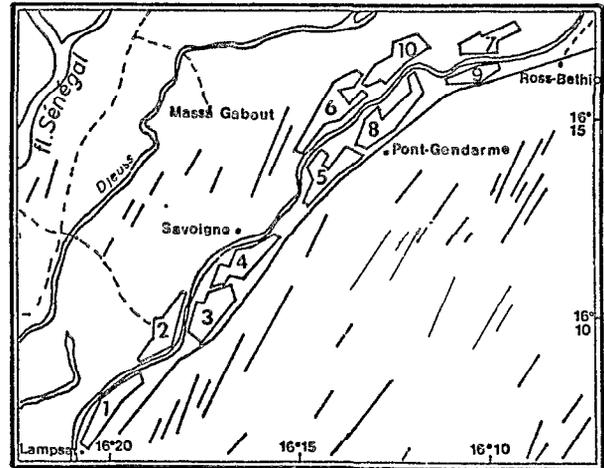
- drainage avec drains ouverts ou enterrés, drainage-taupe,
- espacement variable des drains (de 33 à 200 m),
- amendements divers (chaux, gypse, coquillages broyés),
- travaux cultureux (labour profond, chissel, enfouissement de chaumes).

Le principal résultat a été de montrer la possibilité du dessalement des sols argileux par percolation sans interruption de plus de 50 jours, de 400 mm d'eau (90 % de dessalement par rapport à la salinité initiale dans l'argile de surface, et 80 % sur tout le profil); et de 600 mm d'eau (respectivement 95 et 91 % de dessalement de la couche argileuse). Les drains enterrés profonds, associés à l'épandage de gypse (4 t/ha au moins), constituent la méthode la plus efficace sur le plan technique. Un dessalement complet du profil sur un mètre est obtenu en trois ans. Un resalement des sols au rythme de 1 % tous les dix jours a été observé en saison sèche sur la couche 0-40 cm par rapport à la couche

Fig.20.CARTES DE SITUATION



Carte générale de situation



Localisation des cuvettes étudiées

- |           |                 |
|-----------|-----------------|
| 1 Lampsar | 6 Bodiène       |
| 2 Biféche | 7 Ngao          |
| 3 Ndelle  | 8 Pont-Gendarme |
| 4 Ndiaye  | 9 Tilène        |
| 5 Ngomène | 10 Polo         |

Parcelles	Tilène Nord (1)	Tilène Centre (2)	Tilène Sud (3)	Ndelle (4)
Géomorpho.	levée	cuvette	Glacis	Fond de cuvette
Type de sol	Salin à alcalin structure moyennement dégradée	Hydromorphe à gley salé de profondeur vertique	Peu évolué hydromorphe	Hydromorphe à Gley salé de profondeur vertique et jarosite
texture	- Argileux sur 80 cm - hétérogène sablo- argileux	- Argile sur 50 cm - sable	- sablo-argileux sur 20 cm - sableux	- argileux sur 120 cm - sableux
conductivité 1/5 en mS/cm	6 en surface 3 en profondeur	0,5	0,3	0,9
pH eau	5,5 en surface 6,5 en profondeur	6	6 4	5 4

Tableau n° 10

sous-jacente. En l'absence de tout drainage et avec une culture par an, il faudrait 10 à 12 ans pour faire chuter les rendements en riz de 50 % par accumulation des sels à une conductivité électrique 1/5 supérieure à 1mS/cm, en partant d'un sol non salé.

Le processus de dessalement dans ces conditions, implique donc au moins les premières années une irrigation continue par submersion et donc la limitation à la riziculture. L'irrigation intermittente compatible avec d'autres spéculations, maraîchères en particulier, ne pourra être envisagée qu'après un dessalement sur un mètre de sol et sous réserve de maintenir un minimum de percolation. Les principales limitations de l'étude, sont la faible durée du suivi (deux ans pour les drains enterrés) qui a néanmoins déjà fait apparaître le délicat problème technique de l'entretien des drains.

## 2. But de l'étude, choix du site et méthodologie.

Le but de cette nouvelle expérimentation était de déterminer l'incidence du système rizicole tel qu'il est réellement appliqué sur le Fleuve, c'est-à-dire sans drainage de profondeur, sur l'évolution des sels dans les sols et dans les eaux de nappes et de vidange.

Le site retenu correspond à la vallée du Lampsar dans le delta du fleuve (fig. 20) où des travaux antérieurs de cartographie (LE BRUSQ J.Y. 1980) avaient montré la représentativité des sols de cette vallée par rapport à un certain nombre de cuvettes du Delta. Ces cuvettes du Lampsar présentaient entre autres intérêts, celui d'être mises en eau pour la première fois en 1980 et donc de pouvoir être caractérisées au plan de la salure, avant mise en culture. Le schéma de répartition transversale des sols est conforme à celui observé généralement dans la vallée (fig. 2).

- Sur la séquence, quatre parcelles de 250 m<sup>2</sup> représentatives des niveaux de salinité, des types de sols et des positions géomorphologiques ont été choisies (tableau 10) sur lesquelles six séries de prélèvements ont été répétés :

Août	1980	avant la première mise en culture.
Janvier	1981	après la première récolte (1ère année).
Juillet	1981	avant la 2ème mise en culture.
Janvier	1982	après 2 saisons rizicoles (2ème année).
Janvier	1983	après 3 saisons rizicoles (3ème année).
Janvier	1985	après 5 saisons rizicoles (5ème année).

Sur chaque parcelle dix sondages à la tarière à 120 cm de profondeur sont effectués et prélevés pour chaque tranche de 20 cm de sol. Les emplacements sont répartis au hasard et donc différents à chaque série de prélèvements. Les mesures de pH et de conductivité sur extraits aqueux 1/5 sont faites sur les échantillons séparés pour apprécier la dispersion des mesures. Le dosage des ions majeurs est réalisé après regroupements des dix échantillons de même profondeur sur chaque parcelle.

Parallèlement des mesures d'infiltration au dispositif Müntz géant ont été répétées sur les mêmes sites afin de suivre l'évolution de certains paramètres hydriques des sols au fur et à mesure des années de culture ; elles ont été complétées par des tests de perméabilité effectués au laboratoire sur échantillons remaniés.

On peut donc calculer, pour chaque profondeur, la valeur moyenne de chaque paramètre, et la dispersion des valeurs (écart-type). Cependant, la comparaison de deux moyennes, à deux dates différentes par exemple, exige la connaissance de l'intervalle de confiance de ces moyennes. Il faut pour cela connaître la loi de distribution des valeurs mesurées ; le nombre de prélèvements limité par les moyens disponibles, ne le permet pas. On peut cependant faire une hypothèse sur la loi de distribution, et la vérifier par un test. Nous avons testé l'hypothèse de normalité de la distribution des mesures, par la méthode de Shapiro-Wilk. Nous nous sommes aperçus que dans la moitié des cas, l'hypothèse de normalité de distribution des mesures de conductivité devait être rejetée avec un risque d'erreur faible. Une distribution log-normale ne pouvait non plus être acceptée. Notons qu'ici nous ne pouvons rejeter comme aberrantes les valeurs extrêmes mesurées, qui ont été systématiquement vérifiées. Ceci montre bien la forte hétérogénéité des sols quant à la salinité. Le nombre important de mesures sur une petite surface est donc justifié à posteriori. Malgré ceci, nous donnerons dans nos résultats un intervalle de confiance de la moyenne supposant une distribution normale en sachant que, dans le cas des conductivités, nous faisons une erreur systématique. Si la loi de distribution ne varie pas dans le temps, des comparaisons entre les résultats sont cependant possibles.

- Un dispositif de seize piézomètres a été mis en place en août 1980 selon trois séquences transversalement à la vallée alluviale et dans des positions géomorphologiques variées (glacis, cuvette, levées, delta de rupture) :

Tilène T<sub>1</sub> à T<sub>5</sub> : 5 piézomètres.  
 Pont-Gendarme PG<sub>1</sub> à PG<sub>4</sub> : 4 piézomètres  
 Ndiaye ND<sub>1</sub> à ND<sub>7</sub> : 7 piézomètres.

La profondeur, la conductivité et le bilan ionique des eaux de nappe ont été suivis durant les quatre saisons culturales et les contre-saisons sèches.

- Un suivi de la qualité des eaux d'irrigation à dix stations de pompage et de celles évacuées à trois stations d'exhaure a été effectué soit par des prélèvements manuels et mesures du pH, de la conductivité, et du bilan ionique au laboratoire, soit par un dispositif de mesures et d'enregistrement automatique "in situ" équipé de capteurs spécifiques et alimenté par énergie solaire (LOYER J.Y. - ZOGBI R. 1983) (photo 10). La quantité d'eau pompée et évacuée des périmètres étant estimée à chaque instant à partir des caractéristiques et des temps de marche des pompes électriques, une tentative de bilan des eaux et des sels a pu être établie sur trois périmètres sur plusieurs cycles rizicoles.

### 3. Résultats.

#### 3.1. Evolution de la salinité et du pH des sols (fig. 21 et 22).

a) Sols de levée à texture hétérogène et initialement très salés.

Le dessalement de cette parcelle limité aux soixante premiers centimètres du sol lors de la première campagne (57 % en moyenne, alors que les horizons profonds ont augmenté de 15 %), atteint par la suite la profondeur (120 cm) et s'est régulièrement poursuivi dans le temps, plus lentement en valeur absolue, pour atteindre 97 % de dessalement en moyenne après quatre années de riziculture par rapport à l'état initial (99 % sur la couche 0 - 20 cm et 95 % sur la couche 100 - 120 cm).

Néanmoins en saison sèche un resalement se produit après arrêt de l'irrigation par remontées capillaires à partir des tranches inférieures (tableau 11). Après la deuxième année, ce phénomène ne s'est plus manifesté, le dessalement atteignant déjà 90 % en moyenne sur 120 cm.

Le pH a notablement augmenté les deux premières années sur tout le profil, mais surtout en surface, atteignant des valeurs maximales de 9,6. Les années suivantes cette élévation s'est poursuivie en profondeur mais plus lentement, atteignant deux unités. Par rapport à la première année de mesure, la moitié des dix valeurs mesurées dépasse 9 dans la couche 100 - 120 cm (tableau 12).

b) Sols de cuvette, argileux sur sable à 40 cm, initialement peu salés.

La conductivité a nettement diminué dès la première année dans les cinquante premiers centimètres argileux (- 49 %), mais a augmenté en profondeur dans le sable, atteignant 190 % par rapport à l'état initial dans la couche 60 - 100 cm probablement en liaison avec la remontée de la nappe salée lors de l'irrigation (cf. évolution des nappes). Le dessalement se poursuit lentement dans l'argile et atteint la couche sableuse la troisième année. A noter un resalement important en valeur relative, la quatrième année, mais les valeurs absolues atteintes restent faibles (tableau 11).

Le resalement de saison sèche dans l'argile est relativement limité (+ 39 %), en raison de la salinité initiale peu élevée.

Les pH ont montré une faible évolution dans ce type de sol ; au bout des quatre années, on constate une légère augmentation de 0,5 unité pH en moyenne, les valeurs atteintes restant inférieures ou au plus égales à 7 (tableau 12).

c) Sols de fond de cuvette, très argileux, moyennement salés, et sulfatés acides.

Le dessalement a été très faible la première année (bilan - 13 % de 0 à 120 cm) en raison d'une interruption de l'irrigation après deux mois par suite du mauvais état de la culture probablement lié à des causes microbiologiques. Par la suite, le dessalement a évolué très lentement en raison de la texture très argileuse et de la faible maturation physique des horizons profonds issus d'anciennes vases à sulfures très peu perméables. Au total le bilan du dessalement est de 35 % en moyenne et le niveau de salure résiduel peut sans doute encore affecter certaines cultures notamment en cas de stress hydrique (tableau 11).

Profondeurs cm	Conductivité $\mu\text{Siemens/cm}^{-1}$					% de désalement
	Août 1980	Janvier 1981	Janvier 1982	Janvier 1983	Janvier 1985	1980 - 1985
0 - 20	5800	860	426	183	71	- 99 %
20 - 40	4500	1490	463	251	96	- 98 %
40 - 60	3500	2770	775	471	132	- 96 %
60 - 80	3400	3350	1120	307	119	- 96 %
100 - 120	3020	3660	1124	250	150	- 95 %

Parcelle 1 : levée (texture hétérogène)

0 - 20	450	129	130	113	210	- 53
20 - 40	330	147	200	110	231	- 30
40 - 60	310	282	244	117	207	-33
60 - 80	140	453	357	131	141	0
80 - 100	214	562	359	129	136	-40
100 - 120	350	380	261	117	123	- 65

Parcelle 2 : cuvette (argileux sur sable)

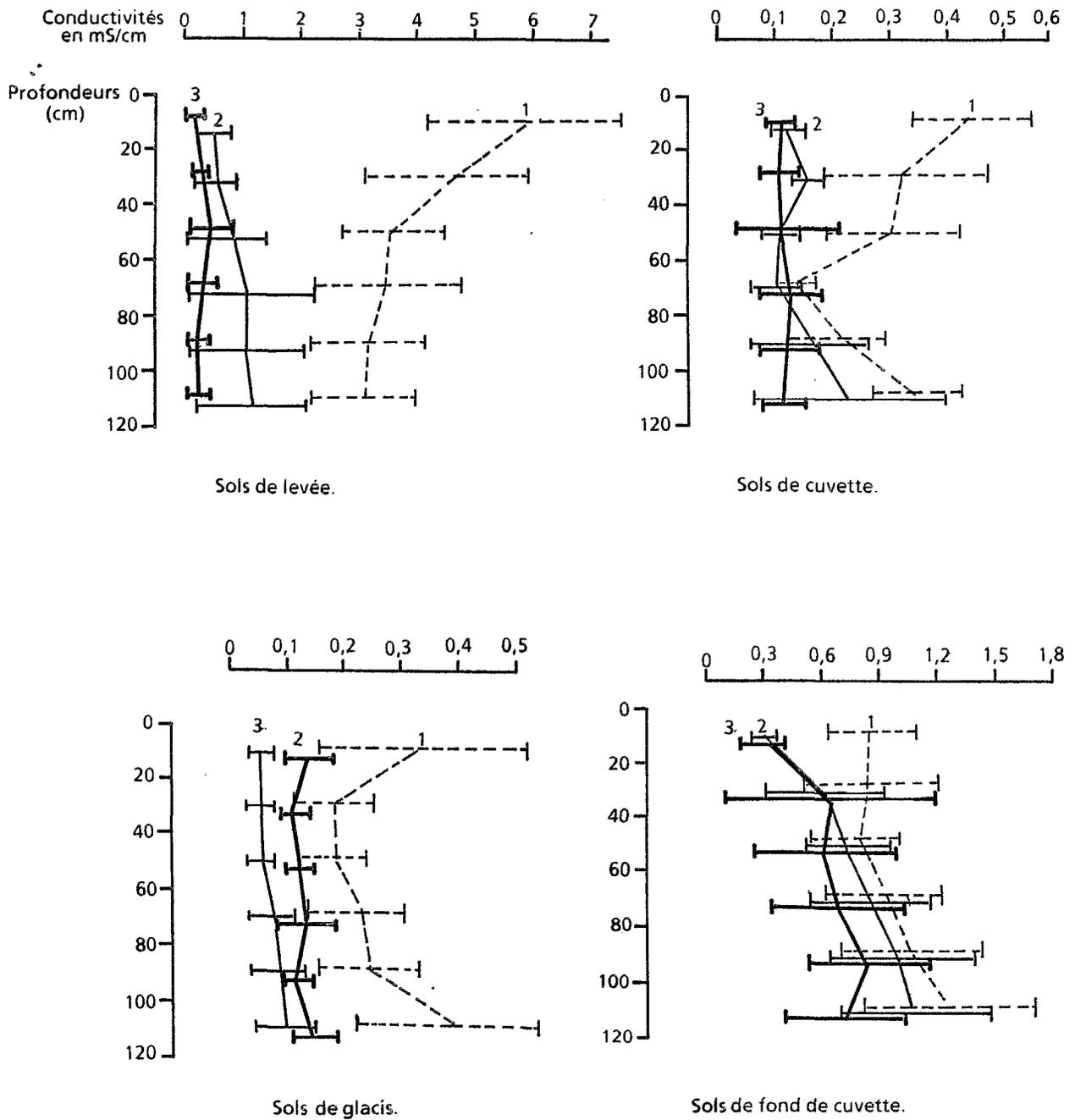
0 - 20	340	123	61	137	90	- 73
20 - 40	180	124	53	110	135	- 25
40 - 60	180	87	55	121	121	- 33
60 - 80	224	136	80	297	96	- 57
80 - 100	245	169	89	414	82	- 66
100 - 120	383	167	103	262	115	- 70

Parcelle 3 : glacis (texture légère)

0 - 20	863	504	289	306	547	- 37
20 - 40	856	908	630	658	520	- 39
40 - 60	770	737	740	613	503	- 35
60 - 80	925	908	861	694	642	- 31
80 - 100	1058	976	1013	844	756	- 28
100 - 120	1248	938	1071	705	739	- 41

Parcelle 4 : fond de cuvette (très argileux)

Tableau 11 : Evolution des conductivités sur extrait 1/5 (moyennes de 10 mesures)



Moyennes et intervalles de confiance à 5 %.

1 : Août 80 avant culture

2 : Janvier 82 après deux saisons de culture

3 : Janvier 83 après trois saisons de culture.

Fig. 21 Evolution de la conductivité dans les différents types de sols

PH				
Août 1980	Janvier 1981	Janvier 1982	Janvier 1983	Janvier 1985
5,4	6,6	6,8	6,4	6,1
6	7	7,4	7,1	7,4
6,2	7,2	7,9	7,7	7,8
6,2	7,3	8,2	8,1	8,2
6,5	6,7	8,2	8,5	8,6

## 1 Sols de levée

6,1	6,5	6,7	6	6,6
6,5	6,5	6,6	6,3	6,8
6,8	6,4	6,6	6,8	6,8
6,6	5,9	6,0	6,5	7,0
6,1	5,3	5,5	6,3	6,9
5,8	5,0	5,1	5,8	6,3

## 2 Sols de cuvette

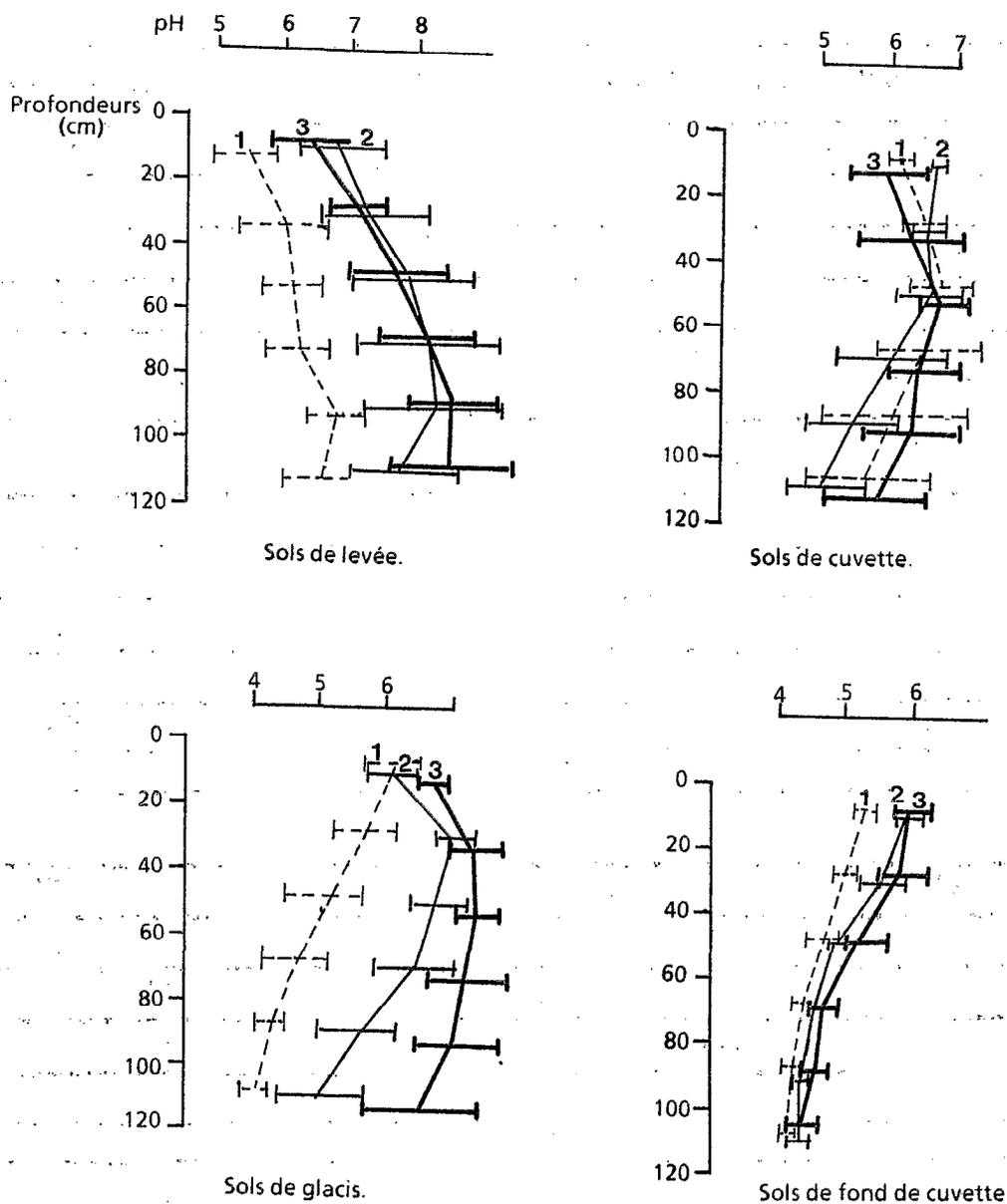
6,1	6,3	6,1	6,8	5,9
5,6	6,5	7,1	7,4	7
5	5,7	6,8	7,4	6,3
4,6	5,3	6,4	7,3	6,1
4,2	4,5	5,5	7,1	5,7
4	4,3	5	6,5	5,2

## 3 Sols de glacis

5,2	5,7	5,9	6	6
4,9	5,3	5,5	5,8	5,7
4,6	4,8	4,7	5,2	5,1
4,4	4,5	4,5	4,7	4,7
4,2	4,3	4,2	4,6	4,5
4,1	4,3	4,2	4,4	4,4

## 4 Sols de fond de cuvette

Tableau 12 : Evolution des PH sur extraits 1/5 (moyenne de 10 mesures)



Moyennes et intervalles de confiance à 5 %.

1 : Août 80 avant culture

2 : Janvier 82 après deux saisons de culture

3 Janvier 83 après trois saisons de culture.

Fig. 22 Evolution du pH dans les différents types de sols.

Le resalement des horizons de surface est limité dans ce type de sol en raison de la très faible perméabilité qui chute rapidement avec la teneur en eau, et de la fissuration large qui limite les remontées capillaires.

Le pH très bas à l'origine et caractéristique de ce type de sol issu d'anciennes mangroves, montre une augmentation légère et régulière pendant les quatre années, plus sensible en surface (gain de 0,8 unité), qu'en profondeur dans le matériau peu "maturé" (gain de 0,3 unité). Les valeurs absolues atteintes, supérieures à 5 en surface, sont plus satisfaisantes pour la riziculture (tableau 12).

d) Sols de glacis à texture légère dans l'ensemble et de faible salinité initiale.

Le dessalement de cette parcelle est important sur toute l'épaisseur des profils dès la première année (- 48 %), atteignant au total - 54 % après quatre années. Le resalement constaté en 1983 empêche un bilan plus favorable ; les valeurs mesurées restent en valeur absolue peu élevées (tableau 11).

Le resalement de la couche 0 - 20 cm en saison sèche est important en valeur relative (+ 99 %) mais reste, dans le cas de sols à salinité initiale faible, limité en valeur absolue (250  $\mu\text{S}/\text{cm}$  sur E 1/5).

Le pH mesuré sur extrait 1/5 a régulièrement augmenté au cours des années, dépassant deux unités la troisième année, pour se limiter à 1,5 unité après le cinquième année. Localement des valeurs de 8,3 et 8,6 sont atteintes. La texture sableuse des sols de cette parcelle faiblement tamponnés, explique sans doute les variations rapides de l'acidité (tableau 12).

e - Conclusions.

Après cinq années de riziculture submergée, avec un apport de 12 000  $\text{m}^3$  d'eau à l'hectare environ, il apparaît que le dessalement des sols s'effectue partout de façon satisfaisante sauf dans deux cas :

1° Sur les sols de levée à salure initiale élevée, le dessalement est effectif mais le pH augmente notablement sur tout le profil. Plusieurs facteurs ont été mis en cause :

- l'emploi d'engrais phosphatés alcalinisants (phosphate de calcium),
- les réactions de réduction de certains éléments et du soufre en particulier, consommatrices de protons dans les sols submergés (PONNAMPERUMA F.N. 1972),
- l'alcalisation après lessivage des sels et l'hydrolyse du sodium fixé sur le complexe adsorbant.

Les très hautes valeurs des rapports Na/Ca et Na/Mg (28 et 16 respectivement) mesurées sur les extraits 1/5 (cf § 3.2 ci après) et la qualité des nappes phréatiques à fort SAR (30 à 40), ainsi que le niveau de pH atteint, confirment cette alcalisation dont les manifestations sont déjà sensibles sur certaines propriétés des sols : forte dispersion des échantillons de profondeur lorsqu'ils sont traités à l'eau et baisse sensible de perméabilité. Différents tests de perméabilité ont été effectués :

- Sur échantillons remaniés, prélevés depuis 1980 avant et après riziculture, séchés, broyés et tamisés à 2 mm et sous charge d'eau constante, on a constaté (J.Y. LE BRUSQ, 1985) : sur sols de levée une chute spectaculaire de perméabilité dès la fin de la première campagne rizicole ; au bout de quatre heures de percolation, des perméabilités nulles ont été mesurées ; sur sols de cuvette on observe une diminution dans les horizons intermédiaires et profonds ; la tendance est moins nette sur sols de glacis (fig. 23).

- Les mesures hydriques effectuées au dispositif Müntz géant et répétées sur les mêmes sites, au départ et après 1, 2 et 3 années de riziculture ont montré (P. ZANTE et J.Y. LOYER, 1984) : une baisse sensible de la perméabilité dès la première année qui se traduit par une évolution sensible des principaux paramètres hydriques mesurés (P. ZANTE, 1984) :

"En 1980, avant mise en culture, le débit d'infiltration est pratiquement régulier dès le début de l'expérimentation (4,5 l/h) (fig. 24 a) ; la quantité d'eau apportée permet d'humecter le profil jusqu'à 2,50 m et de l'amener à saturation apparente sur cette profondeur.



PHOTO 11. Cultures traditionnelles de sorgho de décrue dans les cuvettes inondables entre les levées (NDIERBA)



PHOTO 12. Aménagements hydro-agricoles tertiaires avec station de pompage, canaux d'irrigation et de vidange sur chaque parcelle rizicoles (LAMPSAR)

En 1981, soit après la première campagne rizicole, on constate une nette diminution du débit d'infiltration (1,3 l/h).

En 1982, soit après deux campagnes, on constate pour une même durée d'infiltration qu'il n'a été possible d'infiltrer que 513 litres d'eau, soit un débit stabilisé de 0,3 l/h.

Concernant la vitesse d'avancement du front d'humectation (fig. 24 b), en 1980, on peut essentiellement distinguer deux phases : une phase d'avancement rapide jusqu'à un mètre de profondeur, puis la phase lente à 0,07 cm/heure. En 1981, on distingue encore ces deux phases, mais la première phase est plus lente qu'en 1980 et la deuxième phase (lente 0,05 cm/h), apparaît dès 50 cm de profondeur.

Pour la saturation apparente (fig. 24 c), la comparaison des trois profils hydriques à saturation apparente assimilée à la porosité totale du sol, montre que celle-ci a peu varié après la première année de riziculture ; par contre en 1982, elle a diminué significativement sur le premier mètre de profondeur".

2° Sur les sols de fond de cuvette dont les horizons profonds sulfatés acides et issus des anciennes vasières à mangroves sont peu "maturés" physiquement (indice  $n > 1,4$ , et consistance peu développée) (PONS L.J. et ZONNEVELD I.S., 1965) et difficilement perméables, où le lessivage des sels est difficile et le dessalement lent.

Par ailleurs un resalement par remontées capillaires lors de la contre-saison sèche a été constaté seulement sur sols à texture légère (glacis et levée). Ce phénomène qui s'est progressivement atténué au cours des années, n'en demeure pas moins un risque lors de la pratique d'une irrigation intermittente, à la raie, comme en culture à plat ; un dessalement poussé est nécessaire avant d'envisager ce mode d'irrigation qui au vu de ses effets néfastes, doit être parfois abandonné au profit de la riziculture sous submersion permanente (Lampsar - Nianga).

L'alcalisation constatée est un élément inquiétant de dégradation des propriétés physiques de ces sols au cours des années, après leur dessalement. Pour neutraliser les effets néfastes du sodium sur la perméabilité et le dessalement, l'utilisation d'un amendement calcique (chaux) a été testée au laboratoire à titre expérimental sur colonnes de sol dans les conditions suivantes :

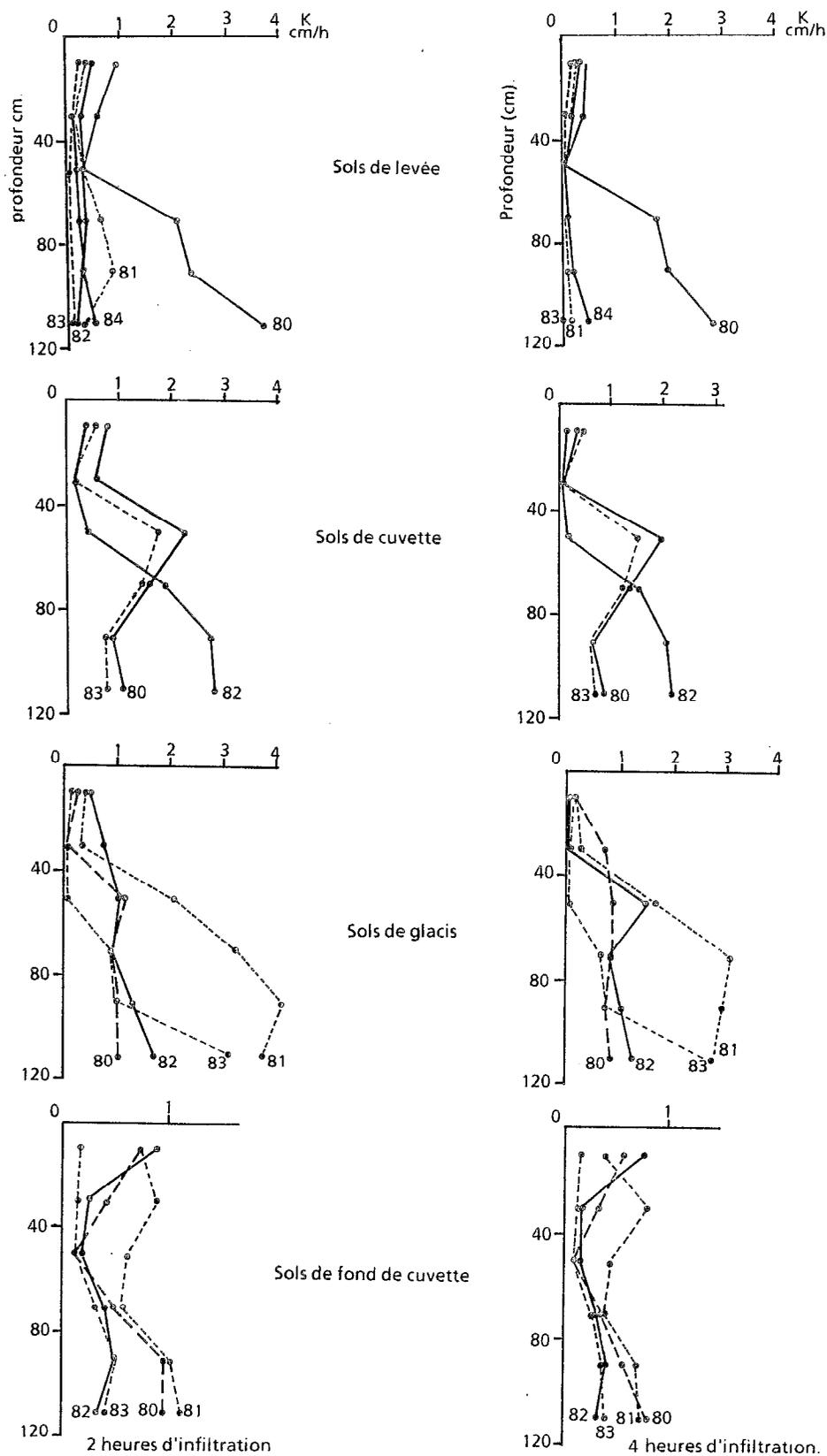


Fig. 23 Evolution de la perméabilité au laboratoire (J.Y. LE BRUSQ, 1985)

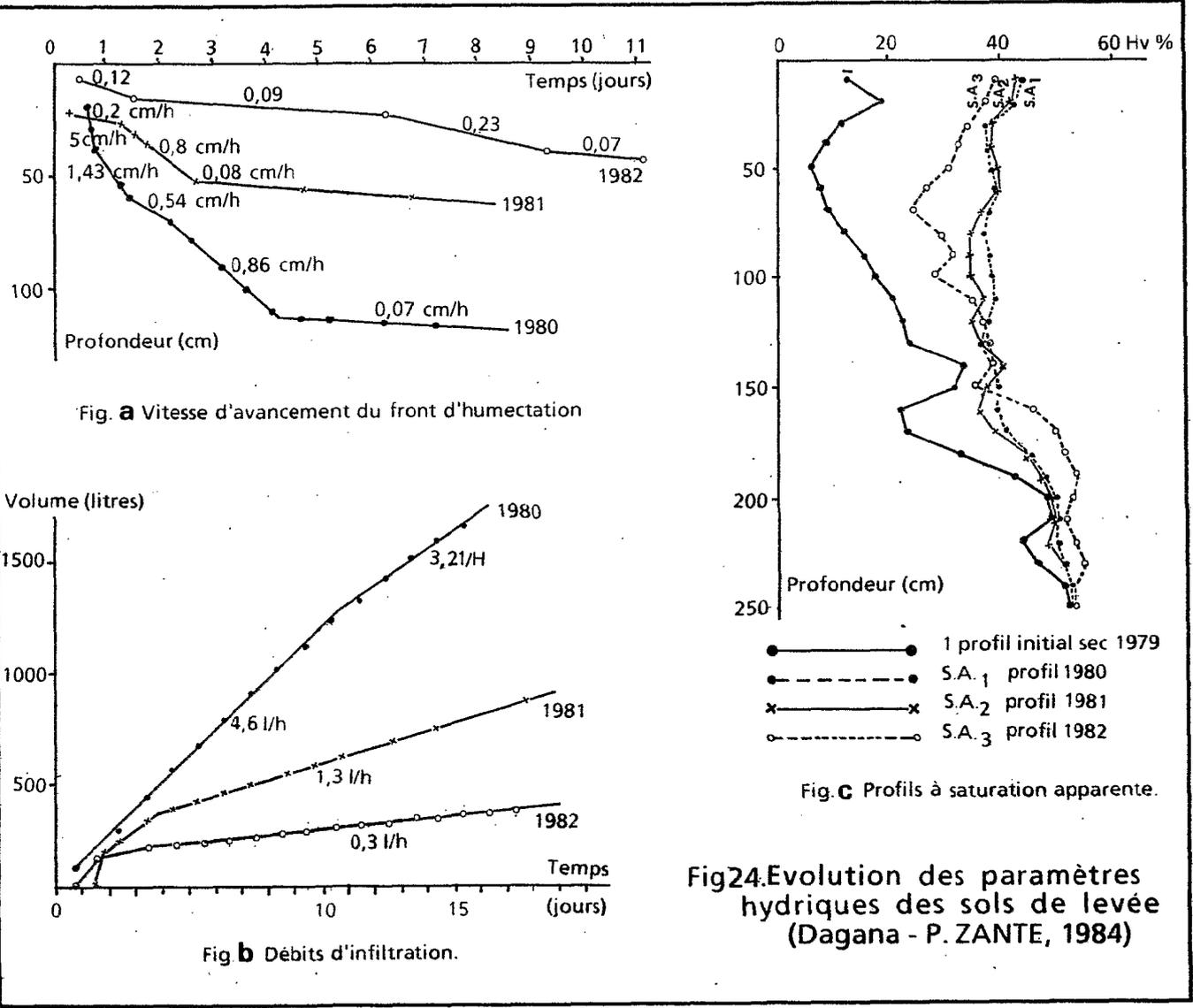


Fig24. Evolution des paramètres hydriques des sols de levée (Dagana - P. ZANTE, 1984)

500. g de terre broyée et tamisée à 2 mm provenant de l'horizon de surface d'un sol hydromorphe salé (1,9 mS/cm sur l'extrait 1/5) sont placés dans une colonne de 75 mm de diamètre, puis submergés sous 25 cm d'eau. Le volume et la conductivité de l'eau s'écoulant à la base de la colonne (l'effluent) sont mesurés. Trois répétitions sur le sol naturel, et trois répétitions sur sol additionné de 0,7 % de chaux sont effectuées. Les résultats des trois répétitions ont été similaires dans chaque cas ; sur le figure 25, sont représentés les volumes d'eau écoulés en fonction du temps, et les conductivités de l'effluent, avec et sans addition de chaux. Il ressort immédiatement que le sol additionné de chaux a une perméabilité meilleure que le sol naturel et l'élimination des sels est améliorée par cet amendement calcique. De plus, l'effluent de la colonne contenant le sol naturel contenait de l'argile en suspension à la fin de l'expérience, ce qui n'était pas le cas avec le sol additionné de chaux. Il semble donc que l'apport de calcium ait limité les phénomènes de dispersion des argiles dûs fréquemment à un excès de sodium échangeable sur le complexe adsorbant. Cet effet est évidemment favorable à l'évolution du sol (meilleure structure, perméabilité accrue, dessalement facilité).

Des expériences sur parcelles seraient donc à envisager, pour tenter de confirmer ces résultats en conditions réelles de culture.

### 3.2 - Evolution des rapports ioniques dans les extraits aqueux 1/5 des sols.

Après regroupement et mélange de dix échantillons par parcelle et par tranche de 20 cm de profondeur, les extraits 1/5 ont été analysés pour les ions majeurs ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{=}$ ). L'opération a été répétée chaque année, depuis 1980, avant la mise en culture et pendant trois années après.

Il ressort des résultats obtenus que l'élimination des divers ions ne s'est pas faite de la même façon dans toutes les parcelles :

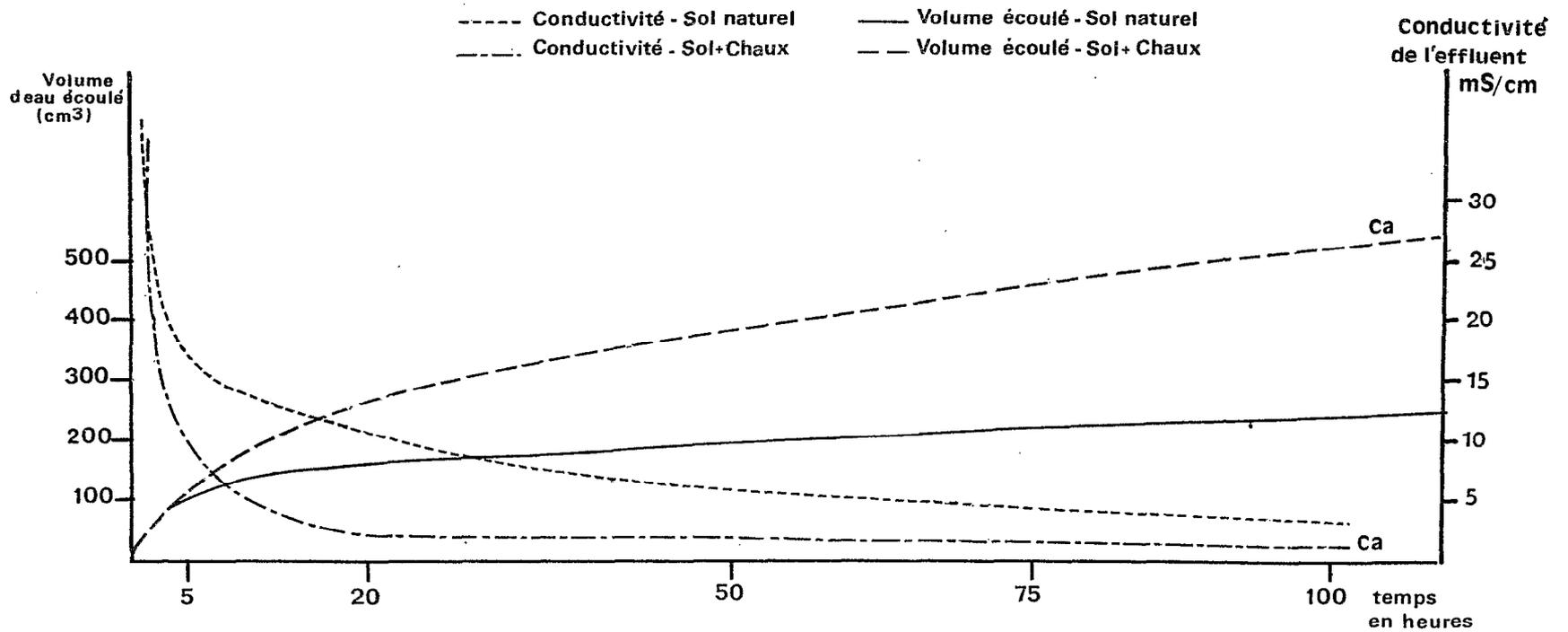


Fig.25-Evolution de la perméabilité et de la conductivité de l'effluent durant la lixiviation d'une colonne de sol

- dans les sols de levée (fig. 26 et tableau 13), les chlorures ont été éliminés plus rapidement que les sulfates (baisse du rapport  $Cl/SO_4$ ). Le sodium a été lessivé plus vite que le calcium et le magnésium en surface, mais s'est accumulé en profondeur, ce qui a entraîné l'alcalisation mentionnée plus haut. Le magnésium a été éliminé légèrement plus vite que le calcium, tandis que le potassium s'évacuerait nettement moins vite que le sodium,

- dans les sols de cuvette l'évolution après une saison de culture était semblable à celle observée pour les sols de levée (cf. tableau 13 et figure 26 b), puis s'est inversée : augmentation des rapports  $Na/Ca$  et  $Na/Mg$ , commençant en surface (Janvier 1982, après deux années), puis s'étendant à la profondeur (Janvier 1983, après trois années) ; augmentation du rapport  $Cl/SO_4$ , diminution du rapport  $Ca/Mg$ . Dans le même temps, il est vrai, la vitesse de dessalement diminuait considérablement,

- dans les sols de glacis (cf. tableau 15 et figure 26 c), les rapports ioniques ont eu une évolution irrégulière, et il ne paraît pas encore possible de dégager une tendance. Ces sols étant très sableux, les migrations des sels, tant vers le bas (lessivage), que vers le haut (remontées capillaires) sont très rapides, et la faiblesse des taux de sel mesurés rend les variations relatives et absolues moins significatives,

- dans les sols de fond de cuvette (cf. tableau 16 et fig. 26 d), les rapports ioniques ont relativement peu varié, ce qui s'explique par la lenteur du dessalement de cette parcelle. On note une élimination rapide des chlorures en surface et une baisse du rapport  $Na/K$ .

	Cl/SO <sub>4</sub>					
	0-20cm	20-40cm	40-60cm	60-80cm	80-100cm	100-120cm
Août 1980	5	5,46	7,7	7,9	7,3	15
Janvier 1981	1,34	0,94	1,93	3,9	6	5,8
Janvier 1982	0,26	0,32	0,57	1,2	1,67	1,23
Janvier 1983	0,49	0,15	0,11	0,18	-	0,7

	Na/Ca					
	Août 1980	3,75	5,7	6,6	7	6,31
Janvier 1981	3,16	6	7	6,7	6,26	4,38
Janvier 1982	2,07	4,9	7,7	8,41	20,1	6,9
Janvier 1983	2,58	2,14	3,8	13,2	-	28

	Na/Mg					
	Août 1980	2,8	3,7	4,1	3,9	4,28
Janvier 1981	3,35	4,2	4,6	4,7	3,6	3,27
Janvier 1982	2,62	6,76	6,5	5,5	10,2	5,17
Janvier 1983	2,79	6,45	4,9	10,6	4,1	15,8

	Ca/Mg					
	Août 1980	0,74	0,65	0,62	0,56	0,68
Janvier 1981	1,06	0,7	0,67	0,68	0,58	0,75
Janvier 1982	1,27	1,38	1,84	0,65	0,50	0,75
Janvier 1983	1,08	1,61	1,3	0,8	-	0,56

	Na/K					
	Août 1980	37,5	40	33	33	39
Janvier 1981	19	16	25	35,7	34,8	33
Janvier 1982	7,34	12,5	17,8	21,6	24,6	27,6
Janvier 1983	5,05	8,23	11,5	13,7	-	19,7

Tableau 13 : Evolution des rapports ioniques dans les sols de levée

	Cl/SO <sub>4</sub>					
	0-20cm	20-40cm	40-60cm	60-80cm	80-100cm	100-120cm
Août 1980	3,3	1,8	0,3	1,4	0,52	0,22
Janvier 1981	0,45	0,22	0,11	0,55	0,55	0,33
Janvier 1982	2	1,8	0,12	0,09	0,19	0,82
Janvier 1983	2,1	7,5	12,3	6,2	2,9	6,1

	Na/Ca					
	Août 1980	4,3	4,3	1	1,2	0,35
Janvier 1981	1	1,2	0,43	0,53	1,13	1,34
Janvier 1982	9,2	8	2,8	0,39	0,4	2,97
Janvier 1983	11,8	15,6	8,2	8,7	7,2	11,8

	Na/Mg					
	Août 1980	3,25	3,25	1,6	1,5	3,5
Janvier 1981	0,68	1,59	1,36	1,84	2,58	1,13
Janvier 1982	6,6	5,7	2,54	0,79	1,26	3,3
Janvier 1983	8,5	7,8	5,05	4,9	4,7	6,6

	Ca/Mg					
	Août 1980	0,75	0,75	1,6	1,25	10
Janvier 1981	0,63	1,32	3,12	3,45	2,27	0,84
Janvier 1982	0,7	0,7	0,91	2,03	3,16	1,11
Janvier 1983	0,7	0,5	0,6	0,56	0,65	0,6

	Na/K					
	Août 1980	13	13	16	6	7
Janvier 1981	5	6	6,3	9	8,5	4,6
Janvier 1982	3,45	10,5	8,25	5,37	6,86	7,81
Janvier 1983	6,7	8,3	7,1	7,1	5,9	7,1

Tableau 14 : Evolution des rapports ioniques dans les sols de cuvette

	Cl/SO <sub>4</sub>					
	0-20cm	20-40cm	40-60cm	60-80cm	80-100cm	100-120cm
Août 1980	2,5	1,07	1,42	1,5	1,25	2
Janvier 1981	2,5	2,02	2,6	3,8	4,4	6,2
Janvier 1982	2,35	6	2,5	4,6	2,24	2,5
Janvier 1983	6,1	6,3	-	0,145	0,08	0,52

	Na/Ca					
	Août 1980	12,3	12,5	7,5	10	10,5
Janvier 1981	8,3	7,05	8,3	7,5	10,3	11,9
Janvier 1982	12,6	11,5	12,2	13	15	13,5
Janvier 1983	5	9,7	2,7	0,46	0,21	1

	Na/Mg					
	Août 1980	12,3	8,3	15	10	5,26
Janvier 1981	8,1	5,9	5,5	5,4	5,14	4,9
Janvier 1982	12,6	6,9	7,6	7,8	8,1	7,2
Janvier 1983	5,75	6,6	4,2	0,96	0,55	1,75

	Ca/Mg					
	Août 1980	1	0,66	2	1	0,5
Janvier 1981	1	0,84	0,7	0,72	0,5	0,53
Janvier 1982	1	0,6	0,63	0,6	0,55	0,53
Janvier 1983	1,15	0,68	1,9	2,09	2,6	1,75

	Na/K					
	Août 1980	18,5	8,33	15	10	10,5
Janvier 1981	8,3	7,8	10,2	9,6	9,6	11,1
Janvier 1982	5,7	6,9	6,8	7,8	6,4	6,8
Janvier 1983	6,4	8,4	12,2	6,8	5,3	6,4

Tableau 15 : Evolution des rapports ioniques dans les sols de glacis

	Cl/SO <sub>4</sub>					
	0-20cm	20-40cm	40-60cm	60-80cm	80-100cm	100-120cm
Août 1980	5,3	1,58	0,52	1,34	1,41	1,56
Janvier 1981	0,25	0,11	0,69	0,94	0,9	0,97
Janvier 1982	-	0,35	0,58	0,92	0,97	0,96
Janvier 1983	1,1	0,17	0,30	1,3	0,84	0,90

	Na/Ca					
	Août 1980	3,44	4,21	12	12,5	15
Janvier 1981	3,58	1,11	8,47	9,36	12,2	14
Janvier 1982	-	5,64	11,7	12,4	13,7	17,2
Janvier 1983	9,8	1,71	3,87	9,52	9,57	11,07

	Na/Mg					
	Août 1980	3,24	3,69	10	8,3	9
Janvier 1981	3,71	1,56	7,6	7,7	9,13	9,6
Janvier 1982	-	5,1	9,42	9,3	10	11
Janvier 1983	6,9	2,16	4,7	9	8,45	9,5

	Ca/Mg					
	Août 1980	0,94	0,88	0,83	0,67	0,6
Janvier 1981	1,04	1,41	0,9	0,82	0,75	0,68
Janvier 1982	1	0,91	0,8	0,76	0,73	0,64
Janvier 1983	0,7	1,26	1,21	0,95	0,87	0,86

	Na/K					
	Août 1980	11	9,8	12	12,5	15
Janvier 1981	7,5	7,17	10,9	13,1	12,6	14
Janvier 1982	-	8,12	11,5	10,9	11,7	13,4
Janvier 1983	8,3	6,4	9	9,4	12,4	12,6

Tableau 16 : Evolution des rapports ioniques dans les sols de fond de cuvette

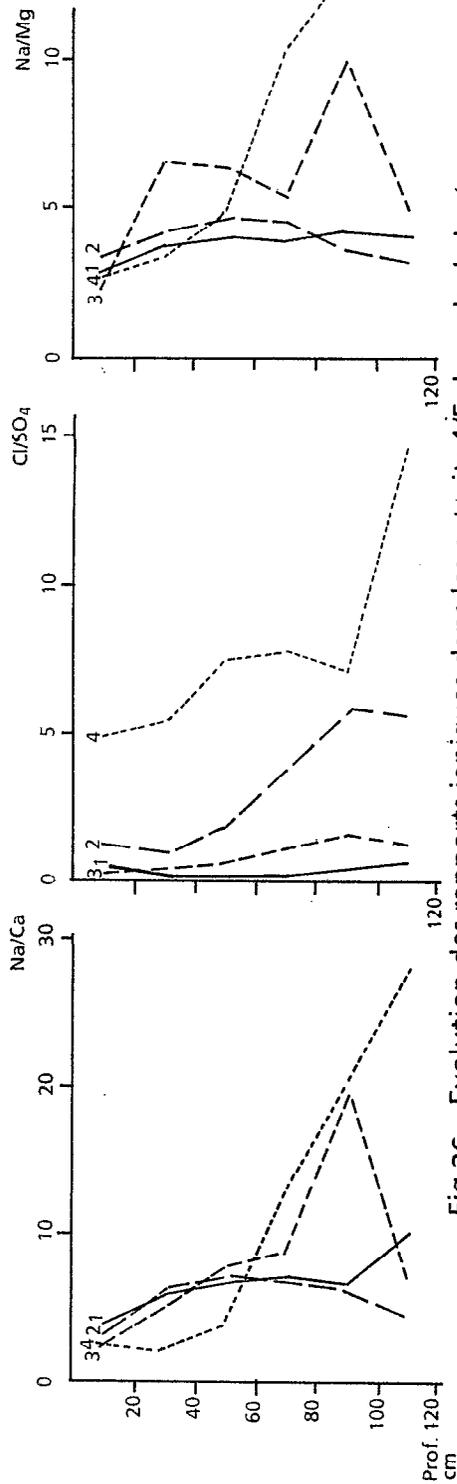


Fig. 26 a- Evolution des rapports ioniques dans les extraits 1/5 des sols de levée

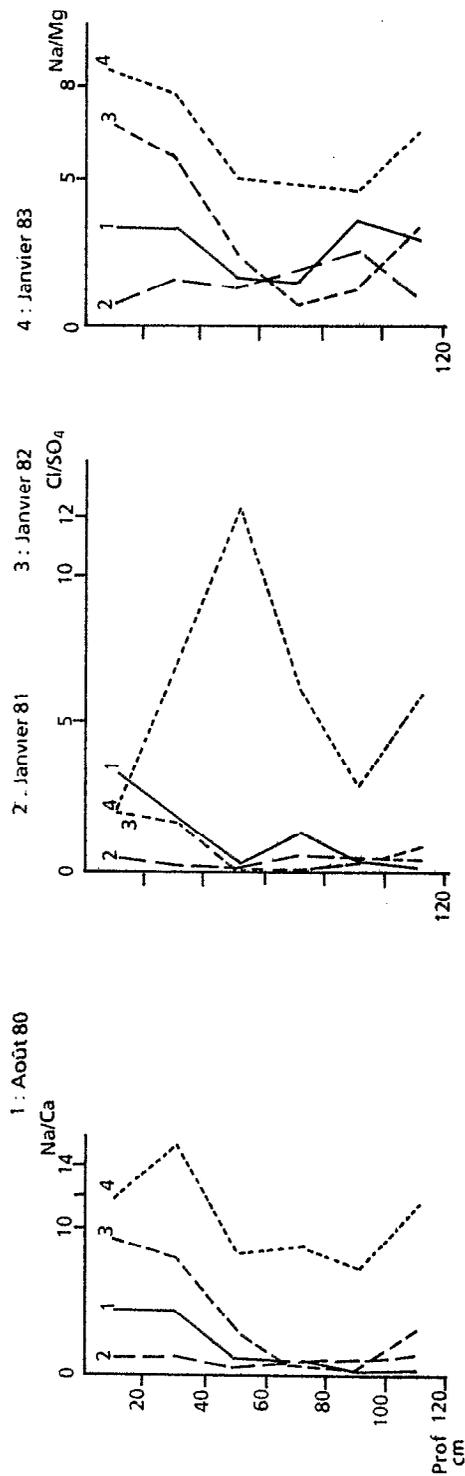


Fig. b Evolution des rapports ioniques dans les extraits 1/5 des sols de cuvette

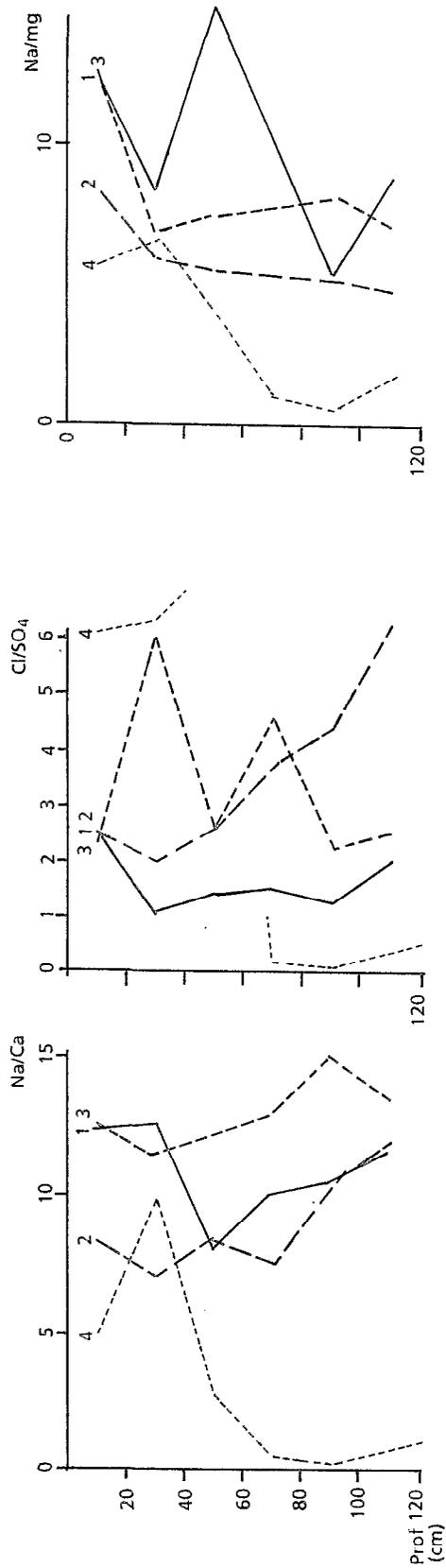


Fig. c Evolution des rapports ioniques dans les extraits 1/5 des sols de glaciers

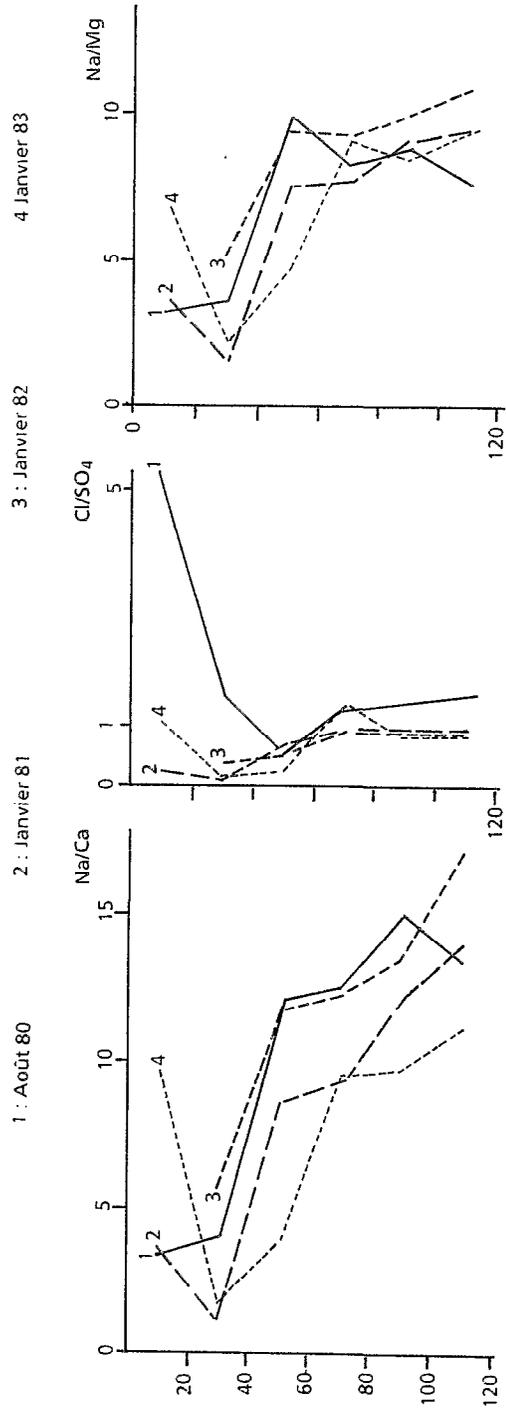


Fig. d Evolution des rapports ioniques dans les extraits 1/5 des sols de fond de cuvette

## Conclusion.

Après trois ans de riziculture, et contrairement à ce qu'on pouvait attendre en fonction de la mobilité des ions et de la qualité des eaux d'irrigation (Na/Ca et Na/Mg 1 à 2), l'élimination du sodium ne s'est pas faite correctement, et dans deux parcelles sur quatre, on observe une indéniable accumulation relative de cet élément dans les sols confirmant l'alcalinisation constatée au niveau du pH.

Si cette évolution alcalisante devait se poursuivre, il est à craindre que certains des sols des périmètres, parmi ceux qui étaient initialement très salés, n'offrent qu'une ambiance physico-chimique médiocre après plusieurs années de riziculture : faible perméabilité à l'eau et à l'air, forte compacité, déséquilibres nutritionnels. Un rééquilibrage des rapports cationiques pourrait être obtenu par apport d'amendement calcaïques (calcaire, gypse ou chaux).

### 3.3. - Evolution des nappes alluviales superficielles.

#### a) Variations de profondeur.

Avant la culture, la profondeur des nappes par rapport à la surface du sol variait selon la position géomorphologique de 1,4 m dans les cuvettes, à 2,6 m dans les levées alluviales.

Après la mise en eau des parcelles, on observe une montée rapide des nappes qui atteignent quelques décimètres en dessous du sol (20 à 50 cm) en 10 à 30 jours sans qu'apparaisse de relation nette entre vitesse de remontée et position du piézomètre (type de sol, distance au drain). Ce niveau se maintient pratiquement constant avec de faibles oscillations, pendant toute la durée du cycle rizicole ; après la vidange des parcelles en fin de cycle, la baisse de niveau est rapide pendant deux semaines environ, et se poursuit ensuite plus lentement pour retrouver sensiblement le niveau initial après la première année de culture. Les années suivantes ce niveau de contre-saison sèche s'élève sensiblement (de 30 à 50 cm) par rapport à la première année.

L'influence de la remontée de la nappe sous l'effet de la submersion se fait sentir hors des périmètres de culture jusqu'à au moins 30 mètres des parcelles endiguées, mais à moins de 150 mètres dans les cas étudiés.

Il ressort de ceci que le dessalement des sols en profondeur sera limité par la remontée des nappes dont les eaux ne sont pas toujours de bonne qualité et que des contaminations des sols soit directement par contact lors des remontées, soit indirectement par ascensions capillaires en saison sèche, sont possibles.

#### b) Evolution de la salinité globale.

La première saison de culture ne modifie pas sensiblement la salinité des nappes ; globalement, sur l'ensemble des seize mesures, celle-ci, après une légère diminution pendant la submersion est revenue après un cycle rizicole, pratiquement au même niveau qu'avant culture (31,3 mS/cm contre 33,4 mS/cm avant). Des variations locales sont néanmoins observées (oscillations de salinité), sans doute dues à des mouvements latéraux liés à différents facteurs (topographie, perméabilité, proximité des drains), et dont l'interprétation est délicate.

A partir de la deuxième campagne, la salinité des eaux de nappe diminue progressivement pour atteindre jusqu'à - 75 % après cinq années de riziculture (tableau 17).

Après une première saison culturale qui avait surtout permis le dessalement des sols, on assiste donc à un dessalement progressif des nappes du moins dans leur tranche superficielle, mais beaucoup plus lent.

#### c) Evolution de la composition ionique.

Les variations moyennes des proportions relatives des différents ions au cours du temps sont en général faibles. Parmi les cations le sodium tendrait à augmenter par rapport au magnésium, le calcium restant stable. Nous avons constaté par ailleurs dans l'étude de la variation de la composition chimique des nappes dans l'espace entre les différents piézomètres, une évolution dans le même sens à savoir que le pourcentage de magnésium croissait dans les nappes les plus salées de levée, tandis que le pourcentage de sodium décroissait. Pour les anions on note une augmentation des sulfates relativement aux chlorures au cours des cycles rizicoles (tableau 18).

	Août 80	Janvier 81	Janvier 82	Janvier 83	Janvier 85
C.E. mS/cm	33,4	31,3	22,5	6,05	8,1
% de dessalement par rapport à la salinité initiale	-	6,2 %	32,6 %	81,8 %	75,7 %

Tableau 17 - Evolution de la salinité moyenne des nappes

	Août 80		Janvier 81	Janvier 82	Janvier 83	Janvier 85	
	mé/l	% relatif	%	%	%	mé/l	%
Na <sup>+</sup>	256	66,8	65,2	68,1	65,3	71,3	70,2
K <sup>+</sup>	4,6	1,2	1,1	1,5	1,8	1,7	1,7
Ca <sup>++</sup>	36,2	9,5	10,5	7,5	14,3	10,5	10,3
Mg <sup>++</sup>	86,7	22,6	23,2	22,9	18,6	18	17,7
Cl <sup>-</sup>	313,2	78,8	83	87	70	68,3	68,5
SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	83,5	21	17	13	30	28,7	28,8
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,82	0,2	-	-	-	2,7	2,7
SAR	32,6		25,4	25,7	13,7	18,9	

Tableau 18 - Evolution de la composition chimique des nappes

Janvier 82	Mai 82	Juillet 82	Janvier 83	Mars 83	Janvier 84
6,37	6,58	6,53	6,78	6,77	7,01

Tableau 19 - Evolution du pH moyen des nappes

Le SAR moyen a baissé de 50 % environ par rapport à sa valeur initiale, mais reste encore trop élevé ; le pouvoir alcalisant de ces eaux est toujours important après cinq années de riziculture submergée sans drainage.

Le pH mesuré "in situ" depuis janvier 1982 montre une élévation lente mais constante pour l'ensemble des points de prélèvements. Les valeurs maximales mesurées (8,2) correspondent aux nappes des sols de levée alcalinisés après dessalement (tableau 19).

#### d) Conclusions.

Les eaux de nappe du Delta tendent donc dans le système d'exploitation actuel des sols, vers un dessalement mais à une vitesse moindre que les sols et restent alcalisantes. Elles évolueront sous l'influence de l'irrigation du type chloruré vers un type sulfato-chloruré et sulfaté tel qu'il est déjà observé actuellement dans la basse vallée en amont du Delta, par élimination des chlorures et enrichissement relatif en sulfates. Ceci est confirmé par la qualité des extraits des sols endigués depuis 50 années (Dakar-Bango), qui soumis à la seule influence des eaux du fleuve, s'orientent vers le pôle sulfaté, par rapport à ceux voisins du domaine fluvio-marin, nettement plus chlorurés (fig. 19). Leur évolution vers le type bicarbonaté calco-magnésien observé en moyenne vallée, ne se fera qu'ultérieurement et sans doute très lentement.

#### 3.4 Évolution de la salinité des eaux évacuées.

La qualité des eaux évacuées et suivies aux stations d'exhaure des périmètres résulte d'un mélange entre des eaux de nappe, des eaux de percolation à travers le sol sous l'effet de la submersion et des eaux de colature superficielle évacuées des parcelles à certains stades de la riziculture ; elles proviennent de zones diverses tant par les types de sols, le niveau de salinité et la superficie irriguée. Les trois stations suivies de 1980 à 1983 collectent les eaux situées de part et d'autre du Lampsar (fig. 20).

La station d'exhaure de Noar draine les eaux de six cuvettes en rive gauche du Lampsar (Tilène, Pont-Gendarme, Ngomène, Ndiaye, Ndelle, Lampsar) soit 596 à 869 ha irrigués selon les années ; elle est équipée de quatre pompes d'un débit théorique de 600 litres/sec/pompe, et pratique, selon les tarages effectués, de 450 l/sec/pompe.

La station d'exhaure de Krankayé collecte les eaux de trois cuvettes en rive droite du Lampsar (Ngao, Polo, Mbodiène), soit 644 à 650 ha irrigués et de mêmes caractéristiques de pompage que Noar.

La station d'exhaure de Borbof draine la cuvette de Bifèche dont 153 ha sont cultivés. Elle est équipée de deux pompes électriques d'un débit théorique et pratique de 225 l/sec/pompe.

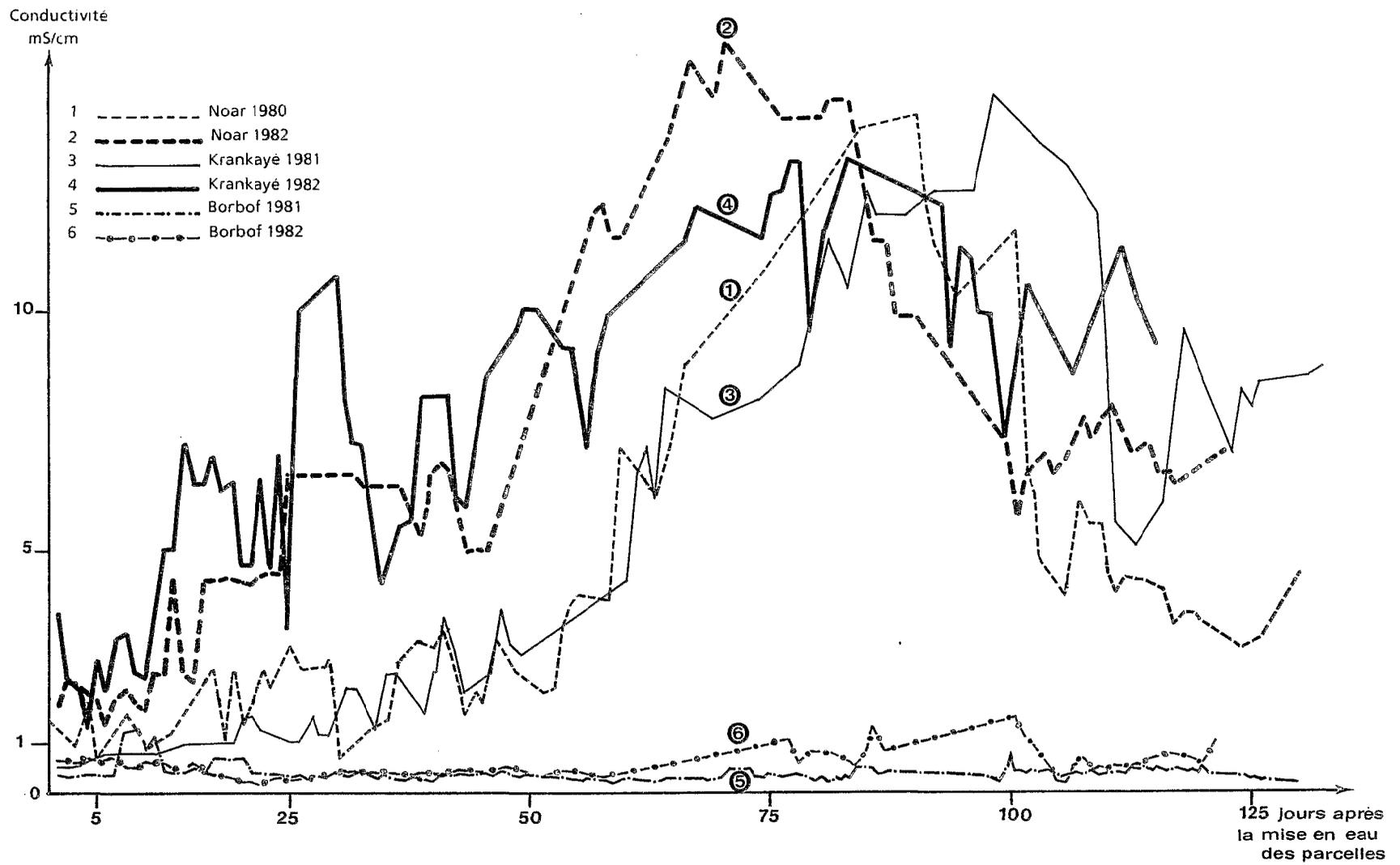
#### a) Evolution de la conductivité.

L'évolution de la conductivité des eaux évacuées pendant un cycle rizicole n'est pas identique à toutes les stations d'exhaure (fig. 27).

Dans la plupart des cas (Noar et Krankayé), trois périodes peuvent être distinguées au cours du cycle :

- Une première phase de 0 à 40/60 jours environ, où la conductivité des eaux croît lentement de 1 à 4 mS/cm la première année de riziculture (Noar 80 et Krankayé 81) et de 2 à 5 mS/cm la seconde année (Noar 81 et Krankayé 82) où le niveau de conductivité atteint est plus élevé.
- Une seconde phase où la conductivité des eaux croît brutalement atteignant son paroxysme (15 mS/cm environ) après 85 à 100 jours de submersion la première année et 70 à 85 jours la seconde année de culture.
- Une phase finale où la conductivité des eaux baisse brutalement en fin de cycle aux environs de 5 mS/cm, celle-ci restant malgré tout supérieure aux valeurs de la première période du cycle.

Fig. 27 Evolution de la conductivité des eaux évacuées aux stations d'exhaure au cours du cycle rizicole



La première phase correspond probablement à un mélange des eaux de vidange des parcelles et des eaux de nappe qui parviennent aux drains, tandis que dans la seconde phase, la vidange est moins importante et l'eau drainée est donc en majeure partie en provenance des nappes enrichies par lessivage des sels du sol ; la chute brutale de la troisième période correspond à la vidange des eaux de submersion des parcelles en fin de cycle au stade de la maturation du riz. Les variations quotidiennes paraissent aléatoires. D'une année sur l'autre la forme d'évolution de cette courbe de conductivité est sensiblement la même avec des décalages dans le temps : la première phase plus brève la seconde année (40 jours) que la première année (60 jours), et le niveau de conductivité atteint plus élevé, la seconde année, tendent à prouver que la mobilisation des sels se fait mieux et plus rapidement après une saison culturale.

Dans un cas particulier (Borbof), la conductivité des eaux drainées au cours de la campagne est très nettement inférieure à celle des autres stations, n'atteignant pas 1 mS/cm la première année. La seconde année elle montre une légère augmentation et présente la même forme de courbe d'évolution en trois phases que les autres stations, mais très aplanie probablement en raison du niveau de salure bas des sols de la cuvette de Bifèche. (J.Y. LE BRUSQ, 1980).

#### b) Qualité des eaux évacuées pour l'irrigation.

Il a été proposé de réutiliser dans certains cas les eaux d'exhaure pour l'irrigation (RHOADES, 1977 - J.Y. LOYER, 1986). Dans le cas présent le SAR moyen pour la campagne rizicole est dans deux cas sur trois, supérieur aux normes admissibles et cela tout au long du cycle ce qui même dans le cas d'une relativement faible salinité en début de cycle les rend inutilisables actuellement, classement  $C_4 S_3$  à  $C_5 S_4$  selon les normes de l'US Salinity Laboratory (1954) (tableau 20). Localement (station de Borbof), et temporairement, elles peuvent être de qualité acceptable ( $C_2 S_1$ ) et il pourrait être envisagé de réinjecter celles de certaines stations dans le réseau d'irrigation du périmètre lui-même ou de les utiliser à la périphérie.

	N O A R			K R A N K A Y E			B O R B O F		
	Cl/SO4	Ca/Mg	Na/Ca	Cl/SO4	Ca/Mg	Na/Ca	Cl/SO4	Ca/Mg	Na/Ca
Septembre 1982	33,3	0,38	7,70	3,4	0,44	6,04	12,31	0,75	4,80
Octobre 1982	4,05	0,38	7,35	6,45	0,54	5,63	1,42	1	3,08
Novembre 1982	3,96	0,44	6,47	5,5	0,51	5,40	1,70	1,5	2,0
Décembre 1982	4,65	0,39	7,74	6,07	0,54	5,31	2,91	1,04	3,2
	S.A.R.	C.E. mS/cm	Classe	S.A.R.	C.E. mS/cm	Classe	S.A.R.	C.E. mS/cm	Classe
Septembre 1982	10,3	3,5	C <sub>4</sub> S <sub>3</sub>	11,2	4,7	C <sub>4</sub> S <sub>4</sub>	3,2	0,5	C <sub>2</sub> S <sub>1</sub>
Octobre 1982	15,3	8,5	C <sub>5</sub> S <sub>4</sub>	15,1	9,2	C <sub>5</sub> S <sub>4</sub>	2,8	0,5	C <sub>2</sub> S <sub>1</sub>
Novembre 1982	21,4	16	C <sub>5</sub> S <sub>4</sub>	18,4	13,3	C <sub>5</sub> S <sub>4</sub>	3,8	1	C <sub>3</sub> S <sub>1</sub>
Décembre 1982	16,3	8,3	C <sub>5</sub> S <sub>4</sub>	17,0	11	C <sub>5</sub> S <sub>4</sub>	4,0	0,8	C <sub>3</sub> S <sub>1</sub>

Tableau 20 - Evolution des caractéristiques des eaux drainées au cours de la campagne rizicole 82 et classes d'utilisation en irrigation.

### c) Evolution de la composition ionique des eaux évacuées.

Leur composition chimique présente certaines différences liées à l'origine des eaux :

- de nature chlorurée le plus généralement avec des rapports  $Cl/SO_4 > 5$ , elles sont très peu bicarbonatées (< 2 % des anions). Toutes sont sodico-magnésiennes avec 66 % de sodium en me/l, 22 % de magnésium et 12 % de calcium.

- lorsque ces eaux ont une origine plus superficielle liée à la vidange des parcelles, elles sont chloruro-sulfatées et nettement plus riches en bicarbonates (25 à 40 % des anions).

Au cours de la campagne rizicole, la composition relative des eaux d'une même station exprimée par les différents rapports  $Cl/SO_4$ ,  $Ca/Mg$  et  $Na/Ca$  calculés pour les quatre mois de la période d'exhaure 1982, ne montre pas de variations importantes sinon (tableau 20) :

- une forte chute des chlorures par rapport aux sulfates en début de cycle.

- une légère baisse des taux de sodium et magnésium par rapport au calcium.

### 3.5. Bilan des eaux et des sels au niveau des périmètres irrigués.

Les dix cuvettes rizicultivées de la vallée du Lampsar sont approvisionnées en eau chacune par une station de pompage propre, mais sont regroupées au niveau des drains d'évacuation en trois réseaux aboutissant à trois stations d'exhaure indépendantes (Noar, Krankayé, Borbof). Connaissant la qualité de ces eaux et en calculant les apports et les évacuations pour chaque station, il a été possible, en dehors de quelques incidents de marche (refoulements dans certains drains à Krankayé en 1981), d'établir un bilan de l'eau et des sels pour les périmètres au cours des premières années de culture.

Stations	Superficie en ha	Volume apporté m <sup>3</sup> /ha	Evaporation moins pluies m <sup>3</sup> /ha	Exhaure m <sup>3</sup> /h	Bilan dans les périmètres m <sup>3</sup> /ha
Noar 80	596	+ 10254	- 7200	- 1860	+ 1194
Noar 81	863	+ 10820	-	- 2682	-
Krankayé 81	644	+ 10929	-	- 2691	-
Borbof 81	153	+ 10793	-	- 2318	-
Noar 82	869	+ 11945	- 7790	- 1668	+ 2487
Krankayé 82	650	+ 11815	- 7790	-	-
Borbof 82	152	+ 15736	- 7790	- 2546	+ 5400

Tableau 21 - Bilan des eaux dans les périmètres de culture

mg/l	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Somme
1980	15,4	3,12	8,2	3,28	34,4	41,3	36	141,7
1981	19,4	6,2	11,8	6,93	26,1	34	45	149,4
1982	13,8	1,96	6,0	11,82	19,5	9,61	21,4	74,1

Tableau 22 - Composition moyenne des eaux d'irrigation selon les années

mg/l	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	Somme
Noar 80	545	19,9	86	97	1187	124,3	19,5	2078,7
Noar 81	642	25	108	90,5	1206	342,9	51,4	2465,8
Krankayé 81	593,6	27,8	101,4	96,2	1213,8	270,5	24,5	2334,8
Borbof 81	54,8	8,2	7,3	13,5	72,4	22	80	178,2
Noar 82	897	28,3	108,2	162	1691	387	101	3374,5
Borbof 82	72,3	7,5	2	11,7	121	56,8	77,5	348,8

Tableau 23 - Composition ionique des eaux évacuées aux différentes stations au cours des années

### a) Bilan des eaux.

L'examen du tableau 21 fait apparaître les faits suivants :

- Les apports à l'hectare sont voisins pour les différentes cuvettes, de l'ordre de 10 à 15 000 m<sup>3</sup>/ha et variables selon la pluviosité saisonnière.

- Les pertes par évaporation des eaux de submersion estimées à partir de l'évaporation bac (données SOCAS, Savoigne) sont importantes et très faiblement compensées par les pluies (45 mm au cours du cycle cultural en 1980, 80 mm en 1981 et 10 mm en 1982).

- Les quantités évacuées par exhaure de l'ordre de 1 600 à 2 700 m<sup>3</sup>/ha laissent donc un excès d'eau dans les périmètres en fin de cycle. Par ailleurs les relevés piézométriques effectués font apparaître des remontées de nappe de l'ordre du mètre au cours du cycle rizicole. En supposant que le volume poral occupé par l'eau soit de 30 % en moyenne dans les sols, on constate que 3 000 m<sup>3</sup> d'eau par hectare peuvent y être stockés en fin de campagne ; ils sont ensuite pour partie évaporés, pour partie écoulés dans les drains où ils sont aussi soumis à un épuisement par évaporation puisque les pompes ne fonctionnent plus en contre-saison.

### b) Bilan des sels.

- Les apports de sels dissous dans les eaux d'irrigation ont été calculés à partir de la composition moyenne des eaux du Lampsar, défluent du fleuve rempli lors de la crue, prélevées aux dix stations de pompage pendant la période de culture. Elles sont sensiblement plus chargées que les eaux du fleuve lui-même ; leur composition reste constante au cours du cycle et voisine d'une année sur l'autre sauf en 1982 (tableau 22).

La quantité moyenne de sels totaux apportée à l'hectare au cours du cycle par ces eaux considérées de bonne qualité est de 1 400 kg ; les apports ioniques essentiels en poids sont ceux des bicarbonates, sulfates et sodium.

- Les exportations en sels par les eaux d'exhaure sont pour la plupart des cuvettes plus importantes que les apports, représentant 3 800 à 6 600 kg/ha selon les années et en rapport à la fois avec les volumes d'eau évacués et leur concentration en sels (tableaux 22 et 23).

- Le bilan global des sels exportés pour la plupart des cuvettes du Lampsar est donc négatif représentant 2 400 à 5 000 kg de sels soustraits par hectare cultivé et par campagne. Parmi les différents ions les exportations portent principalement sur les chlorures et le sodium, puis sur les sulfates. Seuls les bicarbonates présentent un bilan entrée-sortie positif (tableau 24).

Sur l'exemple de la station Noar qui seule présente une série continue, la concentration moyenne en sels des eaux évacuées augmente au cours des trois années (2,08, 2,46, et 3,37 g/l respectivement) (tableau 23). Une cuvette (Bifèche) contrôlée par la station d'exhaure de Borbof présente un comportement différent, le bilan de tous les ions étant positif particulièrement pour les bicarbonates, sulfates, sodium et ce pour des volumes pompés et évacués identiques aux autres cuvettes. Ceci est dû à la faible concentration en sels des eaux évacuées (178 et 349 mg/l en 81 et 82) (tableau 23).

### c) Conclusions.

Pour les périmètres de culture présentant un bilan négatif, la quantité moyenne de sels soustraite par saison rizicole est de l'ordre de 4 tonnes/ha. Pour les périmètres présentant un bilan positif on ne saurait déduire que la salinité des sols a augmenté car il y a probablement transfert des sels du sol vers la nappe et faible rabattement de celle-ci par l'exhaure. Ceci montre la nécessité d'un drainage profond pour éviter cette accumulation. Le bilan positif reste ici modeste, mais en cas de culture non submergée, sous irrigation intermittente, avec un volume drainé plus faible, voire nul, cette accumulation pourrait prendre au fil des années un caractère néfaste.

Station	kg/ha	Na	K	Mg	Ca	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	
Noar 1980	apports	+ 158	32	34	84	353	423	369	+ 1453
	exhaure	-1014	37	180	160	2208	231	36	- 3866
	bilan	-856	-5	-146	-76	-1855	+ 192	+ 333	- 2413
Noar 1981	apports	+ 210	67	75	127	282	368	487	+ 1616
	exhaure	-1723	67	291	243	3237	920	138	- 6619
	bilan	-1513	0	-216	-116	-2955	-552	+ 349	- 5003
Krankayé 1981	apports	+ 212	68	76	129	285	371	491	+ 1632
	exhaure	-1597	75	292	259	3267	728	66	- 6284
	bilan	-1385	-7	-216	-130	-2982	-357	+ 425	- 4652
Borbof 1981	apports	+ 209	67	75	127	281	367	485	+ 1611
	exhaure	-13	19	17	28	168	51	186	- 482
	bilan	+ 196	+ 48	+ 58	+ 99	+ 113	+ 316	+ 299	+ 1129
Noar 1982	apports	+ 165	23	22	72	233	115	256	+ 886
	exhaure	-1497	47	270	180	2925	647	169	- 5735
	bilan	-1332	-24	-248	-108	-2692	-532	+ 87	- 4849
Borbof 1982	apports	+ 217	31	29	95	306	151	337	+ 1166
	exhaure	-184	19	30	52	309	145	197	- 936
	bilan	+ 33	+ 12	-1	+ 43	-3	+ 6	+ 140	+ 230

Tableau 24 - Bilan ionique en kg/ha aux différentes stations selon les années

Parmi les ions, l'élimination préférentielle des chlorures par rapport aux sulfates (37,6 me/l contre 6) sans enrichissement en ces derniers par les eaux d'irrigation, laisserait présager une accumulation relative des sulfates dans les sols des périmètres au fur et à mesure du dessalement.

L'évolution constatée des extraits de sols cultivés du pôle chloruré, vers le pôle sulfaté (cf. fig. 8), confirme cette évolution probable à moyen terme. Les bicarbonates présentent dans tous les cas un bilan entrée-sortie positif dans les parcelles ; pour ceux-ci leur équilibre avec l'atmosphère et leurs fluctuations journalières dans les eaux de surface (LOYER J.Y. et al. 1982), font que les gains dans les parcelles ne sont sans doute pas toujours aussi importants. Néanmoins, ce bilan positif lié à la qualité des eaux d'irrigation utilisées, incite à penser que la salure résiduelle des sols tendrait à long terme sous l'influence de la riziculture irrigués, vers un type carbonaté au lieu du type chloruro-sulfaté actuel.

Parmi les cations, les bilans entrée-sortie sont négatifs dans la plupart des cas, avec Na exporté > Mg > Ca. Le rapport des exportations Na/Ca en me/l est de l'ordre de 10 à 11 soit supérieur aux valeurs les plus fréquemment rencontrées dans les sols (Na/Ca de l'extrait 1/5 inférieur à 10). Il y aurait donc une légère amélioration de ce rapport dans les sols sous l'influence des eaux de submersion de surface, contrairement à l'action d'alcalisation remontante provoquée par les eaux des nappes alluviales.



PHOTO 13. Remontées salines sur les billons en irrigation intermittente à la raie, sur sols légers (NIANGA)



PHOTO 14. Manifestations salines sous irrigation continue en riziculture, dues au mauvais planage (RICHARD-TOLL)

## CONCLUSION GENERALE

Les événements naturels qui se sont succédés au cours des derniers millénaires ont donné à la basse vallée du fleuve Sénégal sa physionomie actuelle où la pédogenèse essentiellement hydrique est commandée par la morphologie des sédiments mis en place ; dans le système non aménagé, c'est la cote topographique qui règle la hauteur et la durée de l'inondation par les eaux douces de crue, ou saumâtres d'invasion marine en période d'étiage. Cet héritage sédimentaire est fortement empreint d'une salinité résiduelle liée aux anciennes invasions marines dans ce golfe aujourd'hui comblé, et dont les manifestations affectent encore les sols et les eaux de nappe superficielles jusqu'à plus de 300 km vers l'amont.

Cette salinité marine résiduelle, dite primaire, est neutre, essentiellement chlorurée sodique et magnésienne, faiblement sulfatée. Les bicarbonates et carbonates sont pratiquement absents et le calcium peu abondant. Le pH voisin de la neutralité à l'origine, a été fortement influencé par la transformation biochimique des sulfures de la mangrove initiale en sulfates mixtes, et l'acidité actuelle est souvent forte ce qui n'exclut pas des phénomènes d'alcalisation dans les sols en raison du fort pouvoir alcalisant des eaux des nappes alluviales. Cette salinité est plus ou moins modifiée dans le système naturel par rapport à la composition de l'eau de mer, soit par la dilution sous l'effet de la crue, plus que par la pluviosité, soit par concentration sous l'effet de l'évaporation intense sous ce climat sahélo-saharien. Ces phénomènes induisent des variations relatives de composition ionique dans les nappes et les solutions qui peuvent être expliquées soit par la précipitation brutale de certains minéraux, gypse et jarosite en particulier, soit par des réactions plus continues d'échange avec les argiles et passage du sodium de la solution sur le complexe adsorbant des sols, tandis que le magnésium et le calcium qui suivent le chemin inverse s'y concentrent et peuvent alors précipiter à la surface des sols sous forme de salants chlorurés hygroscopiques.

Les variations constatées dans la distribution longitudinale de la salinité permettent de séparer la basse vallée en trois provinces géochimiques qui de l'amont vers l'aval vont d'une salinité faible de type bicarbonaté calcique à calco-magnésien, à une salinité faible à moyenne de type bicarbonaté à sulfaté calco-magnésien et sodique, et enfin dans le Delta, à une salinité forte à très forte de type

chloruro-sulfaté à chloruré sodique à sodico-magnésien. Latéralement on constate, en dehors de variations locales liées à la présence de calcaire coquillier, une salinité qui se différencie selon la morphologie et les possibilités d'inondation : forte et chlorurée sodico-magnésienne dans les parties hautes de la vallée, devenant calcique et magnésienne et moins intense dans les cuvettes situées en dehors des zones basses littorales ou endoréiques sursalées.

Verticalement, les types de profils salins observés sont : descendants dans les cuvettes plus ou moins dessalées soumises à l'inondation par la crue, et ascendants à salants hygroscopiques et manifestations de surface variables saisonnièrement, sur les levées. Les zones basses endoréiques et sursalées présentent elles un profil salin plus complexe avec un minimum immédiatement sous les concentrations superficielles enrichies en magnésium relativement au sodium, et traduisant l'effet d'un dessalement antérieur avec reprise du phénomène de concentration par évaporation des eaux superficielles.

La dynamique des sels sous le régime naturel de la vallée est donc limitée en particulier sous les conditions actuelles de climat chaud et sec qui sévissent, elle est plutôt à tendance ascendante sous l'effet d'une demande évaporatoire encore accentuée par le déficit pluviométrique de ces dernières années et peu lixiviant. Par contre, l'intervention humaine qui s'exprime dans la vallée avec une forte intensité depuis la dernière décennie grâce à la mise en oeuvre de puissants moyens technologiques à but hydro-agricole, joue déjà un rôle important dans le maintien dans son état initial ou dans l'évolution de la salinité. L'endiguement des périmètres, le pompage, et la mise en eau des terres hautes ont modifié radicalement le système d'exploitation traditionnel de la vallée par introduction de la riziculture irriguée sans drainage de profondeur. Les conséquences sur l'évolution de l'héritage salé de la basse vallée sont déjà importantes et l'expérimentation mise en oeuvre et suivie dans le Delta montre au niveau du sol :

Un dessalement limité la première année à une tranche superficielle, et qui se poursuit les années suivantes sur au moins 120 cm de façon très satisfaisante dans presque tous les cas hormis pour les sols parasulfatés acides très argileux issus des vasières à mangroves. Le resalement de contre-saison sèche est généralement limité la première année et s'atténue encore au cours des années. Sur sols légers de levée à salinité initiale très élevée, des indices d'alcalisation apparaissent sur tout le profil (forte élévation du pH) ; elle se manifeste déjà par une certaine dégradation des propriétés

hydriques de ces sols (baisse de perméabilité) que des amendements calciques permettent par ailleurs de corriger sensiblement. Cette alcalisation est liée à la forte remontée des nappes phréatiques à SAR élevé, sous l'effet de la submersion continue (alcalisation remontante). Du point de vue salinité globale après dessalement des sols, on assiste à un dessalement progressif des nappes mais beaucoup plus lentement.

Concernant les bilans entrée - sortie des sels dans les périmètres, ils sont généralement négatifs représentant 2 à 5 tonnes de sels soustraits à l'hectare par cycle rizicole. Pour les cations on observe au bout de plusieurs années une exportation de sodium supérieure à celle du magnésium et du calcium ce qui tend à améliorer le rapport Na/Ca des sols dans les périmètres ; mais compte tenu de la quantité totale de cet élément dans les sols et les nappes, cette élimination ne se fera que très lentement et il est à craindre que certains sols parmi ceux initialement très salés n'offrent qu'une ambiance physico-chimique médiocre après quelques années d'irrigation.

Parmi les anions l'élimination préférentielle des chlorures par rapport aux sulfates sans enrichissement en ces derniers par les eaux d'irrigation, devrait favoriser à moyen terme une accumulation relative des sulfates dans les sols et dans les eaux au cours du dessalement.

L'évolution de la composition chimique des sols et des eaux salées et chlorurées de la basse vallée du fleuve Sénégal se ferait donc dans un premier temps et sous l'influence de la riziculture, vers un type chloruro-sulfaté, puis sulfaté par accumulation relative des sulfates. Une évolution vers un type carbonaté par accumulation absolue de cet élément ne pourra se faire que très lentement sous l'influence des eaux d'irrigation du fleuve. Cette tendance évolutive se fait déjà pressentir dans la distinction spatiale en trois provinces géographiques qui est observée dans la vallée depuis la partie amont au delà de Boghé, puis jusqu'à Dagana et enfin dans le Delta.

Dans l'état actuel du niveau de salinité des nombreux sols de la basse vallée, la riziculture reste donc la spéculation la plus recommandable du fait de son mode d'irrigation en submersion continue qui assure un dessalement des sols même sans drainage de profondeur, par rapport aux spéculations maraîchères cultivées sous irrigation intermittente qui favorisent les remontées salines. Au niveau de l'exhaure des périmètres, se pose le problème de l'évacuation définitive des eaux dont il a été montré que le bilan en sels était négatif

dans les parcelles. Pour les eaux rejetées dans le fleuve, bon an mal an celui-ci en assurait jusqu'ici lors de sa crue annuelle et par effet de chasse, l'évacuation jusqu'à la mer. Celles qui sont rejetées dans les défluent, ou parfois aux limites mêmes des périmètres de culture faute d'un aménagement au delà, posent par contre un problème car il ne s'agit là que d'une exportation provisoire, ces eaux étant recyclées par des voies diverses et parfois imprévues (eaux d'irrigation, nappes, vent). Sur l'ensemble de la basse vallée, cette nouvelle évolution saline ou alcaline secondaire qui affecte, à des degrés divers, la trentaine de milliers d'hectares aujourd'hui irriguée, n'a pas encore de conséquences trop visibles en raison de l'extension limitée de ses manifestations et de solutions de recharge. Lorsque par exemple la polyculture maraîchère n'est plus possible en raison de la trop forte concentration en sels, elle est abandonnée au profit de la riziculture apparemment moins dégradante.

Mais aujourd'hui le projet du fleuve avec son double barrage est d'une autre dimension puisqu'il est prévu de mettre en eau quelques 240 000 ha de terres en rive sénégalaise. Quels peuvent être les effets d'un tel système sur l'évolution de la salinité dans les sols et les eaux de la basse vallée ?

+ L'invasion marine par le lit mineur peut d'ores et déjà être considérée comme supprimée bien que la très faible cote amont du fleuve ait obligé à laisser pénétrer les eaux océaniques pour équilibrer les niveaux lors des saisons de culture 1986 et 1987, et que quelques contaminations puissent encore se produire en rive mauritanienne faute d'endiguement. Normalement, la qualité de ces eaux devrait permettre une irrigation toute l'année ; elle pourrait néanmoins se dégrader par évaporation d'un plan d'eau estimé entre 250 et 500 km<sup>2</sup> et aussi quelque peu de l'amont vers l'aval en raison des rejets qui seront opérés dans la "retenue" à partir des nombreux aménagements installés entre Manantali et Diama. Les exemples du Rio Grande, du Colorado ou de l'Euphrate sont instructifs à cet égard. L'eau du fleuve actuellement de bonne qualité avec une charge de 60 à 80 mg/l, apporte déjà plus d'une tonne de sel à l'hectare en une seule campagne rizicole.

+ L'augmentation importante de la superficie des terres nouvellement mises en irrigation principalement dans le Delta où est concentré le maximum des sels, et aussi plus en amont avec les terres hautes de levées les plus salées, provoquera la remise en mouvement et la redistribution de la salure chlorurée.

Les nappes phréatiques seront bien sûr contaminées en même temps que leur niveau piézométrique s'élèvera. Actuellement, bien que peu de mesures aient été réalisées en matière d'hydrogéologie superficielle. Il semble y avoir peu de transferts latéraux de la nappe vers le fleuve.

Il importera d'une part de rabattre le niveau de cette nappe pour éviter les risques d'alcalisation remontante dans les sols, et d'autre part d'assurer en exhaure continu et efficace des eaux par pompage, en les canalisant dès la sortie des périmètres, soit vers des dépressions sursalées et stériles (cuvette du N'Diael), soit directement à l'embouchure en aval du barrage ce qui serait la meilleure solution et pourrait être réalisé en utilisant le tracé d'un ancien défluent. A noter que certaines eaux rejetées en début de cycle rizicole sont très peu chargées (concentration inférieure à 10 me/l de sodium). Il pourrait être envisagé de les recycler.

L'héritage salé de la basse vallée du fleuve Sénégal qui avait pu rester figé en cultures traditionnelles et sous des conditions climatiques peu agressives, est déjà en voie de remobilisation dans les sols et dans les eaux sous l'effet des aménagements hydro-agricoles actuels. Après la mise en service des deux barrages et l'intensification de l'irrigation sur la vallée, on peut estimer que l'ensemble évoluera assez peu au niveau de la qualité des eaux de surface qui seront régulièrement renouvelées grâce à la conception même du barrage aval construit au fil de l'eau. En ce qui concerne les sols et les eaux de nappes, les sels qui seront mobilisés devront impérativement être éliminés pour préserver toute la partie basse de la vallée et éviter la formation d'un système évaporatoire de type chloruré sodique à dynamique verticale et essentiellement ascendante. Une évolution dans le bon sens, avec exportation définitive des chlorures pourrait par contre orienter à moyen terme la salure vers un type sulfaté beaucoup moins concentré et moins toxique.

## BIBLIOGRAPHIE

- AL DROUBI A., (1976). Géochimie des sols et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermodynamique de simulations. Application aux sols du Tchad. Université Louis Pasteur, Strasbourg : Mémoire n° 46.
- AL DROUBI A., FRITZ B., TARDY Y, (1976). Equilibres entre minéraux et solutions. programmes de calcul appliqués à la prédiction de la salure des sols et des doses optimales d'irrigation. Cah. ORSTOM, série Pédol, Vol XIV, n°1, 13-38.
- BADO L., (1975). Etude pédologique au 1/20 000 d'une partie de la cuvette de Nianga-Région de Ndiayène (moyenne vallée du fleuve Sénégal). ORSTOM Dakar.
- BEYE G., (1966). Etude pédologique de la station IRAT de Richard Toll. CNRA IRAT Bambey.
- BEYE G., (1972). Bilan de deux années d'études de l'évolution de la salinité dans la cuvette du Boundoum Ouest, dans le Delta du fleuve Sénégal. L'Agr. Trop. XXVII 3, pp. 358-387.
- BOIVIN P., (1984). Etude pédologique de la vallée de Koubalan (Kalounayes, Casamance). Etude de la variabilité spatiale du pH et de la conductivité d'un sol de tanne. ORSTOM Dakar.
- BRAUDEAU E., (1978). Etude pédologique de la cuvette de Nianga (secteur A). Région du fleuve Sénégal. ORSTOM Dakar.
- BRAUDEAU E., (1978). Etude pédologique du périmètre de Balky (ex. Colonat de Richard Toll). Région du fleuve Sénégal. ORSTOM Dakar.
- BRITO J., (1982). Etude pédologique du casier de Kobilou (Département de Matam - Région du fleuve Sénégal). ORSTOM Dakar.

- CAMPBELL R.B., BOWER C.A., RICHARD L.A., (1948). Change of the Electrical Conductivity with temperature and the relation of osmotic pressure to electrical conductivity and ion concentration of soil extract. Soil Sc. Soc. Am. Proc. vol 13, pp. 66-69.
- C.E.A., (1978). Statistiques appliquées à l'exploitation des mesures. Masson, Paris.
- CHARREAU C., (1972). Compte Rendu de mission au Sénégal. IRAT Paris.
- CHAUVEL A., (1966). Carte pédologique du Sénégal oriental à 1/200.000. Feuilles de Kedougou et Kossanto-Kenieba. ORSTOM Dakar.
- CHEVERRY C., (1974). Contribution à l'étude pédologique des polders du lac Tchad. Dynamique des sels en milieu continental subaride dans les sédiments argileux et organiques. Th. Université Louis Pasteur - Strasbourg.
- CRUESI Tunisie, (1970). Recherches et formation en matière d'irrigation avec des eaux salées. Rapport technique UNESCO Paris.
- DIALLO A.M., DIEME I., BOCOUM M., (1985). Bilan global de l'effet des aménagements tertiaires sur l'évolution des sols salés du Delta et le mouvement de la nappe alluviale, S.A.E.D. St. Louis - Sénégal.
- DOSSO M., (1980). Géochimie des sols salés et des eaux d'irrigation. Aménagement de la basse vallée de l'Euphrate en Syrie. Univ. Paul Sabatier, Toulouse.
- FELLER C., (1976). Etude des pâturages naturels du Ferlo-Boundou (Matam-Kidira-Tambacounda). ORSTOM - IEMVT. ISRA Dakar.

- FRITZ B., (1975). Etude thermodynamique et simulation des réactions entre minéraux et solutions. Application à la géochimie des altérations et des eaux continentales. Université Louis Pasteur - Strasbourg : Mémoire n° 41.
- GAC J.Y., KANE A., (1985). Les flux continentaux particuliers et dissous à l'embouchure du fleuve Sénégal (Station de St Louis); ORSTOM Dakar.
- JOIN Ph., (1982). Etude pédologique d'une zone fluviomarine à Dakar-Bango (Delta du fleuve Sénégal). ORSTOM Dakar.
- JOB J.O., (1985). Essais de corrélation entre la conductivité électrique et la composition ionique des solutions du sol. ENSAM-USTL Montpellier.
- KALOGA B., (1966). Carte pédologique du Sénégal Oriental à 1/200 000. Feuille de Dalafi. ORSTOM Dakar.
- LE BRUSQ J.Y., (1980). Etude pédologique des cuvettes de la vallée du Lampsar. ORSTOM Dakar.
- LE BRUSQ J.Y., LOYER J.Y., (1982, 1983, 1984). Evolution de la salinité des sols et des eaux en relation avec la riziculture submergée dans le Delta du fleuve Sénégal. (Campagnes 80,81,82). ORSTOM Dakar.
- LE BRUSQ J.Y., (1984). Evolution de la salinité des sols et des eaux en relation avec la riziculture submergée dans le Delta du fleuve Sénégal, (Campagne 1984). ORSTOM Dakar.
- LE BRUSQ J.Y., LOYER J.Y., MOUGENOT B., CARN M., (1987). Nouvelles paragenèses à sulfates d'aluminium, de fer et de magnésium, et leur distribution dans les sols sulfatés acides du Sénégal. Sc. du sol n° 1987-3, Vol 25, pp. 173-184.
- LERICOLLAIS A., (1981). La vallée du Sénégal. Etudes scientifiques. Paris.

- LINDSAY W., (1979). Chemical equilibria in soils. Wiley Interscience.
- LOYER J.Y., DIALLO M.A. (1979). La cuvette de Pont-Gendarme vallée du Lampsar. Données sur les sols et les nappes. Recommandations pour la mise en valeur. ORSTOM - Dakar.
- LOYER J.Y., LE BRUSQ J.Y., (1982). Relations entre les mesures de conductivité sur des extraits de sols de rapports sol/solution variables dans la vallée du fleuve Sénégal. Cah. ORSTOM, série Pédol., vol XIX n° 3, 1982.
- LOYER J.Y., JACQ V.A., REYNAUD P.A. (1982). Variations physico-chimiques dans un sol de rizière inondée et évolutions de la biomasse algale et des populations microbiennes du cycle du soufre. Cah. ORSTOM, série Biologie n° 45, pp. 54-71.
- LOYER J.Y., ZOGBI R. (1983). Mesure en continu de la teneur en sodium des eaux de drainage au moyen d'un dispositif d'enregistrement automatique et d'une électrode spécifique. Cah. ORSTOM, série Pédol., vol XX n° 2, 109-117.
- LOYER J.Y., MOUGENOT B, ZANTE P. (1986). Changements récents induits par l'intervention humaine sur les sols de la basse vallée du fleuve Sénégal. Symposium INQUA Dakar - Av. 1986.
- LOYER J.Y. (1986). La mise en valeur hydro-agricole des sols de la basse vallée du fleuve Sénégal en relation avec les problèmes de salure et d'alcalisation. Journées "Drainage et Salinité". AFEID Montpellier.
- MAC NEAL B.L., OSTER J.D., HATCHER J.T. (1970). Calculation of electrical conductivity from solution composition Data as an aid to in situ estimation of soil salinity. Soil Sc. vol 110, 405-415.
- MARIUS C. (1985). Mangroves du Sénégal et de la Gambie. Ecologie, Pédologie, Géochimie. Mise en valeur et aménagement. ORSTOM Paris.

- MICHEL P. (1967). les grandes étapes de la morphogenèse dans les bassins des fleuves Sénégal et Gambie pendant le Quaternaire. IIème congrès Panafricain de préhistoire et du quaternaire, Dakar.
- MICHEL P. (1973). Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique. Mém. ORSTOM n° 63, Paris 3 tomes.
- MICHEL P. (1985). Sécheresse et transformation de la morphodynamique dans la vallée et le Delta du Sénégal. Revue de géomorphologie dynamique, Strasbourg, XXXIV n° 4, 1985, pp. 113-130.
- MONTEILLET J. (1986). Variations des écoulements fluviaux, des courants et du niveau océanique dans la basse vallée du Sénégal depuis 100.000 ans. Dakar Symposium INQUA - ASEQUA.
- MOUGENOT B. (1982). Etude pédologique de la cuvette de Ntiagar (Partie nord). Delta du fleuve Sénégal. ORSTOM Dakar.
- MOUGENOT B. (1983). Caractérisation et évolution des états de surface des sols, en relation avec la dynamique saisonnière des sels dans le Delta du Sénégal. ORSTOM Dakar.
- MOUGENOT B. (1984). Etude de reconnaissance des sols aux aptitudes forestières "Projet Bakel". ORSTOM Dakar.
- MUTSAARS M., VAN DER VELDEN (1973). Le dessalement des terres salées du Delta du fleuve Sénégal. Bilan de trois années d'expérimentation (1970-1973). OMVS St Louis.
- MTIMET A., LOYER J.Y. (1978). Etude pédologique de la cuvette de Ndyerba. Région du fleuve Sénégal. ORSTOM Dakar.
- OSTER J.D., SPOSITO G. (1980). The Gabon coefficient and the exchangeable sodium percentage - sodium adsorption ratio relation. Soil Sc. Soc. of Am J. 44.

- PEREIRA-BARRETO S. (1966). Carte pédologique du Sénégal à 1/200 000. Feuilles de Tambacounda - Bakel. ORSTOM Dakar.
- PONNAMPERUMA F.N. (1972). The chemistry of submerged soils. Advance in Agronomy vol 24, pp. 29-96.
- PONS L.J., ZONNEVELD I.S. (1965). Soil ripening and soil classification. Initial soil formation in alluvial deposits and a classification of the resulting soils, ILRI Publ. 13, Wageningen, 128 p.
- RAO T.S., PAGE A.L., COLEMAN N.T. (1968). The influence of ionic strength and ion pair formation between alkaline-earth metals and sulfate on Na-divalent cation exchange equilibria. Soil Sc. Soc. of Am. J. 32, pp. 639-643.
- RIEU M. (1981). SAR et estimation du pouvoir alcalinisant des eaux. Cah. ORSTOM, série Pédologie, vol XVIII n° 2.
- ROCHETTE. C. (1964). Remontée des eaux marines dans le fleuve Sénégal. St Louis Sénégal. MAS ORSTOM, 81 p.
- ROCHETTE C. (1974). le bassin du fleuve Sénégal. ORSTOM Paris Monog. Hydrol. 1, 391 p.
- SAOS J.L., ZANTE P. (1985). le "bouchon-barrage" de Kheune, son influence sur les eaux de la nappe alluviale et du fleuve Sénégal. ORSTOM Dakar.
- SEDAGRI-OMVS-FAO (1973). Etude hydro-agricole du fleuve Sénégal. Etude pédologique FAO Rome DP. RAF 65-061.
- SEINY BOUKAR L. (1983). Etude pédologique de la cuvette de Nder, lac de Guiers (Région du fleuve Sénégal). ORSTOM Dakar.
- SERVANT J. (1975). Contribution à l'étude pédologique des terrains halomorphes. L'exemple des sols salés du Sud et du Sud-Ouest de la France. INRA-ENSA Montpellier.

SPOSITO G. (1977). The Gapon and the Vanselow selectivity coefficients. Soil Science Soc. of Am. J. 41, pp. 1205-1206.

SPOSITO G., MATTIGOD S.V. (1977). On the chemical foundation of the sodium adsorption ratio, soil Sc. Soc. of Am. J. 41, pp. 323-329.

TRICART J. (1961). Notice explicative de la carte géomorphologique du Delta du Sénégal à 1/100 000. Mémoires du BRGM.

United States Salinity Laboratory Staff (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. US Dpt Agric. Handbook 60.

VLEK P.L.G, BLOM T.J.M., LINDSAY W.L. (1974). Determination of the solubility product of various iron hydroxydes and jarosite by the chelation method. Soil Sc. Soc. of Am. Proc. 38, pp. 429-432.

ZANTE P., LOYER J.Y. (1984). Influence des cycles d'irrigation par submersion permanente sur le comportement hydrique d'un sol de la vallée du fleuve Sénégal. Bull. GFHN.

ZANTE P. (1984). Caractéristiques et évolution des propriétés hydriques des sols alluviaux de la vallée du fleuve Sénégal. Périmètres irrigués de Dagana et Tilène. ORSTOM Dakar.

# P L A N

Avant-propos

Introduction

Première partie : Caractères généraux du milieu naturel dans la basse vallée.

1. Le bassin du fleuve Sénégal.
2. Aperçu sédimentologique.
3. Le contexte climatique.
4. La végétation naturelle.
5. Le régime hydrologique.
6. Hydrogéologie.
7. Pédologie.
8. Aperçu sur les sols alcalisés du haut bassin.

Deuxième partie : les sols salés de la basse vallée.

A. Caractérisation de la salinité :

1. Salure et alcalisation des sols.
2. Relations conductivité électrique et concentration ionique.
3. Salinité des eaux des nappes phréatiques.
  - 3.1. Caractères généraux
  - 3.2. Approche géochimique de la salinité des nappes.

B. Distribution de la salinité dans la basse vallée :

1. Organisation longitudinale
  - 1.1. Eaux de nappe.
  - 1.2. Extraits aqueux 1/5.
  - 1.3. Cations échangeables.

## 2. Organisation latérale.

- 2.1. Eaux de nappes.
- 2.2. sols.

## 3. Organisation verticale.

Troisième partie : évolution des sels sous l'influence de la mise en valeur.

### A. Les interventions humaines dans la vallée.

1. Les cultures de décrue.
2. Les aménagements hydro-agricoles.
3. Conséquences sur la dynamique des sels.
4. L'ère de l'après-barrages.

### B. Expérimentation : Evolution de la salinité des sols et des eaux en relation avec la riziculture submergée dans le Delta du fleuve.

1. Etudes antérieures.
2. But de l'étude - choix de site - méthodologie.
3. Résultats.
  - 3.1. Evolution de la salinité et du pH des sols.
    - a) sols de levée
    - b) sols de cuvette
    - c) sols de fond de cuvette
    - d) sols de glacis
    - e) conclusions.

#### 3.2. Evolution des rapports ioniques dans les extraits aqueux des sols

#### 3.3. Evolution des nappes alluviales superficielles.

- a) variations de profondeur.
- b) Evolution de la salinité globale.
- c) Evolution de la composition ionique.
- d) Conclusions.

### 3.4. Evolution de la salinité des eaux évacuées.

- a) Evolution de la conductivité.
- b) Qualité des eaux évacuées pour l'irrigation.
- c) Evolution de la composition ionique.

### 3.5 Bilan des eaux et des sels au niveau des périmètres irrigués.

- a) Bilan des eaux
- b) bilan des sels.
- c) conclusions.

Conclusion Générale.

Bibliographie.

**ORSTOM Éditeur**  
**Dépôt légal : mars 1989**  
**Impression**  
**ORSTOM BONDY**

ISSN : 0767-2888  
ISBN : 2-7099-0941-3  
Editions de l'ORSTOM  
93143 BONDY CEDEX