

J. Y. LE BRUSQ

J. Y. LOYER

**EVOLUTION DE LA SALINITÉ  
DES SOLS ET DES EAUX  
EN RELATION AVEC  
LA RIZICULTURE SUBMERGÉE  
DANS LE DELTA  
DU FLEUVE SÉNÉGAL**



JANVIER 1982

**OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER**

**CENTRE DE DAKAR - HANN**



ÉVOLUTION DE LA SALINITÉ DES SOLS ET DES EAUX  
EN RELATION AVEC LA RIZICULTURE SUBMERGÉE  
DANS LE DELTA DU FLEUVE SÉNÉGAL

---

RESULTATS DE LA CAMPAGNE 1980/1981

-----

J.-Y. LE BRUSQ - J.-Y. LOYER  
Pédologues - CENTRE O.R.S.T.O.M. DE DAKAR

/ J A N V I E R 1 9 8 2 /

## A V A N T - P R O P O S

La présente étude répond à une Convention signée entre l'ORSTOM et la SAED\* le 12 Mars 1980 qui elle même entre dans le cadre plus général du protocole d'études passé entre les deux organismes en 1974. Son objectif est de "mener à bien des études dans le but de déterminer l'influence jouée par les paramètres pédologiques et microbiologiques des sols sur la productivité dans le Delta du Fleuve Sénégal". Le présent rapport traite uniquement des travaux pédologiques entrepris avant, pendant et après la campagne rizicole 1980/1981. Nous tenons à remercier ici Mohamed Aly DIALLO responsable de la cellule pédologique de la SAED pour sa participation sur le terrain à diverses phases de ces travaux (choix des sites, mise en place des dispositifs, diverses campagnes de prélèvements).

### Présentation du milieu

Un des principaux facteurs pédologiques limitant la productivité dans la basse vallée, est sans doute la salinité. Celle-ci se manifeste dans les sols et dans les nappes avec une intensité décroissante de l'aval à l'amont où son influence remonte jusqu'à Podor. On a pu estimer, d'après les études cartographiques antérieures (Etude hydro-agricole du Bassin du Fleuve Sénégal : rapport de synthèse des études et travaux F A O 1973), à 2600 km<sup>2</sup> environ la superficie des sols alluviaux affectés par le sel de Podor jusqu'à la mer et dont les 2/3, soit 1700 km<sup>2</sup> environ, sont sur la rive sénégalaise et plus particulièrement sur le Delta du Fleuve à l'aval de Richard-Toll.

### Répartition des sols affectés par le sel sur les différentes cartes à 1/200000 de la vallée (F A O 1973)

	<u>Sols affectés par le sel</u>	<u>Sols alluviaux</u>	<u>%</u>
KAEDI .....	1 km <sup>2</sup> sur	1387 km <sup>2</sup> soit	0,07
PODOR .....	12 km <sup>2</sup> sur	2445 km <sup>2</sup> soit	0,5
DAGANA .....	649 km <sup>2</sup> sur	2189 km <sup>2</sup> soit	29,6
SAINT-LOUIS .....	1888 km <sup>2</sup> sur	2940 km <sup>2</sup> soit	64,2
LOUGA .....	46 km <sup>2</sup> sur	122 km <sup>2</sup> soit	37,7
T O T A L .....	2596 km <sup>2</sup>	9083 km <sup>2</sup>	28,6 %

\* Société d'Aménagement et d'Exploitation des Terres du Delta du Fleuve Sénégal.

Dans ce milieu sédimentaire récent de la basse vallée le sel est d'origine lagunaire lié à une pénétration marine ancienne qui a laissé, après régression et alluvionnement par le fleuve, des traces dans les matériaux déposés. La salinité est donc à dominance chlorurée sodique et magnésienne. En outre, en raison d'un débit d'étiage faible du fleuve, et d'une pente insignifiante, le lit mineur et les différents défluent sont chaque année envahis par une langue salée d'eau de mer qui peut remonter selon les années et le débit du fleuve jusqu'à 240 km à l'amont (Podor) interdisant toute irrigation pendant plusieurs mois.

+ La culture traditionnelle dans la vallée était autrefois la culture de décrue (sorgho, principalement, puis riz) limitée aux cuvettes envahies naturellement par la crue du fleuve : "aménagement primaire", c'est-à-dire sans contrôle du niveau de l'eau qui arrive par gravité dans les cuvettes.

+ Depuis une dizaine d'années de nombreux aménagements hydro-agricoles ont été entrepris et ont profondément modifié la pénétration de la langue salée et le système de culture traditionnel. La plupart des périmètres destinés à l'irrigation ont été endigués et ainsi protégés à la fois de la pénétration marine et de la crue. L'eau du fleuve est pompée et distribuée dans la cuvette par un unique canal central qui en fin de riziculture sert à la vidange des eaux : "aménagement secondaire", c'est-à-dire irrigation gravitaire avec contrôle du niveau de l'eau. Le cycle cultural débute selon la position de la langue salée, généralement en Août, pour se terminer en Décembre.

+ Plus récemment la réalisation de canaux portés a permis d'étendre considérablement les superficies cultivables. Chaque parcelle a son propre canal d'amener d'eau et son canal de vidange : "aménagement tertiaire" ; les parcelles sont planées et la maîtrise de l'eau est totale. La conduite de l'irrigation en riziculture, qui est la spéculation la plus répandue, se fait par submersion permanente. En fin de cycle, les eaux excédentaires sont évacuées par des drains et généralement pompées en dehors du périmètre (station d'exhaure) ; l'irrigation se pratique sans drainage de profondeur. La constitution de réserves d'eau douce (Lampsar, chenal D. à Dagana. N'Galinka) a en

outre permis d'étendre la culture à la contre saison (pendant la période de remontée saline), principalement pour les cultures maraîchères en irrigation intermittante, toujours sans drainage de profondeur. Il est enfin prévisible que d'autres modifications à ce régime de culture interviendront lorsque seront construits les deux barrages prévus sur le fleuve dont l'un empêchant la remontée de la langue salée, constituera une importante réserve d'eau douce permettant d'envisager une extension des superficies ainsi qu'une augmentation du nombre de cycles de culture annuels.

#### But de l'étude et choix du site

Le but de cette étude est de déterminer l'incidence de ce système, conduit en particulier sans drainage de profondeur, sur l'évolution des sels dans les sols et dans les eaux (nappes et eaux de vidange). Le site retenu correspond à la vallée du Lampsar dans le delta du fleuve, où des travaux antérieurs de cartographie (LE BRUSQ 1980), ont permis la caractérisation précise des sols ainsi que la compréhension de leur agencement dans le paysage. Les principaux types de sols représentés dans cette vallée sont représentatifs d'un certain nombre de cuvettes aménagées du delta (Kassak - Tellel - Grande digue - Boundoum), dans lesquelles le principal facteur d'évolution des sols est la position géomorphologique qui a conditionné, avant aménagement, la durée de l'inondation par les eaux de crue, et donc l'intensité du processus d'hydromorphie auquel se surimpose partout actuellement une pédogénèse saline. Les cuvettes de Lampsar présentaient entre autres intérêts, celui d'être mises en eau pour la première fois en 1980 et donc de pouvoir être caractérisées avant culture.

Le schéma de répartition transversale des différents types de sols dans la vallée est le suivant :

Unité Géomorphologique	Type de sol
Dune	Sol brun subaride sur sables
Glacis de raccordement	Sol peu évolué hydromorphe sur colluvions
Cuvette de décantation	Vertisol hydromorphe à gley plus ou moins salé, sur argiles et sables de profondeur
Fluvio-deltaïque Haut et Bas (Levés)	Sol hydromorphe à pseudogley plus ou moins salé sur matériau de texture variable
Levéed subactuelle	Sol peu évolué d'apport salé, sur sables alluviaux hétérogènes.
Lit mineur	Sols minéraux bruts sur alluvions

Des complications locales peuvent apparaître dans ce schéma, en particulier, des "deltas de rupture" transversalement à certaines levées.

### Méthodologie générale

L'ensemble des méthodes de suivi que nous exposons ci-dessous est relativement simple et facile à mettre en oeuvre, bien qu'exigeant de nombreuses mesures, et le recours aux méthodes statistiques. Le pH, la conductivité, le dosage de quelques ions (essentiellement  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{SO}_4^{=}$ ), sont les mesures essentiellement mises en oeuvre. Nous n'avons pas tenté, par contre, de doser les cations échangeables; En effet, les méthodes disponibles ne donnent pas satisfaction dans les sols salés et il est par ailleurs possible d'appréhender les proportions de cations échangeables (cf. 2.3.2.) par différentes méthodes de calcul simples qui donnent des résultats voisins, et sont donc fiables.

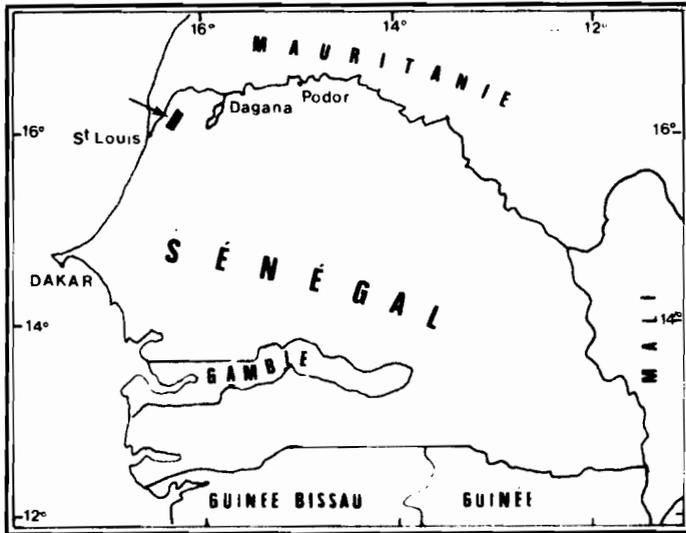
Nous n'avons pas non plus effectué de mesures physiques (indices de stabilité, perméabilité). D'une part, le suivi de l'évolution physique fait l'objet d'une autre campagne de recherches (Dynamique de l'eau dans les sols de la vallée), d'autre part, nous verrons que l'évolution de certains comportements physiques (stabilité de structure, perméabilité), est prévisible par des mesures chimiques (pH, S.A.R. de la solution).

## I - EVOLUTION DE LA SALINITE ET DU pH DES SOLS

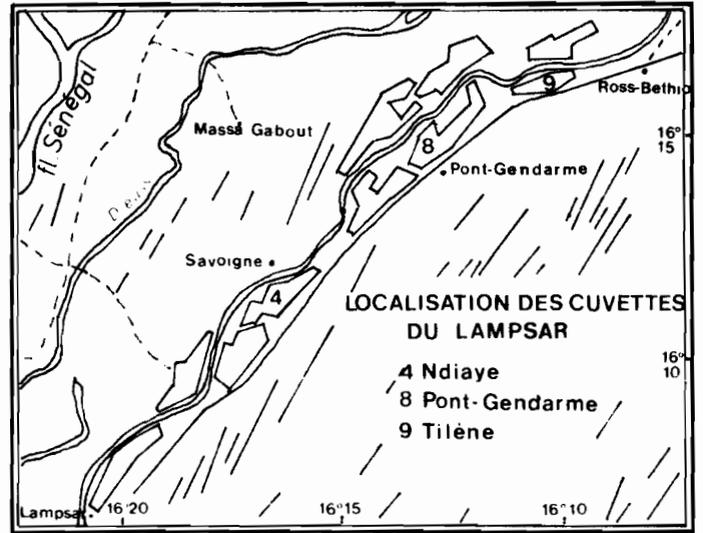
### 1.1. Protocole expérimental

Quatre parcelles, représentatives des niveaux de salinité, des types de sols et des positions géomorphologiques dans les cuvettes irriguées, ont été choisies : (voir cartes de situation - fig.1).

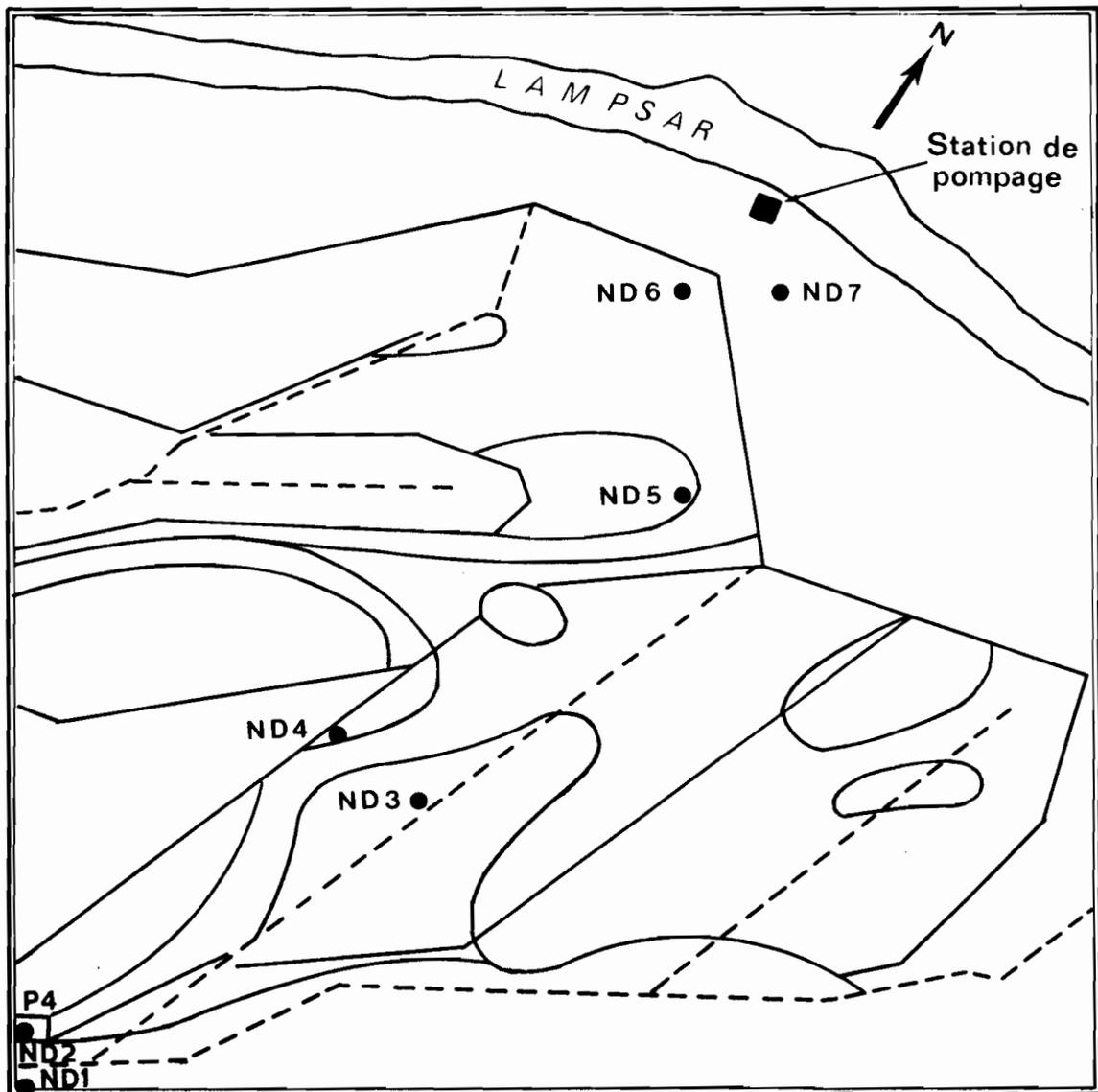
Fig.1 CARTES DE SITUATION



1a - Carte générale de situation

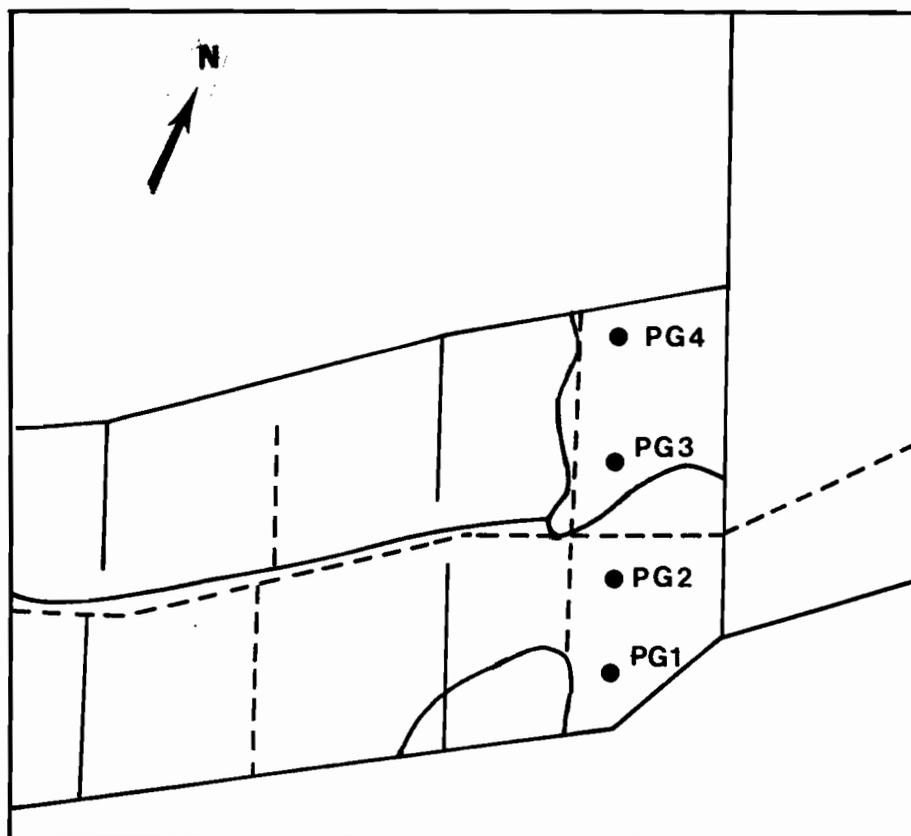


1b - Localisation des cuvettes étudiées

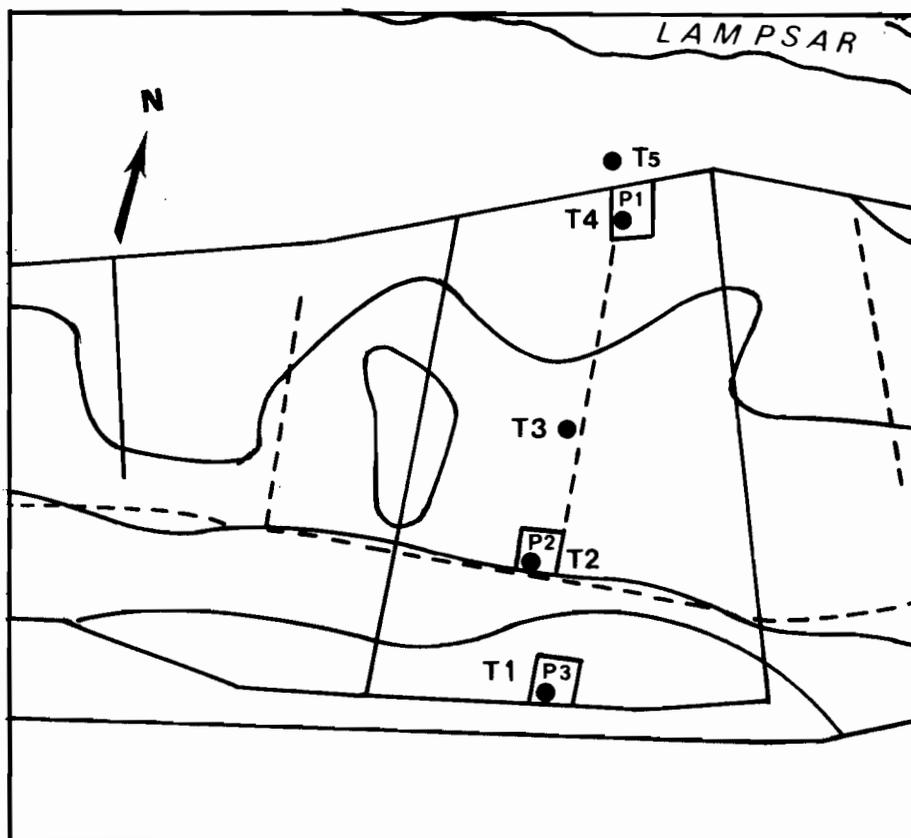


1c - Emplacement de la parcelle d'expérimentation N°4 et des piézomètres de la cuvette de NDIAYE (Extrait de la carte pédologique des cuvettes de la vallée du LAMPSAR, LE BRUSQ 1980)

## CARTES DE SITUATION (suite)



1d \_Cuvette de Pont-Gendarme: Emplacements des piézomètres



1e \_Emplacements des parcelles d'expérimentation et des piézomètres de la cuvette de Tilène. ( Extrait de la carte pédologique des cuvettes de la vallée du LAMP SAR - LE BRUSQ 1980 )

- Parcelle 1 : Tilène Nord : Levée du Lampsar. Sol sodique à structure dégradée, salin à alcalins, à structure moyennement dégradée sur matériaux fins. Argile sur 80 cm, puis niveaux sableux et argileux alternant; salinité de 6 mmhos en surface à 3 mmhos en profondeur, sur extrait 1/5 ; pH de 5,5 en surface à 6,5 en profondeur.
- Parcelle 2 : Tilène Centre : Fond de cuvette de décantation. Sol Hydromorphe peu humifère à pseudogley d'ensemble et gley salé de profondeur à partir de 1,5 m. Faciès verticale salé. argile sur 60 cm, puis sable. Salinité : 0,5 mmhos, sur extrait 1/5 ; pH : 6.
- Parcelle 3 : Tilène Sud : Glacis de raccordement dune-cuvette. Sol Peu Evolué d'origine non climatique, d'apport fluvio-marin, hydromorphe à pseudogley ; sablo-argileux sur 20 cm, puis sableux. Salinité : 0,3 mmhos sur extrait 1/5 ; pH de 6 en surface à 4 en profondeur.
- Parcelle 4 : N'Delle : Fond de cuvette de décantation. Sol Hydromorphe peu humifère à pseudogley d'ensemble et gley salé de profondeur, à partir de 1,5 m; verticale, faciès parasulfaté acide, à jarosite. Argile sur 1,2 m puis sable. Salinité : 0,9 mmhos sur extrait 1/5 ; pH de 5 en surface à 4 en profondeur.

Chaque parcelle est un carré de 50 m de côté. Deux séries de prélèvements ont été effectués, le 15 Août 1980, avant la première mise en culture, et le 21 Janvier 1981, après la première récolte et le resuyage des sols.

Chaque prélèvement consiste en 10 sondages à 1,2 m de profondeur; chaque tranche de 20 cm de sol est prélevée séparément. Les emplacements des 10 sondages sont répartis au hasard et différents pour chaque série de prélèvements. Les mesures de pH et de conductivité sur extrait 1/5 sont effectués sur les échantillons séparés, pour apprécier la dispersion des mesures. Les dosages des ions majeurs sont effectués après regroupement des échantillons de même profondeur pour les 10 sondages de chaque parcelle.

## 1.2. Méthodologie

Le protocole expérimental permet de connaître la salinité et le pH à une certaine date, en 10 points différents, pour 6 profondeurs jusqu'à 1,2 m, dans chaque parcelle.

On peut donc calculer, pour chaque profondeur, la valeur moyenne de chaque paramètre, et la dispersion des valeurs (écart-type). Cependant, la comparaison de 2 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 prélèvement, 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 (1). 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.

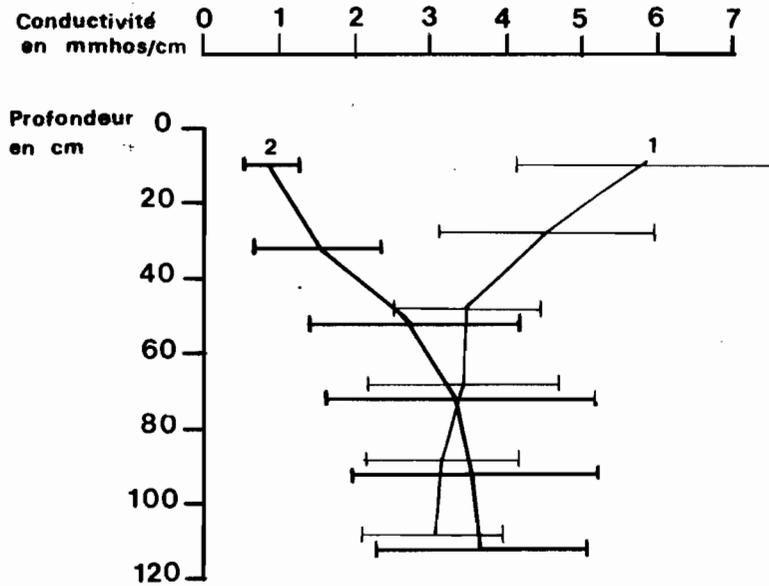
### 1.3. Résultats : Mesures de conductivité et de pH

#### 1.3.1. Parcelle n° 1 (Sol Sodique à structure dégradée de levée alluviale)

Profondeur	% de variation
0 - 20 cm	- 85 %
20 - 40 cm	- 67 %
40 - 60 cm	- 20 %
60 - 80 cm	- 2 %
80 - 100 cm	+ 14 %
100 - 120 cm	+ 21 %

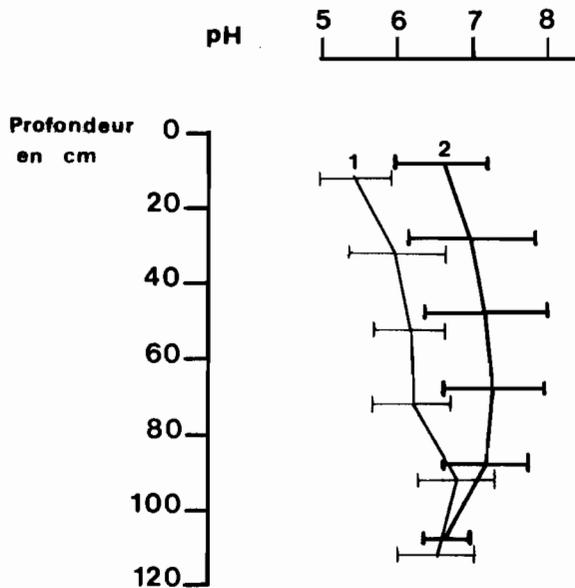
Tableau 1 : Pourcentages de variation des sels  
( - indique un dessalement,  
+ indique une augmentation de salinité)

(1) Statistique appliquée à l'exploitation des mesures C.E.A. Masson 1978.



**Parcelle 1 : Moyennes et intervalles de confiance à 5% de la conductivité**

1. 15/08/80, avant culture
2. 21/01/81, après culture



**Parcelle 1 : Moyennes et intervalles de confiance à 5% du pH**

1. 15/08/80
2. 21/01/81

**Fig. 2 Variations du pH et de la conductivité dans la parcelle 1.**

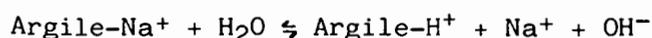
Il ressort du tableau 1 et de la figure 2 que :

- les 50 premiers centimètres de sol ont été nettement dessalés, après la riziculture tandis qu'en profondeur, la salure s'est maintenue, voire à légèrement augmenté. Le profil salin observé en Janvier 1981 n'est guère favorable dans la mesure où des remontées capillaires risquent de resaliniser les horizons de surface en saison sèche. En effet, si le bilan du dessalement est de - 63 % pour la couche 0-60 cm, il est de + 10 % pour la couche 60-120 cm, le bilan global pour la couche 0-120 cm étant de - 33 % .

Nous avons d'ailleurs déjà noté (LE BRUSQ J.-Y., 1980) que la profondeur des drains était insuffisante pour assurer le dessalement des couches profondes, et que l'instabilité structurale, en profondeur, dans les sols sodiques salés, rendrait le lessivage des sels difficiles, par suite d'une imperméabilisation des couches de moyenne profondeur.

- le pH a notablement augmenté sur tout le profil, surtout en surface. Ceci peut être attribué à plusieurs causes :

- \* Emploi d'engrais phosphatés alcalinisant (phosphates de calcium). Cette cause est cependant relativement mineure.
- \* Les réactions de réduction de certains éléments, et surtout du soufre (sulfato-réduction) sont consommatrices de protons (cf. Ponnampereuma, 1972). L'augmentation du pH dans les sols submergés est donc un phénomène général. Il semble en outre, qu'après le ressuyage, les éléments réduits n'ont été que partiellement réoxydés.
- \* Le lessivage des sols peut amener une hausse de pH dans les sols salés à alcalis, par hydrolyse du sodium fixé sur le complexe absorbant :



Il semble bien que ce mécanisme ait été à l'œuvre ici. En effet, nous avons mesuré des pH atteignant 9,6, et les pH les plus élevés correspondent aux échantillons les plus dessalés.

Cette hausse de pH est inquiétante pour 2 raisons :

- la sulfato-réduction et la dénitrification sont plus importantes à pH neutre qu'à pH acide (Ponnampereuma, 1972). On sait la toxicité des sulfures pour le riz à certains stades de croissance (cf. LOYER J.-Y., JACQ. V.A., REYNAUD P.A., 1981).

- les argiles risquent de se disperser à pH élevé, provoquant un confinement du milieu, une compacité et une imperméabilisation du sol. Si cette alcalisation devait se poursuivre, il serait ensuite très difficile de récupérer les sols atteints.

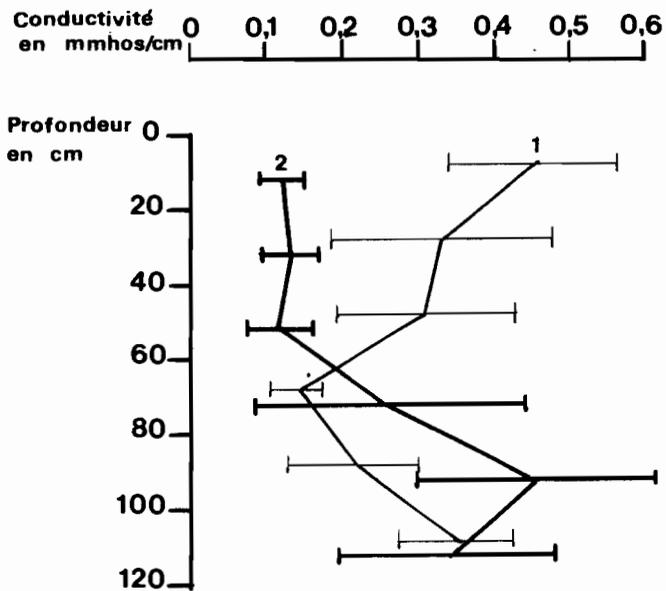
1.3.2. Parcelle n° 2 : Sol Hydromorphe faciès salé de fond de cuvette de décantation, caractérisé par la superposition de deux couches granulométriques très tranchées : très argileux sur les 30/40 premiers cm, passant brutalement à du sable).

Profondeur	% de variation
0 - 20 cm	- 71 %
20 - 40 cm	- 55 %
40 - 60 cm	- 9 %
60 - 80 cm	+ 223 %
80 - 100 cm	+ 162 %
100 - 120 cm	+ 10 %

Tableau 2 : Pourcentages de variation des sels dans la parcelle 2  
 ( - : Dessalement  
 + : Augmentation de salinité)

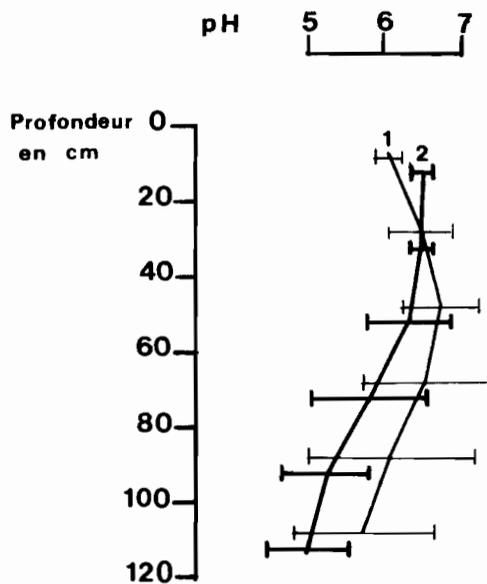
Nous observons l'évolution suivante:(Tableau 2 et Figure 3)

- la conductivité a nettement diminué sur les 50 premiers centimètres. Par contre, elle a augmenté en profondeur. Ceci est sans doute la conséquence de la remontée de la nappe salée pendant l'irrigation (voir piézomètre T2 p.21 ), jusqu'à 50 cm de la surface. Cette augmentation de salure en profondeur, importante entre 60 et 100 cm, devra donc être surveillée. Le bilan du Dessalement, qui est de -49 % pour la couche 0-60 cm, est en fait de +9 %, pour l'ensemble de la couche 0-120 cm.
- le pH, stable en surface, a diminué en profondeur ; les valeurs atteintes restent cependant dans une fourchette acceptable.



**Parcelle 2 : Moyennes et intervalles de confiance à 5% de la conductivité**

1. 15/08/80, avant culture
2. 21/01/81, après culture



**Parcelle 2 : Moyennes et intervalles de confiance à 5% du pH**

1. 15/08/80
2. 21/01/81

**Fig. 3 -Variations du pH et de la conductivité dans la parcelle 2**

1.3.3. Parcelle n° 3 : Sol Peu Evolué Hydromorphe de glaciaire de raccordement, sableux dans l'ensemble

Profondeur	% de variation
0 - 20 cm	- 64 %
20 - 40 cm	- 32 %
40 - 60 cm	- 52 %
60 - 80 cm	- 39 %
80 - 100 cm	- 31 %
100 - 120 cm	- 56 %

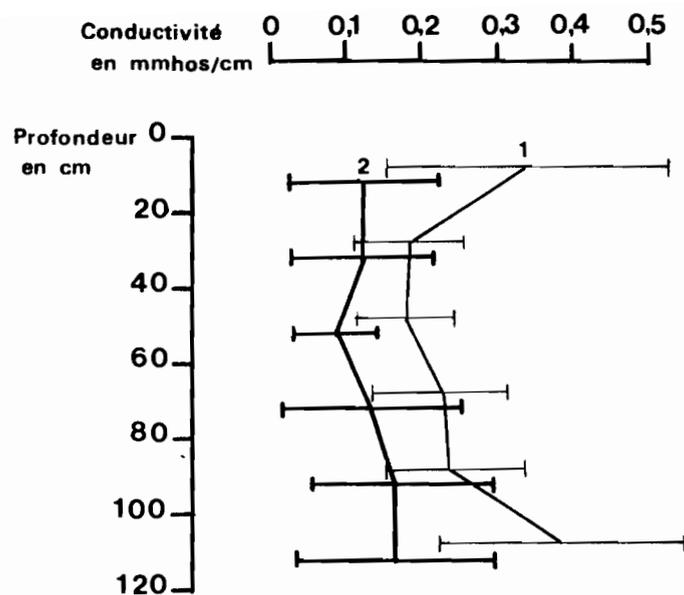
Tableau 3 : Pourcentages de variation des sels dans la parcelle 3

Nous constatons ici (fig. 4 et Tableau 3):

- une baisse de la salure sur tout le profil (Bilan de la couche 0-120 cm : -48 %). Ceci s'explique par la bonne perméabilité du sol qui est ici très sableux, et par une conductivité modérée de la nappe. ( $\approx 10$  mmhos/cm). Lorsque cette dernière s'abaisse, il reste peu de sels dans le sol, étant donné la faible capacité de rétention de ce sol sableux pour l'eau.

Il ressort de ceci que les sols à texture grossière sont facilement dessalés sur une épaisseur importante, et conviennent donc le mieux pour les cultures maraîchères sensibles au sel ; celles-ci en effet, ne sont pas irriguées par submersion permanente, mais par intermittence, à la raie. Les risques de salinisation par remontées capillaires, notamment sur les billons, sont donc importants (LOYER, J.Y., DIALLO M.A., 1978) et un dessalement poussé est donc nécessaire avant d'envisager ce type de culture.

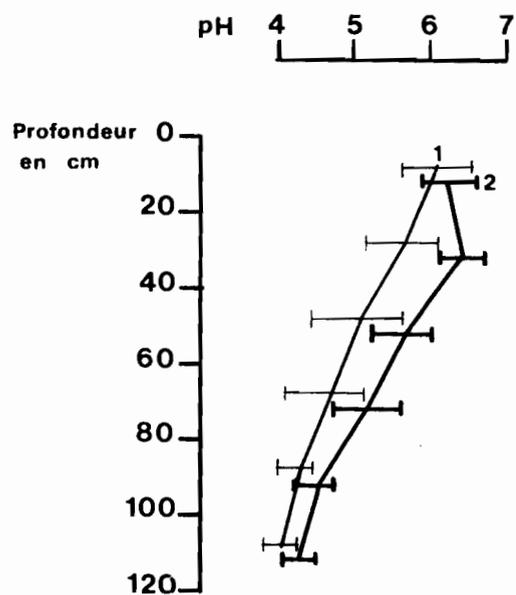
- une légère augmentation de pH sur tout le profil, sans doute par suite de la submersion. Les sols sableux étant très faiblement tamponnés, cette variation de pH est peu significative.



Parcelle 3 : Moyennes et intervalles de confiance à 5% des conductivités

1. 15/8/1980

2. 21/1/1981



Parcelle 3 : Moyennes et intervalles de confiance à 5% du pH

1. 15/8/1980

2. 21/1/1981

Fig. 4. Variations du pH et de la conductivité dans la parcelle 3.

1.3.4. Parcelle n° 4 : Sol Hydromorphe peu humifère, faciès parasulfaté acide, très argileux, de cuvette de décantation.

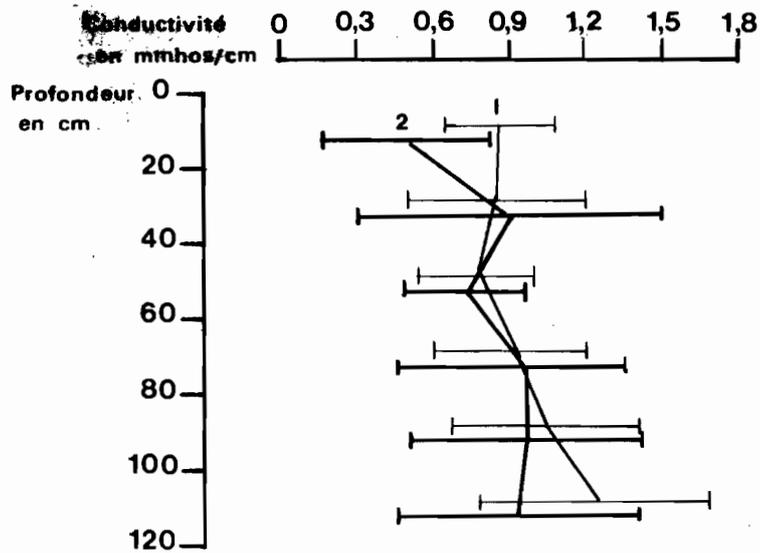
Notons que cette parcelle, après avoir été mise en culture pendant environ 1 mois, a été abandonnée suite à de mauvais résultats peut-être liés à des causes microbiologiques. La submersion de la parcelle a duré environ deux mois au total (Septembre/Octobre 1981).

Nous constatons les faits suivants (fig. 5) :

- le dessalement a été très faible (bilan du dessalement : -13 % de 0 à 120 cm). La nature argileuse du matériau, la durée faible de la submersion, suivie d'une période de ressuyage après laquelle des remontées capillaires ont pu se faire, peuvent expliquer ceci.
- le pH a légèrement remonté, très probablement à la suite de réactions de réduction. Il reste cependant très bas, ce qui est un caractère de ce type de sol parasulfaté acide.

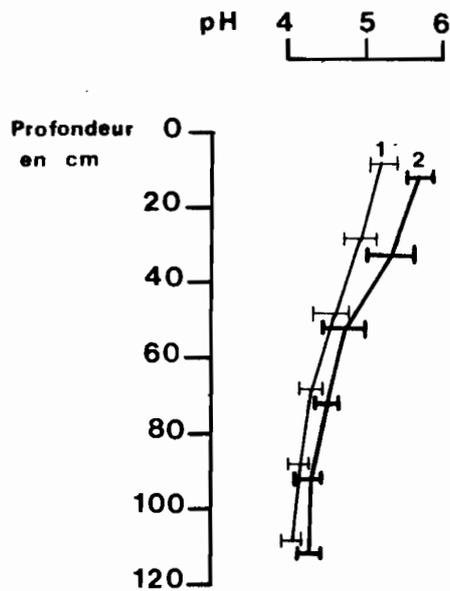
#### 1.3.5. Conclusion pour l'ensemble des parcelles

Il semble donc que, sauf pour les sols très sableux initialement peu salés, le dessalement après riziculture submergée se fasse sentir uniquement sur les 50 premiers centimètres du sol. En dessous, par suite de la présence d'une nappe très salée (voir paragraphe 2) liée à la faible profondeur des drains, la salure a peu varié. Si l'on considère alors le S.A.R. élevé des eaux de nappe (voir paragraphe 2.3.2) susceptible de provoquer une alcalisation des argiles, il est à craindre que l'on aboutisse en profondeur à un milieu imperméable, confiné, et il sera alors très difficile d'éliminer la salure résiduelle, qui reste encore à un niveau élevé. L'élévation du pH dans les sols sodiques à structure dégradée, est à ce titre un élément inquiétant. L'enrichissement de ce type de sol en calcium (sous forme de gypse ou de chaux) est donc un remède qu'il serait bon d'étudier ; une première expérience en laboratoire, a donc été effectuée et est présentée ci-dessous.



Parcelle 4 : Moyennes et intervalles de confiance à 5% des conductivités

1. 15/8/1980
2. 21/1/1981



Parcelle 4 : Moyennes et intervalles de confiance à 5% du pH

1. 15/8/1980
2. 21/1/1981

Fig.5 Variations du pH et de la conductivité dans la parcelle 4

#### 1.4. Etude du dessalement d'un sol sur colonne

Nous avons testé l'effet de la chaux sur la perméabilité et le dessalement d'échantillons de sol par des expériences sur colonne ; 500 g de terre broyée et tamisée à 2 mm provenant d'un horizon de surface d'un sol Hydromorphe salé (1,9 mmhos/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 3 répétitions ont été similaires dans chaque cas; sur la figure 6 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. L'élimination des sels est ainsi améliorée par l'addition de chaux. 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 seront donc à envisager, pour tenter de confirmer ces résultats en conditions réelles de culture.

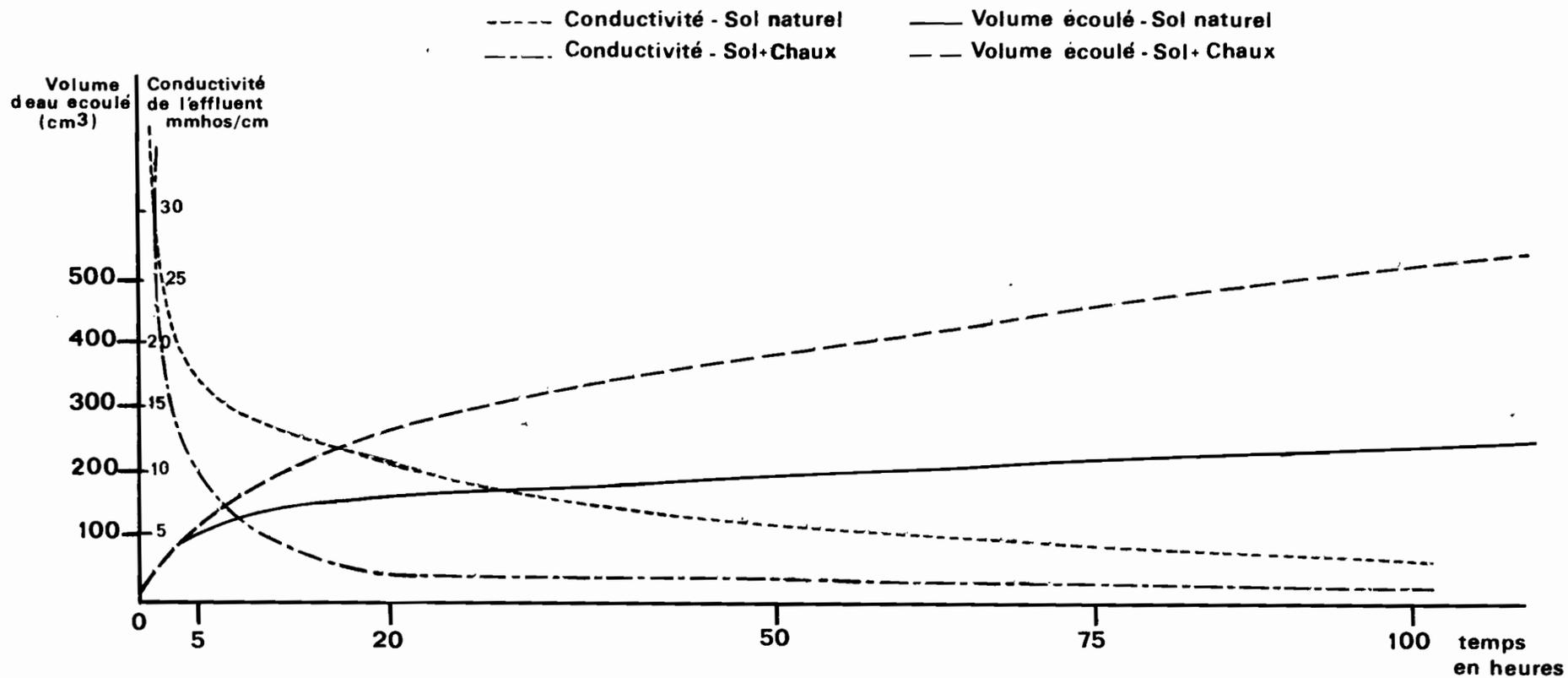


Fig.6 -Evolution de la perméabilité et de la conductivité de l'effluent durant la lixiviation d'une colonne de sol

II - EVOLUTION DES NAPPES

2.1. Dispositif expérimental

Seize piézomètres ont été mis en place en Août 1980 selon 3 séquences, transversales à la vallée (voir carte de situation - Fig. 1) :

- une séquence à Tilène :

T1 : sur le glacis de raccordement dune-cuvette, dans la parcelle de suivi des sols n° 3

T2 : au fond de la cuvette de décantation, dans la parcelle de suivi des sols n° 2.

T3 : à la limite cuvette-levée.

T4 : sur la levée, dans la parcelle de suivi des sols n° 1.

T5 : sur la levée, à 30 m en dehors des parcelles irriguées, en zone non cultivée.

- une séquence à Pont-Gendarme :

PG1 : en bordure de cuvette de décantation

PG2 : en fond de cuvette de décantation

PG3 : sur un delta de rupture

PG4 : sur un delta de rupture

- une séquence à N'Diaye :

ND1 : sur le glacis de raccordement dune-cuvette, à 150 m hors des aménagements

ND2 : au fond de la cuvette, dans la parcelle de suivi des sols n° 4

ND3 : au fond de la cuvette.

ND4 : en bordure de cuvette et d'un ancien complexe dune-plage.

ND5 : en fond de cuvette

ND6 : sur la levée du Lampsar

ND7 : sur la levée du Lampsar, à 30 m hors des parcelles irriguées (zone non cultivée).

La profondeur, la conductivité, le pH, la composition en sels des nappes ont été régulièrement suivis durant la saison de culture et la saison sèche suivante. Toutes les teneurs et pourcentages sont exprimés en mé/l dans la suite.

## 2.2. Résultats

### 2.2.1. Variations de profondeur des nappes (fig.7)

- Le 20 Août 1980, avant la mise en eau des parcelles, la nappe avait une profondeur par rapport à la surface du sol allant de 1,4 m en fond de cuvette (T1, T2, ND2) à 2,6 m sur la levée (T4, T5).
- Le 24 Septembre 1980, soit 1 mois après la mise en eau, la profondeur, dans les parcelles irriguées, allait de 0,2 m (PG2) à 1,6 m (T4) sans qu'apparaisse de relation nette entre vitesse de remontée de la nappe et position du piézomètre (distance au drain, type de sol). Les piézomètres hors aménagement T5 et ND7 voyaient le niveau de la nappe remonter de 70 cm, tandis qu'en ND1, le niveau ne variait pas. L'influence de la remontée de la nappe se fait donc sentir hors des périmètres irrigués, jusqu'à au moins 30 m des parcelles, mais à moins de 150 m.
- Le 07 Novembre 1980, la nappe avait atteint dans les parcelles cultivées son niveau maximum, de quelques cm à 0,5 m, mais continuait en T5 et ND7 (hors parcelle), à monter jusqu'au 12 Décembre (1,25 m et 1,5 m de profondeur, respectivement).
- Au 13 Janvier 1981, soit environ deux semaines après la vidange des parcelles, le niveau avait baissé de 0,5 à 1 m dans les parcelles. La baisse se poursuivait ensuite plus lentement, pour atteindre le 15 Juillet, des profondeurs égales ou supérieures à celles du 20 Août 1981.

On observe donc en général une montée relativement rapide des nappes mise en eau, suivie d'un palier. La baisse après vidange des parcelles, est d'abord relativement rapide, puis plus lente. Il ressort de ceci que le dessalement des sols en profondeur sera limité par la montée des nappes, et que des contaminations des sols par ascension capillaire à partir de la nappe ne sont pas à exclure.

### 2.2.2. Variations de la salinité globale

Globalement, la teneur totale en sels des nappes est revenue au même niveau en Avril 1981 qu'en Août 1980. La première saison d'irrigation par submersion n'a donc pas modifié sensiblement la salinité des nappes. Des variations ont cependant été observées loca-

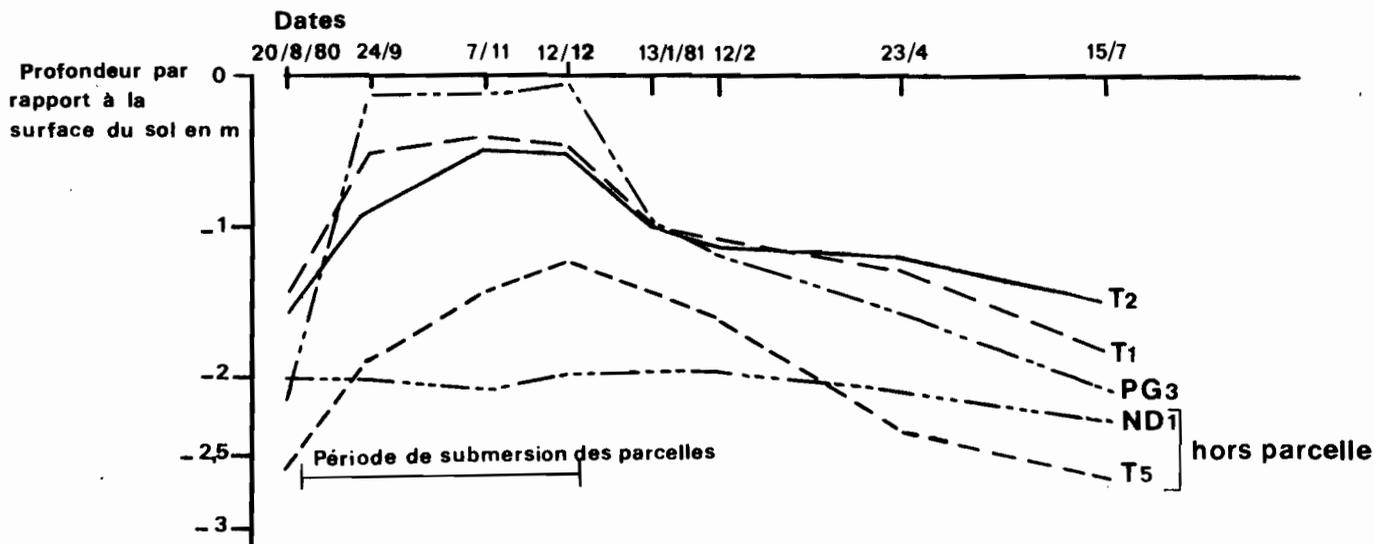


Fig.7 Variations de profondeur des nappes dans le temps

Fig. 8 Variations de la salinité globale des nappes dans le temps

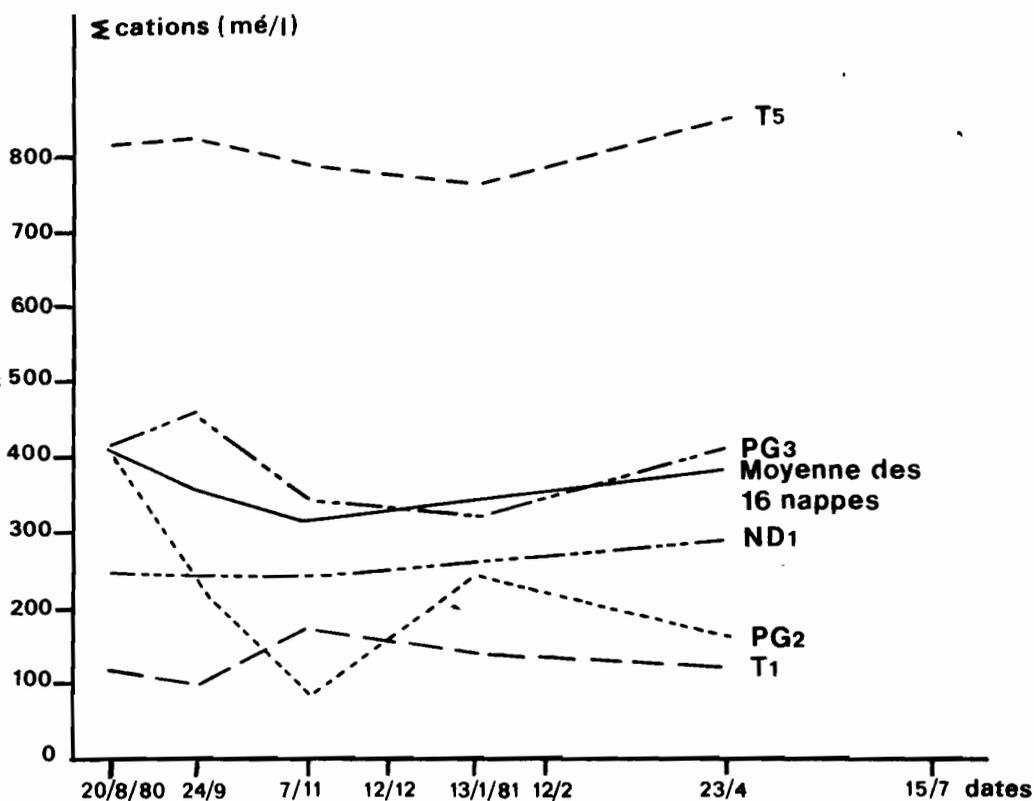
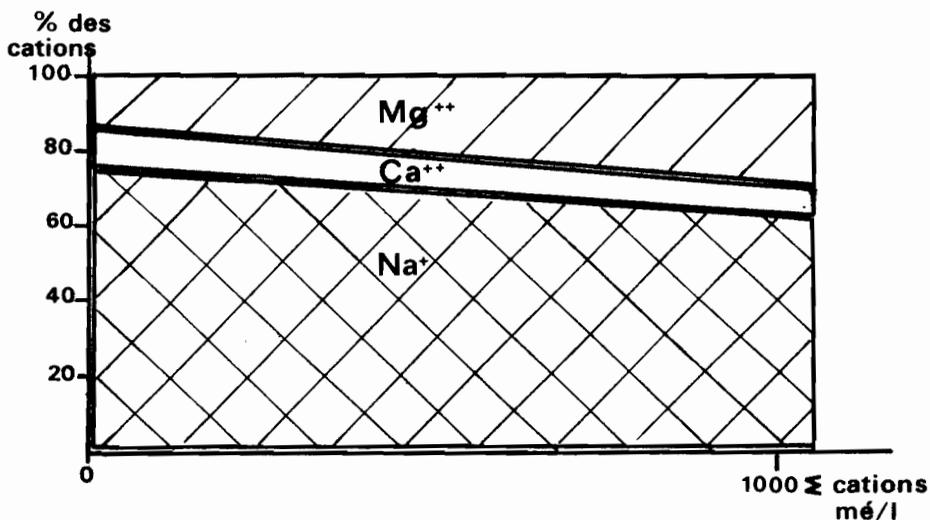


Fig. 9 Pourcentage des cations en fonction de la concentration des nappes



lement pendant l'irrigation (Fig. 8) :

- Parfois (PG3), la concentration en sels augmente en début du cycle puis décroît lentement, pour retrouver son niveau initial en Avril, en même temps que la nappe retrouve sa profondeur initiale. Le cas se produit dans les sols très salés, où la mise en solution et le lessivage des sels de la surface a sans doute entraîné un apport à la nappe, avant que ces sels ne soient partiellement évacués vers les drains.
- Dans les piézomètres en bordure d'un drain important, (PG2), la salure a d'abord fortement diminué, pour remonter ensuite, sans atteindre toutefois son niveau initial.
- Dans le piézomètre T1, la salure a légèrement augmenté pendant l'irrigation, bien que le sol environnant soit très peu salé. La salure a ensuite lentement diminué, en même temps que le niveau de la nappe baissait.

L'interprétation des variations locales de salure des nappes est rendue délicate par l'ignorance dans laquelle nous sommes des mouvements latéraux des eaux de profondeur, dictés par des facteurs complexes (topographie, perméabilités, présence des drains).

Les points importants sont qu'en moyenne, la teneur totale en sel des nappes n'a que très peu diminué après une saison d'irrigation, et que la salure n'a que peu diminué pendant la remontée du niveau des nappes.

### 2.2.3. Variations de composition chimique

Nous distinguerons des variations dans le temps de la composition en sels, et des variations dans l'espace, à un instant donné.

2.2.3.1. Variations dans le temps

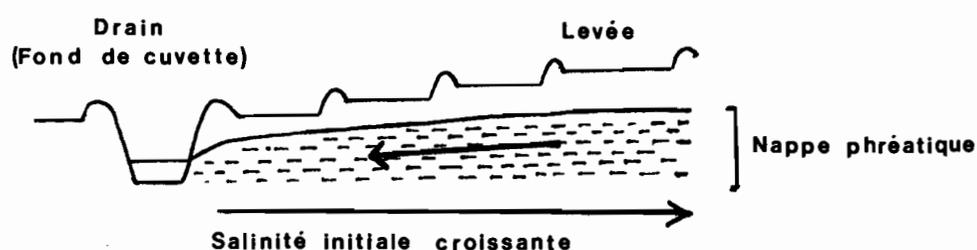
Nous donnons ci-dessous - tableau 4 - les pourcentages des différents cations et anions dans l'ensemble des 16 nappes prélevées, à différentes dates.

Date Ions	Avant culture 20/8	Pendant la culture 24/9	Pendant la culture 11/11	Après la culture 21/4	Variation en %
Na <sup>+</sup>	65,8	63,5	67,2	61,32	- 4,48
K <sup>+</sup>	1,15	1,23	1,11	1,4	+ 0,25
Ca <sup>++</sup>	9,88	9,72	10,28	10	+ 0,12
Mg <sup>++</sup>	23,17	25,55	21,41	27,28	+ 4,11
Cl <sup>-</sup>	80,7	80	80	82,2	+ 1,5
SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	19,3	20	20	17,8	- 1,5
Σ ( Cations ) = 100			Σ ( Anions ) = 100		
<p><u>Tableau 4</u> : Pourcentages des différents ions à différentes dates, pour l'ensemble des 16 piézomètres.</p>					

Les variations des pourcentages sont en général faibles, surtout pour les anions. Il est cependant intéressant de comparer les compositions avant (20/8), et après (21/4) la période d'irrigation. On constate alors une baisse du pourcentage de sodium, compensée par une augmentation du pourcentage du magnésium. Cette évolution est similaire à celle observée dans les eaux de drainage (cf. 3.3.) et constitue une légère amélioration de la composition dans la mesure où l'ion Na<sup>+</sup> est le plus dangereux par sa toxicité et son pouvoir alcalisant. L'évolution du pH des nappes est difficile à mettre en évidence. Ne disposant pas de pH-mètre de terrain, les mesures ont été effectuées au laboratoire, après un certain délai. Des phénomènes d'oxydation se sont produits, qui ont souvent abouti à des dépôts d'oxy-hydroxydes de fer dans les flacons. Les pH mesurés ont souvent été très bas (de l'ordre de 4) sans correspondre à la réalité du terrain.

### 2.2.3.2. Variations dans l'espace

Du point de vue de la distribution des nappes selon leur qualité dans le paysage, les plus hautes salinités s'observent sous les levées et deltas de rupture; les plus faibles, au fond des cuvettes. Les parcelles situées sur les levées et deltas de rupture étant en position haute, il est à craindre que les nappes les plus salées ne se déplacent lentement vers les parcelles basses des fonds de cuvette (voir schéma ci-dessous). Nous avons constaté par ailleurs, que le pourcentage de magnésium croît dans les nappes les plus salées, tandis que le pourcentage de sodium décroît (cf. figure 9). Cette évolution de la composition relative avec la concentration est similaire à l'évolution dans le temps de la composition des nappes et des eaux de drainage.



**Migration des eaux et évolution de la salinité**

## 2.3. Approche géochimique de la salinité des nappes

L'un des problèmes majeurs dans l'étude des relations sol-eau est la prévision de l'évolution de la composition des eaux au cours de leur concentration ou de leur dilution. Nous donnons ci-dessous quelques indications allant dans le sens de cette préoccupation.

### 2.3.1. Suivi de la composition chimique des nappes

Pour suivre l'évolution de la composition des nappes en fonction de leur concentration, on peut faire figurer les concentrations ioniques en fonction de la concentration d'un ion que l'on suppose ne pas précipiter dans les eaux étudiées. La concentration de cet ion est donc une mesure du facteur de concentration des diverses eaux. La figure 9 ayant montré que l'ion magnésium est celui dont la teneur

augmente le plus avec la concentration, nous avons donc représenté les logarithmes décimaux des concentrations en  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{SO}_4=$  (en mé /l) en fonction du logarithme décimal de la concentration en  $\text{Mg}^{++}$  (fig. 10 et 11).

Nous constatons les faits suivants :

a) cas des cations (figure 10)

- 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 mé/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 mé/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 par les eaux d'irrigation.
- 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 nous pouvons supposer qu'une partie du sodium est soustraite des eaux se concentrant.

b) cas des anions (figure 11)

- 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 peut d'ailleurs être utilisée comme mesure du facteur de concentration.
- la concentration en sulfate paraît d'abord à peu près constante, à 16 mé/l jusqu'à une concentration d'environ 10 mé /l de magnésium, puis croît jusqu'à 87 mé/l et reste ensuite à peu près cons-

Fig.10 - 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)

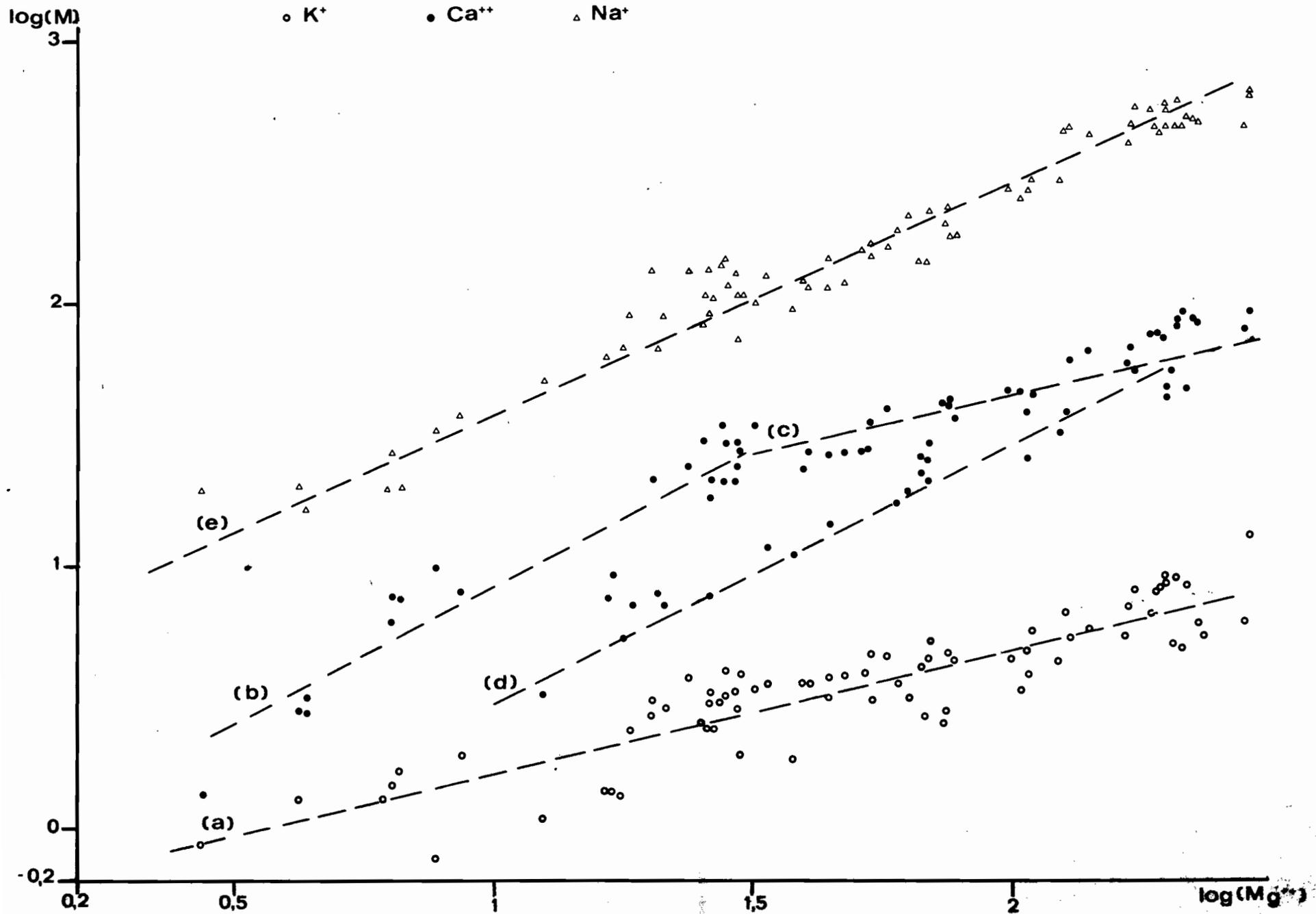
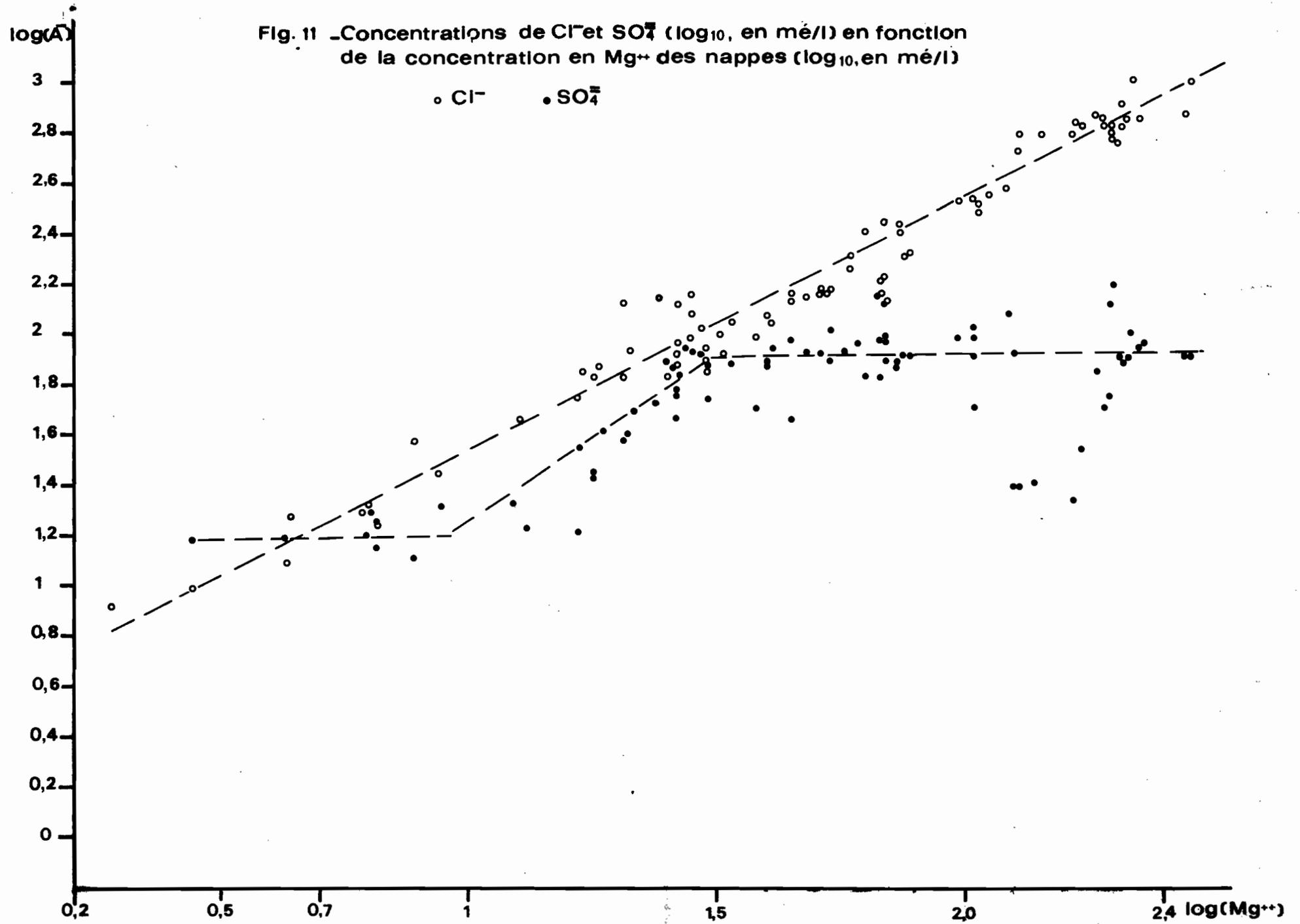


Fig. 11 - Concentrations de  $\text{Cl}^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  ( $\log_{10}$ , en  $\text{mg/l}$ ) en fonction de la concentration en  $\text{Mg}^{++}$  des nappes ( $\log_{10}$ , en  $\text{mg/l}$ )

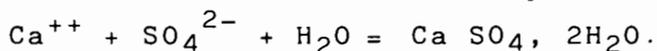


tante lorsque la concentration en magnésium croît. Notons que l'augmentation des teneurs en  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  est ralentie ( $\text{Ca}^{++}$ ), ou est arrêtée ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) pour un même facteur de concentration (30 mg/l de  $\text{Mg}^{++}$ ).

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.

#### 2.3.1.1. 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. Prenons l'exemple de la précipitation du gypse :



Lorsqu'il y a équilibre entre les ions en solution, et le gypse, on a :

$$\frac{(\text{Ca}^{++}) (\text{SO}_4^{2-}) (\text{H}_2\text{O})^2}{(\text{Ca SO}_4, 2\text{H}_2\text{O})} = K \quad (K = 10^{-4,6} \text{ à } 10^{-4,8} \text{ selon les auteurs})$$

Les activités chimiques sont placées entre parenthèses.

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

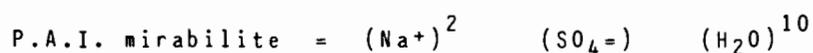
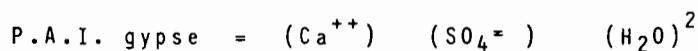
Les activités de  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{H}_2\text{O}$  doivent être calculées, car dans les solutions salines de dilution non infinie, on ne peut plus admettre l'égalité des activités et des concentrations. Le calcul des activités fait intervenir les interactions entre les ions, de nature électrostatiques, la formation de paires d'ions, telles  $\text{Na SO}_4^-$  ou  $\text{CaCO}_3^0$ .

Nous avons effectué ces calculs pour 13 eaux (tableau 5). Il en ressort que les eaux dont les teneurs en ( $\text{Ca}^{++}$ ) s'alignent sur le segment (c) (figure 10), sont très proches de la saturation vis-à-vis du gypse, voire saturées. Notons aussi que la valeur maximum du produit des activités  $(\text{Ca}^{++}) (\text{SO}_4^{2-}) (\text{H}_2\text{O})^2$  est d'environ  $10^{-4,6}$ . Cette valeur a également été trouvée par Mireille DOSSO sur des nappes de la vallée de l'Euphrate (Syrie).

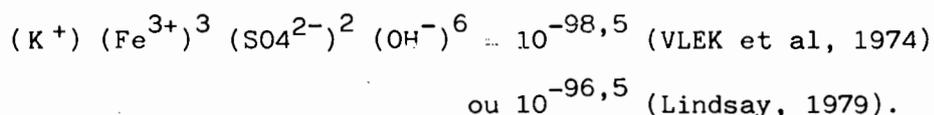
Il y a donc très probablement précipitation de gypse à partir des eaux de nappe les plus concentrées. Cette précipitation s'accompagne d'une

Nappes	ND3 20/08/80		T1 20/08/80		PG3 20/08/80		T3 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>o</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>o</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>o</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>o</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 5 : Molalités et activités des ions simples et complexes dans quelques nappes



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 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  $NaSO_4 \cdot 10 H_2O$ ) 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  $K^+ Fe_3^{3+} (SO_4^{2-})_2 (OH^-)_6$  ou de Natrojarosite  $Na^+ Fe_3^{3+} (SO_4^{2-})_2 (OH^-)_6$  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, (LE BRUSQ, 1980) et les pH des eaux, mesurés au laboratoire, sont souvent assez bas pour amener la précipitation de jarosite. 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.

#### 2.3.1.2. 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. Nous pouvons le faire 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 mé/100 g d'argile, on trouve que 1 litre d'eau

de nappe est en présence d'une capacité d'échange d'environ 300 mé. On peut ensuite calculer le taux de sodium sur le complexe, en utilisant, par exemple la relation (2) du paragraphe 2.3.2.2. ci-dessous :

$$\text{ESP} = \% \text{ de sodium sur le complexe} = 0,988 \frac{\text{Na}}{\sqrt{\frac{\text{Ca} + \text{Mg}}{2}}} - 0,61$$

où Na, Ca et Mg sont les concentrations, en mé/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, ALDROUBI A., 1976).

Nous avons considéré 2 eaux, 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 10 et 11. On donne ci-dessous les concentrations en mé/l et les quantités de cations échangeables en équilibre avec 1 litre de solution.

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

On constate les faits suivants :

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

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:  $\text{Na}^+$  passe de la solution sur le complexe, tandis que  $\text{Mg}^{++}$  suit le chemin inverse. On comprend aussi pourquoi on n'observe pas d'inflexion dans la courbe (e) figurant les teneurs en  $\text{Na}^+$  en fonction de la concentration alors que cette inflexion s'observe dans le cas du calcium, précipité sous forme de gypse (Fig. 10). 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 en 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  $\text{Ca}^{++}$  passent du complexe vers la solution (89 mé dans le cas présent), alors que le sulfate n'existe qu'en solution. Nous comprenons alors 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 déjà été constaté (LE BRUSQ, 1980) dans les zones salées des cuvettes du Lampsar.

Nous voyons donc l'importance qu'il y a à prendre en compte les réactions d'échange dans l'évolution des nappes et du sol. Les calculs ci-dessus ne prétendent pas être quantitativement exacts mais donnent un ordre de grandeur des phénomènes; Nous allons donc tenter d'apprécier plus exactement l'importance de la fixation du sodium sur le complexe adsorbant.

### 2.3.2. Pouvoir alcalisant des eaux

Le pouvoir alcalisant des eaux est estimé par le calcul du Sodium Adsorption Ratio (SAR) :

$$(1) \text{ S.A.R. } = \frac{\text{Na}}{\sqrt{\frac{\text{Ca} + \text{Mg}}{2}}} \quad \text{où les concentrations des ions en solution}$$

sont exprimées en mé/l. Le taux de sodium sur le complexe croît avec le S.A.R., et ce taux est un bon indicateur des risques de dégradation de la structure du sol et d'élévation du pH. Des valeurs du S.A.R. de 10 à 50 ont été obtenues pour les nappes étudiées, alors que des valeurs supérieures à 15 sont considérées comme dangereuses. Il impor-

tait donc de porter une attention particulière à ce problème crucial pour l'évolution du sol.

2.3.2.1. Calcul du S.A.R. à partir des activités

Divers auteurs (RAO T.S., PAGE A.L., COLEMAN M.T., 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 S.A.R. à partir des activités plutôt qu'à partir des concentrations. Nous avons fait ce calcul pour quelques eaux et avons constaté que la formule utilisant les concentrations paraissait sous-estimer le pouvoir alcalisant des eaux (tableau 6). Ceci est lié à ce qu'un pourcentage important des ions  $Ca^{++}$  et  $Mg^{++}$  sont dans ces eaux sous forme de paires d'ions  $Ca SO_4^0$  et  $Mg SO_4^0$  (Cf. tableau 5).

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

Tableau 6 : S.A.R. calculés à partir des concentrations et à partir des activités pour diverses eaux de nappe.

2.3.2.2. Calcul du taux de sodium sur le complexe d'échange du sol

La connaissance du S.A.R. 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 E.S.P. (Exchangeable Sodium Pourcentage =  $\frac{Na \times 100}{T}$ ), soit le E.S.R. (Exchangeable Sodium Ratio  $\frac{Na \times 100}{(T-Na)}$ ).

Ces relations empiriques ont une base théorique, qui est l'équation de Gapon, reliant les concentrations ou activités en solution, aux fractions équivalentes des cations échangeables. Pour deux ions  $N^+$  et  $M^{++}$ , on a :  $K = \frac{\bar{N}^+(M^{++})^{1/2}}{\bar{M}^{++}(N^+)}$  où  $\bar{N}^+$  et  $\bar{M}^{++}$  sont les fractions équivalentes des ions sur l'argile,  $(M^{++})$  et  $(N^+)$  les concentrations ou activités en solution (pour plus de détail, voir 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 S.A.R. - E.S.P. 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 4 relations pour calculer quelques valeurs de ESP :

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

établie à partir d'un important échantillonnage de sols des USA.

$$(2) \text{ ESP} = 0,988 \text{ SAR} - 0,61 \quad (\text{CRUESI, 1970})$$

établie à partir de sols irrigués de Tunisie, riches en sulfates.

$$(3) \text{ ESR} = 0,014 \text{ SAR}^* - 0,111 \quad (\text{RAO et al. 1968})$$

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

établie avec 2 sols argileux à montmorillonite de Californie,

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

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 8 nappes (tableau 7).

Equation \ Nappe	(1)	(2)	(3)	(4)
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 7 : Taux de sodium échangeable (ESP) prévisibles pour les sols en contact avec les eaux de nappe

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. Si l'on considère que ces eaux de nappe remontent parfois durant l'irrigation à moins de 20 cm de la surface, sans que leur concentration ne baisse sensiblement, on voit à partir du tableau 7 que le risque d'alcalisation des sols par les nappes est très important. Toute valeur du ESP dépassant 15 est en effet 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 tendance alcalisées (Tableau 8) :

Profondeurs - Horizon	Argile %	pH/eau	Perméabilité K cm/h	Instabilité structurale (Is)	Densité apparente	Porosité %
1 0/40cm 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

Tableau 8 : Données analytiques sur le sol de cuvette de Tilène

### III - EVOLUTION DES EAUX DES DRAINS

#### 3.1. Dispositif expérimental

Au cours de la campagne rizicole de 1980, seule la station d'exhaure des eaux des drains de NOAR était en fonctionnement. Le suivi a donc porté uniquement sur les eaux de drainage évacuées à cette station. Ces eaux provenaient des drains des cuvettes de Tilène, Pont-Gendarme, N'Gomene et N'Diaye, correspondant à une superficie cultivée de 596 ha. Leur composition résulte donc 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 superficielles évacuées des parcelles à certains stades de la riziculture, provenant de zones diverses par la salinité et les types de sols. Le dispositif expérimental consistait en :

- une station de mesure automatique du sodium dans les eaux évacuées, installée à la station d'exhaure de Noar ; alimentée par panneaux solaires elle a permis, grâce à une électrode spécifique du sodium de mesurer et d'enregistrer en continu la concentration en sodium des eaux évacuées pendant les 4 mois de riziculture (LOYER J.-Y. et ZOGBI R., 1982).
- la station d'exhaure de la SAED équipée de 4 pompes permettant de connaître à chaque instant le volume d'eau évacué en fonction du temps de marche des pompes.
- des prélèvements réguliers d'eau de drainage, sur lesquelles des mesures de pH, de conductivité et le dosage des ions majeurs étaient effectués au laboratoire de Dakar.

### 3.2. Evolution de la conductivité

Trois périodes peuvent être distinguées pendant la durée de la submersion des parcelles (Fig. 12) :

- du 4 Septembre au 28 Septembre pendant les 25 premiers jours de culture, la conductivité oscille entre 400 et 4 000  $\mu\text{mhos}$ , les valeurs les plus fréquentes allant de 1 500 à 3 000  $\mu\text{mhos}$ . Les variations d'une journée à la suivante paraissent aléatoires et sont probablement liées aux volumes respectifs d'eau de vidange des parcelles et d'eau de nappes qui parviennent au drain.
- du 29 Septembre au 10 Décembre (26ème au 98ème jour), la conductivité atteint des valeurs élevées, de 6 000 à 14 000  $\mu\text{mhos}$ . Il est probable que durant cette période, la vidange des parcelles a été moins importante que durant la première période, et l'eau drainée est donc en majeure partie en provenance des nappes.
- du 10 au 20 Décembre (du 98ème au 108ème jour), la conductivité baisse jusqu'à des valeurs comprises entre 4 000 et 6 000  $\mu\text{mhos}$ . Cette baisse est liée à la vidange des parcelles en fin de culture. Notons que la conductivité reste, malgré tout, supérieure aux valeurs de la première période.

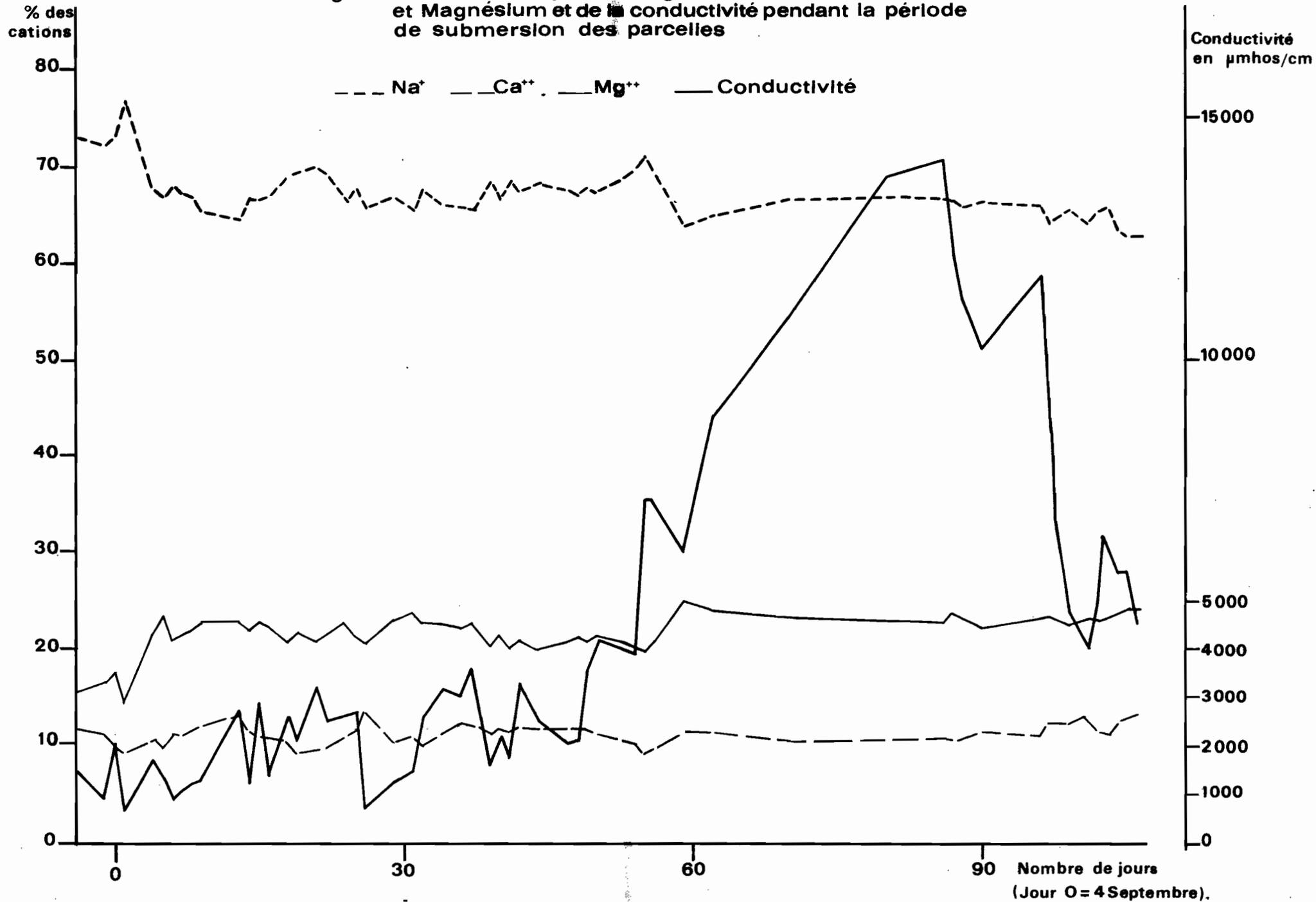
### 3.3. Evolution de la composition chimique des eaux de drainage

Les variations chimiques des eaux de drainage ont été relativement limitées (fig. 12) et paraissent aléatoires sur de courtes périodes de temps. Le pourcentage du sodium parmi les cations a varié de 63 à 70 %, celui du calcium de 9 à 13 %, celui du magnésium de 20 à 25 %. On peut mettre en évidence cependant une certaine évolution :

- du 04 Septembre au 1er Novembre, 58ème jour de culture, les pourcentages de cations sont en moyenne les suivants :

Na <sup>+</sup>	.....	67,6	%
Mg <sup>++</sup>	.....	22,08	%
Ca <sup>2+</sup>	.....	10,32	%

Fig. 12 Evolution des pourcentages de Sodium, Calcium et Magnésium et de la conductivité pendant la période de submersion des parcelles



- du 02 Novembre au 20 Décembre, du 58ème jour au 108ème jour, les pourcentages sont :

Na <sup>+</sup> .....	64,7 %
Mg <sup>++</sup> .....	23,5 %
Ca <sup>2+</sup> .....	11,8 %

Il y a donc une légère baisse du pourcentage de sodium, compensée par une augmentation des pourcentages de calcium et de magnésium. Cette évolution est similaire à celle des eaux de nappe. Notons que le passage d'un type de composition à l'autre semble assez net, vers le 1er Novembre (58ème jour) et correspond à l'augmentation rapide de conductivité des eaux.

IV - TENTATIVE DE BILAN POUR L'ENSEMBLE DES CUVETTES DE TILÈNE, PONT-GENDARME, N'GOMENE ET N'DIAYE

Connaissant les apports d'eau pour l'irrigation et les évacuations par drainage, il est possible d'effectuer un bilan de l'eau et des sels pour l'ensemble des cuvettes cultivées en rive gauche, du 24 Août au 16 Décembre 1980.

4.1. Bilan des eaux

- les apports d'eau d'irrigation au cours de la campagne rizicole ont été les suivants :

Cuvette	Volume apporté (m <sup>3</sup> )	Surface cultivée (ha)	Volume en m <sup>3</sup> / ha
Tilène	1 111 230	106	10 483
N'Gomene	2 022 962	200	10 115
Pont-Gendarme	1 764 327	170	10 378
N'Diaye	1 213 126	120	10 109
Total rive gauche	6 111 645	596	10 254

Remarquons que les consommations d'eau par hectare sont voisines pour les différentes cuvettes, et de l'ordre des normes admises pour la riziculture.

- les pertes par évapotranspiration ont été estimées à partir des mesures d'évaporation-bac effectuées à la S.O.C.A.S., en retranchant les pluies tombées durant la période de culture (45 mm). On obtient une hauteur d'eau de 720 mm/m<sup>2</sup>, soit un volume total de 4 291 200 m<sup>3</sup>.

- le volume drainé et évacué à Noar a été de 1 109 084 m<sup>3</sup>. Le bilan fait donc apparaître un excès de 711 361 m<sup>3</sup>.

D'après les relevés des piézomètres, nous avons constaté que la nappe avait en moyenne monté de 130 cm entre le 24/8 et le 16/12. En supposant que la porosité occupée par l'eau ait donc augmentée de 30 % en moyenne, nous voyons qu'un volume de 2 324 000 m<sup>3</sup> d'eau peut être stocké dans les sols en fin de campagne. Cette eau s'est ensuite pour partie évaporée, à travers le sol, pour partie écoulee vers les drains d'où elle s'est évaporée.

L'excès du bilan d'eau s'expliquerait donc simplement par un stockage dans les sols.

#### 4.2. Bilan des sels

- les apports par les eaux d'irrigation sont calculés à partir de la composition moyenne des eaux du Lampsar durant la période de culture.

Eaux d'irrigation	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	H CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
teneur en mg/l	15,4	3,12	3,28	8,2	34,4	41,3	3,6
Apports totaux (en tonnes)	94,2	19,1	20,1	50,2	210,4	252,6	22,0

- les apports essentiels sont ceux de sodium, calcium, chlorures et sulfates.

- les évacuations par les eaux de drainage ont été calculées à partir des mesures de sodium en continu pendant tout le cycle de culture effectuées par LOYER J.Y., à la station d'exhaure de Noar à l'aide d'une électrode spécifique, et à partir d'analyses chimiques complètes effectuées régulièrement au laboratoire ORSTOM de Dakar :

	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>++</sup>	Ca <sup>++</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	H CO <sub>3</sub>
Teneur moyenne des eaux de drainage mg/l	545	19,9	97	86	1 187	124,3	19,52
Exportations totales (en tonnes)	604,6	22,1	107,6	95,4	1 316	138	21,6

Nous constatons que, sauf pour le sulfate et les carbonates, les exportations ont dépassé les apports. Pour les carbonates, les équilibres entre ceux-ci et l'atmosphère, leurs fluctuations au cours de la journée dans les eaux de surface, liées aux variations de pH de celle-ci (LOYER J.-Y., JACQ V.A., REYNAUD P.A. 1981), font que les gains dans les parcelles irriguées ne sont pas certains.

Bilan des sels	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>++</sup>	Ca <sup>++</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	H CO <sub>3</sub>
En tonnes	- 510,4	- 3	- 87,5	- 45,2	- 1105,6	+ 114,6	+ 0,4
En g/m <sup>2</sup>	- 85,6	- 0,5	- 14,7	- 7,6	- 186	+ 19,2	+ 0,07

En supposant une densité de sol de 1,45 et une épaisseur de dessalement de 60 cm, les quantités de sodium éliminées correspondraient à des pertes de 9,84 mg/100 g de sol ou 0,43 mé/100 g. Pour le calcium, on aurait 0,87 mg ou 0,04 mé/100 g éliminés. Nous avons vu qu'en fait l'importance du dessalement croissait avec la teneur initiale en sels, et que parfois (parcelle 2) il y avait même une augmentation de salure des horizons profonds.

Notons enfin que le rapport des exportations  $\text{Na}^+ \text{ exp} / \text{Ca}^{++} \text{ exp}$ , en mé, est de l'ordre de 11, soit supérieur aux valeurs les plus fréquentes dans les sols ( $\text{Na}^{++} / \text{Ca}^{++}$  de l'extrait 1/5 de 1 à 10). Il y aurait donc une légère amélioration du rapport Na/Ca dans les sols.

### Conclusions générales

Nous pouvons résumer ainsi les principales observations effectuées au cours de la campagne rizicole 1980/1981 :

- au cours de l'irrigation, le niveau de la nappe phréatique a fortement remonté, parfois jusqu'à 10 à 20 cm de la surface, tout en gardant souvent une conductivité très élevée et un pouvoir alcalinisant dangereux (" alcalinisation remontante").
- de ce fait, le dessalement, important dans les sols les plus salés (-60 % sur la couche 0-60 cm), ne s'est guère fait sentir au-dessous de 40 à 60 cm. En outre, dans les zones situées en bordure des parcelles les plus salées, la salure de profondeur a localement augmenté. Ces observations peuvent être comparées aux résultats obtenus par MUTSAARS et VAN DER VELDEN (1973) lors d'expériences de dessalement dans la cuvette de Boundoum, avec utilisation de drains enterrés à 1,6 m : après percolation de 600 mm d'eau, un dessalement d'environ 95 %, sur 1 m de profondeur, avait été obtenu. Bien que la quantité d'eau percolée ait été du même ordre dans les cuvettes du Lampsar, (607 mm en 90 jours) le pourcentage de dessalement a été nettement inférieur au cours de cette 1ère campagne (-60 % dans les sols les plus salés) et surtout limité à une profondeur de 50 cm en raison de la remontée des nappes.
- on observe après dessalement des zones initialement très salées, une forte augmentation de pH (jusqu'à 9,6) qui traduit probablement une alcalisation du complexe adsorbant. Ce fait est très certainement le plus inquiétant dans l'évolution des sols, et pourrait amener à un abandon de la culture sur ces parcelles après quelques années d'irrigation de ce type.

- par ailleurs, nous avons pu constater que des cultures maraîchères (tomates) étaient réalisées par les agriculteurs en dehors des parcelles aménagées, en utilisant notamment l'eau d'un drain d'une conductivité minimale de 1,3 mmhos, pour l'irrigation. Il est à craindre que de telles pratiques ne dégradent des sols initialement peu salés, car situés le plus souvent en bordure des dunes (glacis de raccordement).

Ainsi, nous pouvons donner les recommandations suivantes :

- le niveau de l'eau dans les drains devra être maintenu aussi bas que possible, par l'entretien régulier de ceux-ci (curage) et par un pompage permanent pendant tout le cycle de culture aux stations d'exhaure, visant à atteindre un niveau minimum de l'eau. Il est à noter que l'évacuation des eaux après la station d'exhaure de Noar, n'est pas correctement assuré, ce qui a fréquemment gêné le pompage.

- des mesures contre l'alcalisation (addition de chaux, de calcaire ou de gypse) devront probablement être prises. Cependant, ces apports peuvent présenter quelques inconvénients : apport de soufre dans le cas du gypse, augmentation du pH dans le cas de la chaux ou du calcaire.

D'ailleurs, dans les sols à pH supérieur à 8,4, le calcaire n'aurait sans doute pas d'effet car insoluble à ces pH. Aussi des études expérimentales sur le terrain seraient à envisager dès maintenant (choix des doses, des modalités d'apport). Ces mesures ne concerneraient que les sols initialement les plus salés (LE BRUSQ 1980).

En tout état de cause, le suivi de l'évolution des sols devra être poursuivi afin de veiller à ce que des phénomènes nuisibles aux cultures ne prennent trop d'extension. Si, actuellement le risque de salinisation par les eaux d'irrigation est négligeable en l'état actuel des sols, il ne faudra pas oublier que ceci ne restera vrai que tant qu'un système de drainage efficace sera maintenu. Notamment, si certaines zones sont un jour consacrées au maraîchage, après dessalement suffisant, ceci ne dispensera aucunement d'assurer une évacuation correcte des eaux de drainage.

B I B L I O G R A P H I E

- AL DROUBI A. - 1976 - Géochimie des sols et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermodynamique de simulation. Application aux sols du Tchad.  
Université Louis Pasteur - Strasbourg : Mémoire n° 46.
- CHEVERRY C. - 1974 - Contribution à l'étude pédologique des polders du lac Tchad. Dynamique des sels en milieu continental subaride dans des sédiments argileux et organiques.  
Thèse Université Louis Pasteur - Strasbourg.
- CRUESI Tunisie - Recherches et Formation en matière d'irrigation avec des eaux salées 1962/1969 - Rapport technique : UNESCO Paris UNDP (SF), TUNIS.
- DOSSO M. - 1980 - Géochimie des sols salés et des eaux d'irrigation. Aménagement de la basse vallée de l'Euphrate en Syrie.  
Thèse Université Paul Sabatier - Toulouse.
- FRITZ B. - 1975 - Etude thermodynamique et simulation des réactions entre minéraux et solution. Application à la géochimie des altérations et des eaux continentales.  
Université Louis Pasteur - Strasbourg - Mémoire n° 41.
- LE BRUSQ J.-Y. - 1980 - Etude pédologique des cuvettes de la vallée du Lampsar - ORSTOM/DAKAR.
- LINDSAY W.L. - 1979 - Chemical equilibria in soils Wiley Interscience.
- LOYER J.-Y. - DIALLO M.A. - 1979 - La cuvette de Pont-Gendarme. Données sur les sols et les nappes. Recommandations pour la mise en valeur - ORSTOM - Centre de DAKAR.
- LOYER J.-Y. - DIALLO M.A. - 1979 - Note sur les sols et sur les nappes de la cuvette de N'DELLE. Recommandation pour la mise en valeur - ORSTOM - Centre de DAKAR.
- LOYER J.-Y. - JACQ V.A. - REYNAUD P.A. - 1981 - Variations physico-chimiques dans un sol de rizière inondée et évolutions de la biomasse algale et des populations microbiennes du cycle du soufre. ORSTOM/DAKAR.
- LOYER J.-Y. - ZOGBI R. - 1982 - 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 - ORSTOM/DAKAR.
- OSTER J.D. - SPOSITO G. - 1980 - The Gapon coefficient and the exchangeable sodium percentage-sodium adsorption ratio relation.  
Soil Science Soc. of Am. J. 44 258-260.

- PONNAMPERUMA F.N. - 1972 - The chemistry of submerged soils. Advances in Agronomy vol. 24 - p. 29-96.
- 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 Science Soc. of Am. J. 32 639-643.
- RIEU M. - 1981 -S.A.R. et estimation du pouvoir alcalinisant des eaux. Cahier ORSTOM Pédologie - Vol. XVIII n° 2.
- SPOSITO G. - 1977 - The Gapon and the Vanselow selectivity coefficients. Soil Science Soc. of Am. J. 41 1205-1206.
- SPOSITO G. - MATTIGOD S.V. - 1977 - On the chemical foundation of the sodium adsorption ratio. Soil Science Soc. of Am. J. 41 323-329.
- United States Salinity Laboratory Staff - 1954 - Diagnosis and improvement of alkalis soils U.S. Dept. Agric. Handb. 60.
- VLEK P. L. G. - BLOM T.J.M. - BEEK J. - LINDSAY W.L. - 1974 - Determination of the solubility product of various iron hydroxydes and jarosite by the chelation method. Soil Soc. of Am. Proc. 38 429-432.