

H 12

Département de l'
Office du Niger



BIBLIOTHÈQUE	
N°	H 12
Date:	7 1990

IDENTIFICATION DE SALINISATION D'ALCALINISATION ET DE SODISATION DES TERRES A L'OFFICE DU NIGER

TREA CHRISTOFFERS
ESTHER EL-KHARBOTLY-RILL

Recherche dans le cadre de fin d'études en génie rural
à l'Université Agricole de Wageningen.

Mai, 1990

INTRODUCTION

La recherche qui est décrite dans ce rapport suit une mission d'appui qui a été effectuée afin de formuler et de préparer un volet sur la salinité et l'alcali(ni)té des terres à l'Office du Niger. Cette mission a été prévue par l'Institut d'Economie Rurale (I.E.R.) de la République du Mali. Pour cette mission Mr. W.F. van Driel, ingénieur en génie rural, a été invité par l'I.E.R. et la mission s'est déroulée du 25 février au 18 mars 1989. Cette mission a abouti à définir un programme de recherche. Le déroulement de la mission est décrit dans l'annexe I, ainsi que le programme de recherche comme c'est proposé pendant cette mission.

C'était le projet ARPON (Amélioration de la Riziculture Paysanne à l'Office du Niger) qui s'est chargé des financements de la première phase de cette recherche. Une description détaillée de la première phase se trouve dans l'annexe I. 4 étudiants ont participé au déroulement de la première phase: 2 étudiants venant de l'Institut Polytechnique Rural de Katibougou (Mali) (Mohammed K. Dicko et Ousmane M. Traoré) et 2 étudiantes de l'Université Agronomique de Wageningen (Pays-bas) (Esther El-Kharbotly-Rill et Trea Christoffers). C'était dans ce cadre que les auteurs ont séjourné au Mali de mai à décembre 1989, pour faire leurs thèses de fin d'études en génie rural.

Les étudiants étaient encadrés par un ingénieur-agronome, Mr. Amadou Traoré, sur place à Niono, avec l'appui d'un ingénieur-hydraulicien du projet ARPON, Mr. Dick Risselada. A partir du mois d'août nous avons reçu l'appui d'un ingénieur en génie rural, Mr. Erik van Slobbe.

Tous les travaux exécutés dans la première phase ont été coordonnés par Mr. Mamadou Kabirou N'Diaye, docteur-ingénieur agronome, expert en chimie de sol.

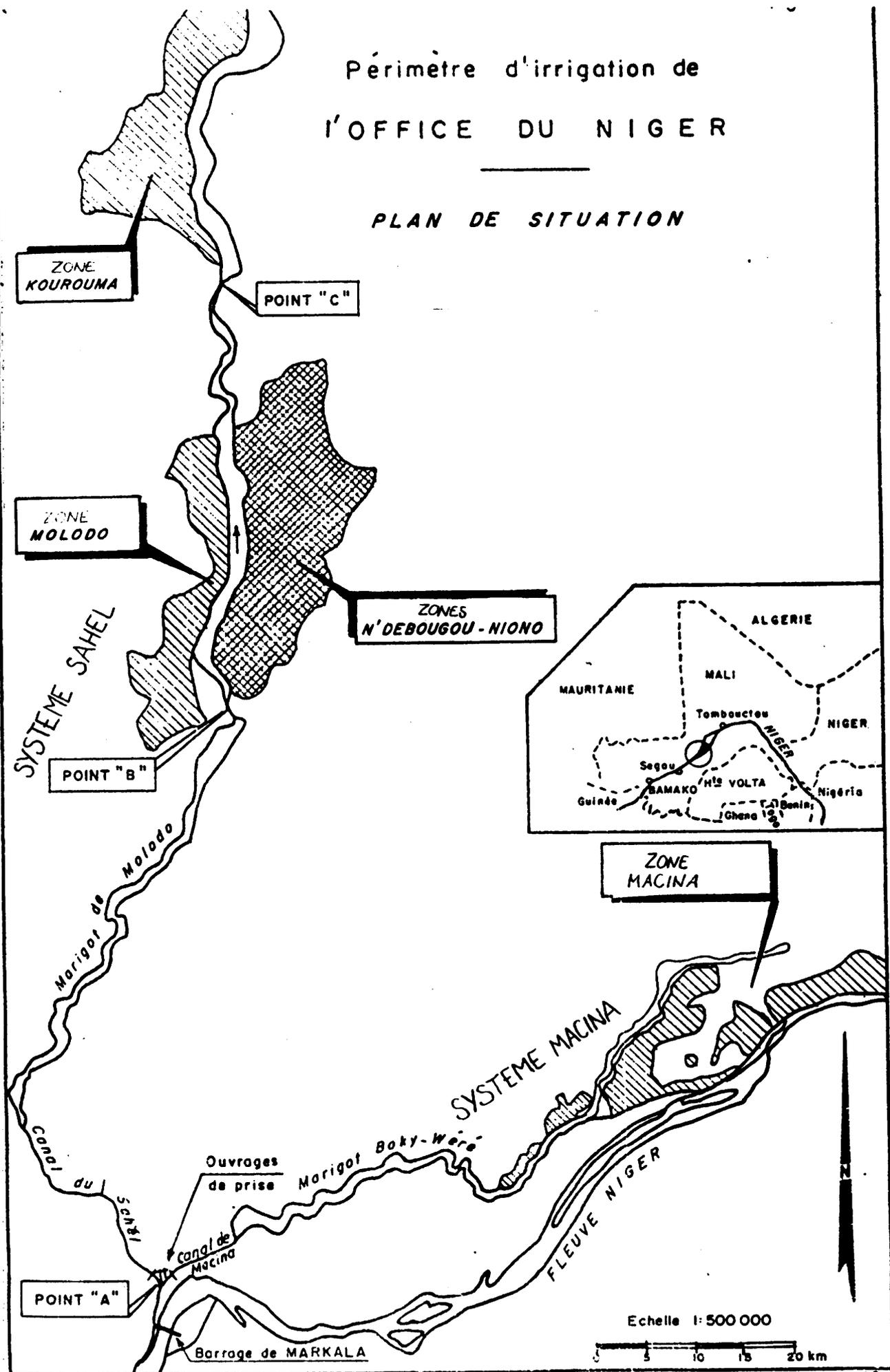
TABLE DE MATIERE

	page
INTRODUCTION	1
TABLE DE MATIERE	2
I L'OFFICE DU NIGER	4
1.1 Introduction générale	4
1.2 Le système hydraulique de l'Office du Niger	4
1.3 L'histoire de l'Office du Niger	4
1.4 Le climat	5
1.4.1 Général	5
1.4.2 Les températures	5
1.4.3 La pluviosité	5
1.4.4 Les vents	5
1.4.5 L'évaporation	5
1.4.6 Conséquences agronomiques	5
1.5 La situation hydro-géologique et pédologique	6
1.5.1 La situation hydro-géologique	6
1.5.2 La situation pédologique	7
II APERÇU GENERALE SUR L'ALCALI(NI)SATION/SALINISATION A L'OFFICE DU NIGER	9
2.1 Les phénomènes d'alcali(ni)sation et de salinisation	9
2.1.1 La salinisation	9
2.1.2 L'alcalinisation	10
2.1.3 L'alcalinisation ou sodisation	10
2.1.4 sodisation en relation avec salinisation et alcalinisation	11
2.2 Histoire et évaluations des phénomènes	12
III LA RECHERCHE	14
3.1 Choix des zones pilotes	14
3.2 Etudes hydrologiques	15
3.2.1 Objectifs	15
3.2.2 Méthodologie	15
3.2.3 Résultats	16
3.3 Etudes chimiques	20
3.3.1 Objectifs	20
3.3.2 Méthodologie	20
3.3.3 Résultats	22
3.3.4 Balance de sel	27
3.3.5 Corrélation entre les phénomènes et les types de sol	30
3.4 Etude agronomique	31
3.4.1 Objectifs	31
3.4.2 Méthodologie	31
3.4.3 Résultats	32
3.5 Enquêtes et cartographie	33
3.5.1 Objectifs	33
3.5.2 Méthodologie	33
3.5.3 Résultats	34
IV CONCLUSIONS	38

4.1	Introduction	38
4.2	L'importance des phénomènes de salinisation, d'alcalinisation et de sodisation à l'Office du Niger	38
4.3	L'irrigation	38
4.4	Le drainage	38
4.5	Le planage	39
4.6	Les courants d'eau souterrains	39
4.7	Une modèle sur la dynamique des processus de salinisation, d'alcalinisation et de sodisation	39
4.7.1	Les rizières	39
4.7.2	Les maraichères	40
4.7.3	Une comparaison entre les rizières et les maraichères	41
4.8	Les processus de salinisation, d'alcalinisation et de sodisation	41
4.8.1	La salinisation	42
4.8.2	L'alcalinisation	42
4.8.3	La sodisation	42
4.9	Les effets agronomiques de salinisation, d'alcalinisation et de sodisation	43
4.10	Les effets du réaménagement	43
V	RECOMMANDATIONS	44
	BIBLIOGRAPHIE	
	ANNEXES	

Périmètre d'irrigation de l'OFFICE DU NIGER

PLAN DE SITUATION



Echelle 1: 500 000

0 5 10 15 20 km

SOURCE: SOGREAH - GRENOBLE 1982

I L'OFFICE DU NIGER

1.1 Introduction générale

L'Office du Niger est une entreprise qui gère une superficie de 45.000 ha de culture irriguée au Mali. Maintenant la principale culture est la riziculture. Généralement l'exploitation est d'une manière semi-extensive avec un développement vers l'intensification. Le nombre d'exploitants est environ 10.000.

1.2 Le système hydraulique de l'Office du Niger

L'Office du Niger est situé dans le Delta Central Nigérien, dans le delta mort du fleuve, c'est-à-dire le delta qui n'est plus inondé par le Niger. Les anciens défluent du fleuve Niger qui entrent dans le delta, le Marigot de Molodo et le Marigot de Boky-Wéré, sont utilisés pour l'irrigation des deux systèmes de l'Office du Niger (le système Macina et le système Sahel). (voire fig. I-1)

La région de l'Office du Niger est divisée en 5 zones. Le système Macina constitue en une zone: la zone de Macina. Le système Sahel comprend 4 zones: les zones de Kouroumari, de N'Débougou, de Niono et de Molodo. Les zones de Kouroumari, de Niono et de Macina sont encore divisées en deux secteurs chacune.

L'eau d'irrigation est prise du fleuve Niger par un barrage qui permet de relever de 5 à 6 mètres le niveau d'eau en amont. Une fois dans le casier, les marigots nourrissent les principaux systèmes d'irrigation, consistants des distributeurs. Les distributeurs transmettent l'eau vers les partiteurs, les canaux secondaires. Enfin les arroseurs sur le niveau tertiaire et éventuellement les sous-arroseurs sur le niveau quaternaire, reçoivent l'eau des partiteurs pour irriguer directement les parcelles. A l'autre côté des parcelles se trouvent les drains d'arroseur qui se jettent dans les drains de partiteur, qui se jettent à leur tour dans les drains de distributeur. Les drains vont 25 à 30 km en brousse (hors-casier) et l'eau s'évapore et s'infiltrer dans quelques dépressions. La zone de Macina est une exception ici, parce que l'eau de drainage retourne au Niger.

1.3 L'Histoire de l'Office du Niger

L'Office du Niger fut créé en 1932. Le Mali était encore une colonie de la France et les Français voulaient rompre la dépendance des industries textiles françaises avec l'étranger (l'Egypte, les Etats-Unis). Aussi les Français voulaient propager après la guerre l'idée d'associer, d'organiser et de mettre en valeur les colonies à son profit. Pour ces deux raisons on a établi une grande entreprise agricole: l'Office du Niger, qui dirigeait la culture cotonnière. (Schreyger, 1984)

De nos jours, depuis 1960, le Mali est officiellement indépendant de la France. L'Office du Niger est devenu une entreprise appartenant à l'état malien en 1961. On a abandonné la culture cotonnière depuis 1970 pour des raisons socio-économiques et agricoles et remplacée par la riziculture et la canne à sucre.

Depuis 1984 cette dernière a été détachée de l'Office du Niger pour former SUKALA (co-gestion Mali-Chine).

Les buts de l'Office du Niger sont l'autosuffisance du Mali en riz et la retenue de la population rurale sur la campagne. L'abandon de la culture cotonnière s'est traduit par un accroissement des terres cultivées et une augmentation de la collecte du paddy. Mais, vers les années 1978, une grande chute continue de la collecte fut observée. Au cours de la campagne 1978-79 le rendement était de 2,68 tonnes/ha. Au cours de celle de 1982-83 la production a diminué jusqu'à 1,44 tonnes/ha, donc une baisse de 46,2% en 4 ans. (Rapport agricole des fins de campagnes 1948-49 à 1981-82, Service agricole, Archive Office du Niger)

Pour résoudre ce problème la Direction Générale de l'Office du Niger a fixé un programme de trois phases:

- la consolidation, 1983-1986;
- la réhabilitation, 1986-1990;
- l'extension, à partir de 1990.

Pendant la consolidation qui devait porter sur un tiers de la superficie, on devait faire:

- le curage du gros réseau et la réparation de certains ouvrages défectueux;
- la confection des diguettes suivant les courbes de niveau;
- la semence sélectionnée;
- la semis en lignes.

Cette phase n'a pas été évaluée officiellement.

La réhabilitation est la modernisation du réseau, la mise en place d'une structure de gestion adaptée et l'intensification de la riziculture. Normalement on parle du réaménagement. Le réaménagement est effectué par deux projets: le projet ARPON et le projet Retail. Jusqu'en 1989 le projet ARPON a réaménagé 10.000 ha en régie le l'Office du Niger. Le projet Retail a réaménagé 1.400 ha en régie privé.

L'extension dépendra des deux phases précédentes et doit être mieux définie (Dembele, 1986).

1.4 Le climat

1.4.1 Général

Au Mali le climat est du type aride. Vers le nord on trouve le désert, vers le sud on entre dans une zone où les précipitations et l'évaporation sont égales. Dans la zone de l'Office du Niger le climat est du type soudano-sahélien avec une seule saison de pluie, allant de juillet à fin septembre. On distingue trois périodes climatiques:

- une saison chaude, pluvieuse (juillet à octobre);
- une saison froide, sèche (novembre à février);
- une saison chaude, sèche (mars à juin).

1.4.2 Les températures

Tableau I-1 montre les températures moyennes à Niono.

Tableau I-1 Températures moyennes à Niono (1951-1985) (en °C)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
max.	32,6	35,3	37,6	39,3	39,9	37,5	33,7	31,9	32,8	35,2	35,1	32,0
min.	12,6	15,4	18,4	22,1	24,7	24,1	22,4	21,9	22,0	20,9	17,4	13,6
moy.	22,6	25,4	28,0	30,7	32,3	30,8	28,1	26,9	27,4	28,1	26,3	22,8

(N'Diaye, 1987)

1.4.3 La pluviosité

La pluviosité est très variable. Moyennement il y a environ 550 mm de pluie par année à Niono. Il y a une très grande variabilité interannuelle. L'intensité des pluies peut être élevée (plus que 50 mm par heure). Généralement le mois d'août est le plus pluvieux. Tableau I-2 montre la pluviométrie moyenne à Niono.

Tableau I-2 Pluviométrie moyenne à Niono (1939-1974) (en mm)

mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
pluv.	0,1	-	1,7	4,4	17,6	64,0	147,9	213,6	100,8	15,9	0,9	0,3

La pluviométrie totale par année est 567,2 mm.

(BEAU, 1981)

1.4.4 Les vents

Les vents qui dominent dans la région de l'Office du Niger sont l'harmattan et la mousson. L'harmattan est un vent chaud et sec qui souffle de mars à juin. Il a une action érosive. La mousson est un vent humide soufflant de juin à septembre. Elle apporte la pluie.

1.4.5 L'évaporation

Sauf pendant le mois d'août, l'évaporation est toujours supérieure à la pluviosité. Tableau I-3 montre l'évaporation bac et l'évapo-transpiration de référence.

Tableau I-3 L'évaporation bac, Niono 1982-1983 et l'évaporation de référence (en mm/jour)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
E bac	8,0	9,4	11,4	11,4	8,9	8,7	6,8	6,2	6,5	6,7	7,9	7,3
ET ref	5,6	6,4	7,5	7,7	7,4	6,9	5,7	5,8	6,1	5,6	6,2	5,4

(BEAU, 1981)

1.4.6 Conséquences agronomiques

Pendant la saison chaude pluvieuse on trouve la riziculture. Les paysans commencent avec le labour juste après les premières pluies. L'irrigation est ajustée suivant la pluie. Pendant la saison froide et sèche on trouve la riziculture irriguée incidemment, ce qu'on appelle la double-culture.

1.5 La situation hydro-géologique et pédologique

1.5.1 La situation hydro-géologique

L'Office du Niger se trouve dans une plaine alluviale qui est créée par le fleuve Niger pendant le quaternaire. Le cours du fleuve a été influencé par les systèmes dunaires éoliens. Dans le temps le cours du fleuve a changé beaucoup, la raison pour laquelle la plaine alluviale est assez vaste. L'épaisseur des couches alluviales varie entre 20 et 50 mètres (N'Diaye, 1987).

Aux moments des crues il y avait des inondations qui amenaient une déposée des sédiments alluviaux. Ces alluvions ont créé des sols d'une composition granulométrique très variable. Les sédiments les plus lourds (comme le gravier et le sable) se déposaient les premiers, tandis que les alluvions plus légères (les argiles) étaient entraînées plus loin, ce qu'on peut observer aujourd'hui encore (voire fig. I-2).

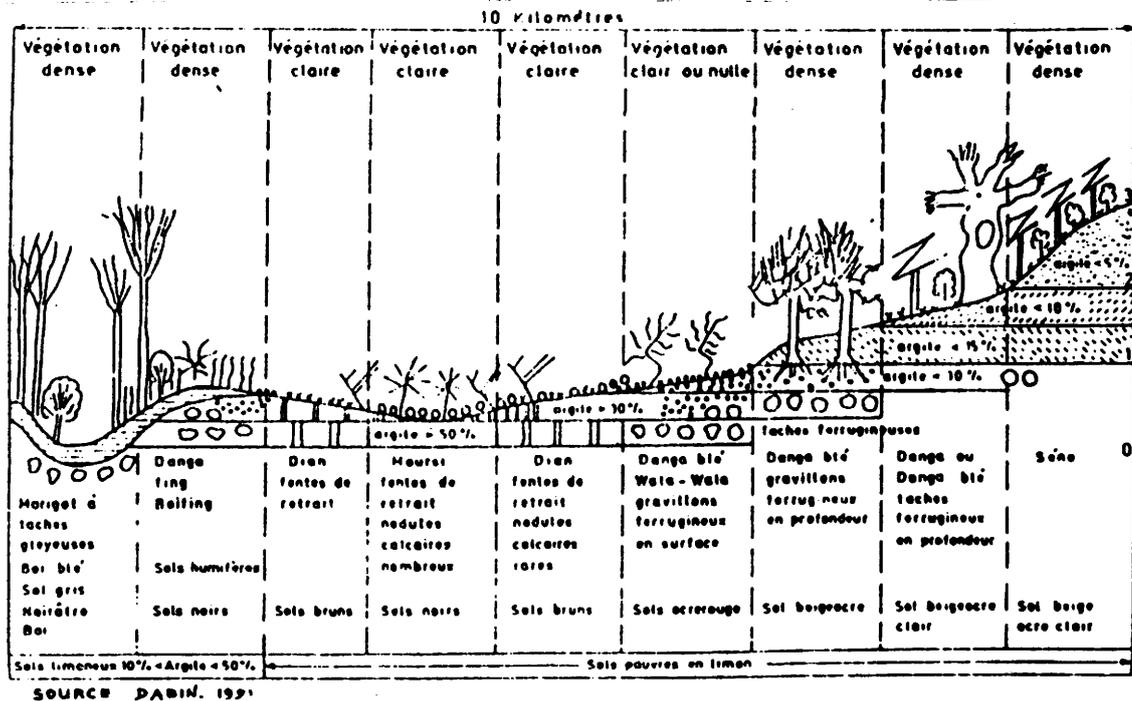


Figure I-2: Toposéquence des principaux types de sol

1.5.2 La situation pédologique

A l'Office du Niger une classification vernaculaire est utilisée pour définir les sols. D'origine c'était une classification bambara des paysans de la région. C'était le Français Dabin en 1948 qui a bien défini et élaboré cette classification. La classification vernaculaire est basée sur l'aspect superficiel du sol et elle tient compte de la texture, la structure, la couleur, le micro-relief, la présence de fentes de retrait, de gravillons ferrugineux et de nodules calcaires, beaucoup plus que de la composition granulométrique réelle comme beaucoup de classifications existantes. A l'intérieur d'un même type de sol on ne tient pas compte des nombreuses variations de détail dans la texture de l'horizon supérieur et de l'épaisseur des horizons. La classification vernaculaire avec de brèves indications sur la nature des sols est donnée ci-dessous:

- Séno - Formation dunaire, très sablonneuse;
- Danga - Sol beige, sablo-limoneux. Battant en saison de pluies, très dur en saison sèche;
- Danga blé - Sol ocre rouge plus ou moins foncé, limono-argileux, généralement friable en surface, sauf dans les zones très érodées, où il peut être recouvert de gravillons ferrugineux;

Danga fin - Sol beige noirâtre, analogue au Danga, mais plus riche en limon et en matière organique;
 Dian - Sol brun, argilo-limoneux, très compact, présentant fréquemment des fentes de retrait;
 Dian perré - Sol Dian très argileux, largement crevassé;
 Moursi - Sol noir, très argileux, à structure friable en surface; contenant de nombreux nodules calcaires et largement crevassé;
 Boi - Sol gris ardoisé, limoneux, compact, pouvant être crevassé, fond de mare;
 Boi blé - Sol Boi avec nombreuses taches ocres, ferrugineuses, généralement fond de mare ou de marigot;
 Boi fing - Sol noir, limono-argileux, généralement friable en surface, riche en humus, non crevassé.
 Une description plus détaillée peut être trouvée chez Dabin (1951) et Toujan (1980).

Une nouvelle prospection pédologique est actuellement en cours, qui est décrite dans l'annexe II.

Le projet BEAU (1981) a donné la répartition des différentes types de sol (tableau I-4).

Tableau I-4: La répartition des superficies (en %) par type de sol à l'intérieur de la zone de Niono et pour l'Office du Niger

Zone	Superficie aménagée (ha)		Superficie de l'inventaire des sols par BEAU (ha)					
Niono	10.375		8.868					
O.N.	53.647		44.003					
Répartition des superficies par type de sol (%)								
	Séno+ Séno fing	Danga	Danga fin	Danga blé	Dian	Dian perré +D. Moursi	Moursi	Boi+ Boi fin
Niono	12	24	15	5	25	2	15	2
O.N.	6	17	27	11	25	1	10	1

II APERÇU GENERAL SUR LA SALINISATION ET L'ALCALI(NI)SATION

2.1 Les phénomènes de salinisation et d'alcali(ni)sation

2.1.1 La salinisation

La salinisation est l'accumulation des sels solubles dans la solution du sol et éventuellement la précipitation des sels de cette solution (Bolt et Bruggenwert, 1978).

On mesure la salinité d'un sol par la conductivité électrique d'une solution de ce sol (en mmho/cm ou en dS/m à 25°C). Pour un grand nombre des cultures la tolérance à la salinisation est déterminée et exprimée en mmho/cm pour la conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée du sol (-ECe). La détermination de l'ECe est une analyse laborieuse, la raison pour laquelle elle est souvent remplacée par la détermination de l'EC des solutions plus diluées (EC1:1, EC1:2, EC1:2,5 ou EC1:5). Ces valeurs peuvent être transformés en valeurs pour l'ECe. (voire fig. II-1)

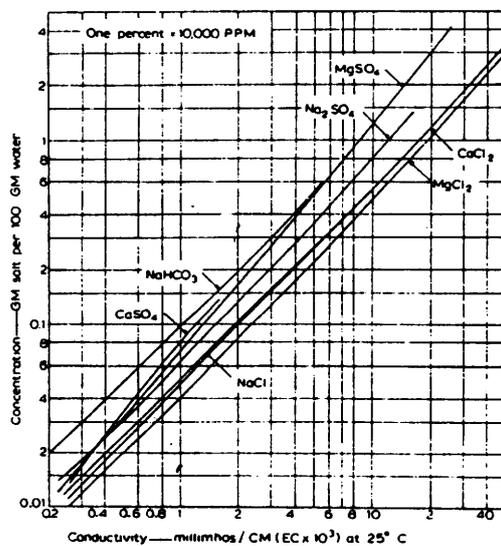


Fig. II-1: La concentration (en pourcentage) des solutions de sel en relation avec l'ECe.

(USDA Handbook no. 60, 1954)

Tableau II-1 donne une impression des effets de la salinisation sur les rendements des cultures différentes.



Tableau II-1: Les effets de la salinisation

ECe (mmho/cm)	les effets sur la culture
0	les effets sont négligeables
2	les rendements des cultures les plus sensibles peuvent diminuer
4	les rendements de beaucoup des cultures diminuent
8	seulement les cultures les plus tolérantes donnent un rendement satisfaisant
16	peu de cultures très tolérantes donnent un rendement satisfaisant

(USDA Handbook no.60, 1954)

Les sols affectés par la salinisation posent des problèmes aux cultures pour absorber de l'eau. Les plantes absorbent l'eau par osmose. Cette absorption est conditionnée par la différence de la pression osmotique de leur sève et de la solution de sol. La plante prendra ses aliments dans la solution qui se concentre. A un moment donné, la plante aura une pression osmotique équivalente à celle de la solution et ne pourra plus absorber de l'eau. On voit les plantes flétrir, sécher ou brûler comme il y a un manque d'eau dans le sol. En dehors de ça un taux d'ions défavorables peut avoir un effet négatif sur la nutrition de la plante. Dans un sol salin souvent le sodium a une position dominante et peut contrecarrer l'absorption des autres cations. A côté de cela il existe encore un effet toxique qui peut se poser quand on trouve de boron ou une grande concentration de chlorure dans le sol.

2.1.2 L'alcalinisation

L'alcalinisation est l'augmentation du pH du sol.

Pour estimer le degré d'alcalinisation on mesure le pH de l'extrait de la pâte saturée. Dans les grandes lignes, selon son pH la réaction du sol est:

pH < 6,5: acide;
6,5 < pH < 7,0: neutre;
7,0 < pH : alcaline.

Bien que pour la salinisation, aussi pour l'alcalinisation l'effet de ce phénomène dépendra fort de la culture cultivée.

L'augmentation du pH peut être un frein à la disponibilité et à l'assimilabilité de certains éléments (Zn, P, N) et peut entraîner une carence. Un pH élevé peut aussi provoquer une dispersion de la matière organique. Cette matière organique, solubilisée dans la solution du sol peut être déposée à la surface par l'évaporation et la remontée capillaire. Ce processus fait montrer des 'salants noirs' à la surface. Cette dispersion de la matière organique en combinaison avec la dispersion des argiles, aussi causée par un pH élevé, peut être la source d'une déstructuration du sol.

2.1.3 La sodisation ou alcalisation

Ce phénomène est l'augmentation graduelle d'une fixation de sodium sur le complexe absorbant du sol.

Cette fixation de sodium dépend de deux facteurs: d'une part de l'apport des quantités de sodium d'ailleurs et d'autre part de la

capacité du sol d'absorber le sodium. On mesure la sodisation par le pourcentage de sodium échangeable, ESP (= exchangeable sodium percentage) par rapport à la capacité d'échange de cations (CEC).

$ESP = 100 * \text{sodium échangeable (en meq/l)} / \text{CEC (en meq/l)}$.

Si cette valeur est supérieure à 15%, on parle d'un sol sodique. Il existe une relation entre l'ESP d'un sol en équilibre avec sa solution et le SAR (sodium absorption ratio) de l'extrait de la pâte saturée:

$SAR = Na^+ / \sqrt{(Ca^{2+} + Mg^{2+})/2}$ les teneurs sont exprimées en meq/l de la solution de sol

$ESP / 100 - ESP = Kg * Na^+ / \sqrt{(Ca^{2+} + Mg^{2+}) / 2}$ mol/l
 $ESP / 100 - ESP = 1 / 2 \sqrt{1000} * SAR$ meq/l si le Kg = 0,5 (mol/l)^{1/2}

Le Kg est un coefficient qui dépend du type des anions dans le système de réaction (Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺) et du type d'argile qu'on trouve dans le sol (illite). Cette équation peut être élaborée vers:

$ESP = 100 (-0,0126 + 0,01475 SAR) / (1 + (-0,0126 + 0,01475 SAR))$
 (USDA Handbook no. 60, 1954)

Un taux élevé de sodium échangeable a comme effet une dispersion des agrégats, ce qui conduit à une réduction de la perméabilité et de la porosité et à un tassement de sol. Pour la plupart des sols la stabilité structurale disparaît complètement à un ESP de 15%. Ce risque de déstructuration augmente avec le taux d'argile. Ces effets donnent des difficultés pour l'agriculture, surtout au labour, à la germination et à l'enracinement des plantes. A la différence de la salinisation et de l'alcalinisation ou la gravité des effets dépend de la nature de la culture, celle de la sodisation par contre en dépend moins.

2.1.4 Sodisation en relation avec salinisation et alcalinisation

La sodisation peut être causée par la salinisation de la manière suivante. La sodisation se montre quand le sol rencontre une solution qui a une grande valeur de SAR (= $Na^+ / \sqrt{(Ca^{2+} + Mg^{2+})/2}$), c'est-à-dire les concentrations d'anions de sodium sont plus élevées que les concentrations d'anions de calcium et de magnésium. Quand une solution contenant de sodium, de calcium et de magnésium est concentrée (comme dans le processus de salinisation) avec un facteur x, le SAR augmente avec le facteur \sqrt{x} . Donc, dans les zones arides où la salinisation peut être causée par la concentration de cette solution de sol par une forte évapotranspiration, ce processus amène aussi la sodisation. Aussi l'alcalinisation peut avoir son influence, parce que si le pH est déjà élevé (pH > 8) la solubilité de Ca-carbonates diminue encore et fait monter le SAR. Ce processus de sodisation a surtout place quand les anions dans la solution sont des sulphates, parce que CaSO₄ a une solubilité limitée, mais le Na₂SO₄ est très soluble. (Bolt et Bruggenwert, 1978)

La salinisation peut aussi s'accompagner d'une augmentation de pHeau (une alcalinité plus élevée) par une quantité plus élevée d'anions HCO₃⁻ ou CO₃⁻⁻. Si ces anions sont provenus des carbonates et bicarbonates du sodium dans la solution du sol, les cations Na⁺ auront été pris par le complexe absorbant, ce qui a amené la sodicité. Une terre qui a perdu sa fertilité par ce processus d'alcalinisation et de sodisation peut se corriger par un apport de gypse (CaSO₄) qui élimine le carbonate et le bicarbonate de la solution, tandis que le sodium adsorbé par le sol est repoussé et remplacé par le calcium (M. Coulibaly, 1989).

Au même temps un lessivage peut être nécessaire pour éviter une augmentation trop grande de l'EC.

2.2 Histoire et évaluations des phénomènes

Pendant la longue histoire de l'Office du Niger on a toujours négligé et sous-estimé les phénomènes de salinisation, d'alcalinisation et de sodisation, malgré les maintes observations de dégradation de sol causée par ces phénomènes.

Déjà pendant les années cinquantes des études ont été faites sur l'alcalinité et la sodicité (ou alcalité) par B. Dabin (1951). Il a remarqué un caractère sodique sur quelques sols, où il a trouvé que le rapport Na/Ca était élevé. Aux alentours de Niono et de Kokry il a signalé des 'salants noirs'. Après ses observations rien a été fait concernant les problèmes d'alcali(ni)té.

C'était seulement en 1980 (la mission de Toujan) qu'on a voulu étudier l'évolution des sols après quelques dizaines d'années d'irrigation. En comparant ces études avec les observations faites par Dabin en 1951, Toujan a trouvé que:

- le pH a augmenté d'une unité;
- l'apparition des 'salants noirs' a progressé;
- le sodium échangeable a souvent triplé.

Toujan a conclu que les terres de l'Office du Niger ont une tendance vers l'alcali(ni)té. Cette alcali(ni)sation est, selon lui, provoquée par la concentration progressive du sodium échangeable de l'eau d'irrigation. Les 'salants noirs' sont expliqués par Toujan comme la matière organique qui a été rassemblée à la surface après sa dispersion, due à l'alcalinité sodique.

C'était à partir des années 1984-1985 qu'on a commencé à sentir un véritable intérêt pour ces problèmes avec les travaux de C. van Diepen (1984) et de R. Bertrand (1985). Tous les deux ont confirmé que les terres de l'Office du Niger ont une tendance à l'alcalinisation, provoquée par l'eau d'irrigation contenant des carbonates de sodium (NaHCO_3). Van Diepen a conclu que la plupart des terres ne semble que très légèrement affectée. Bertrand (1985) par contre, a tiré la conclusion que les sols irrigués se dégradent rapidement par la sodisation et l'alcalinisation. Mais concernant la salinisation, ils ont observé que cela n'est pas encore un phénomène très important dans les sols de l'Office du Niger.

Après ces observation alarmantes chaque année il y a des études qui suivent la dégradation des terres à l'issu des enquêtes en milieu paysan. Une de ces études a été faite par Dembelé en 1986. Dembelé a montré par son étude que le phénomène de la remontée saline existe. Par 212 échantillons, prélevés dans la zone de Niono il a trouvé:

- 42% des sols sont en cours d'alcalinisation mais non salées;
- 24% des sols sont en cours d'alcalinisation et en début de salinisation;
- 14% des sols sont alcalins et en début de salinisation.

N. Coulibaly (1987) a fait une recherche dans la même zone avec les mêmes objectifs. Ses résultats étaient:

- 32% des sols sont en cours d'alcalinisation mais non salées;
- 5% des sols sont non alcalins et en début de salinisation;
- 18% des sols sont en cours d'alcalinisation et en début de salinisation;
- 9% des sols sont alcalins et en début de salinisation.

Il faut noter qu'il s'agit ici des recherches dans la même zone mais dans des parties différentes. Sanago (1988), qui a fait une synthèse de ces deux études, a noté que les sols sont en cours d'alcalinisation (58%) ou carrément alcalins (13,5%) et que la sodisation est moins poussée (36% des sols en cours de sodisation et 1,5% très sodique). Sur l'ensemble 75% est affecté, soit par la sodicité, soit par l'alcalinité, soit par les deux; 25% seulement est indemne.

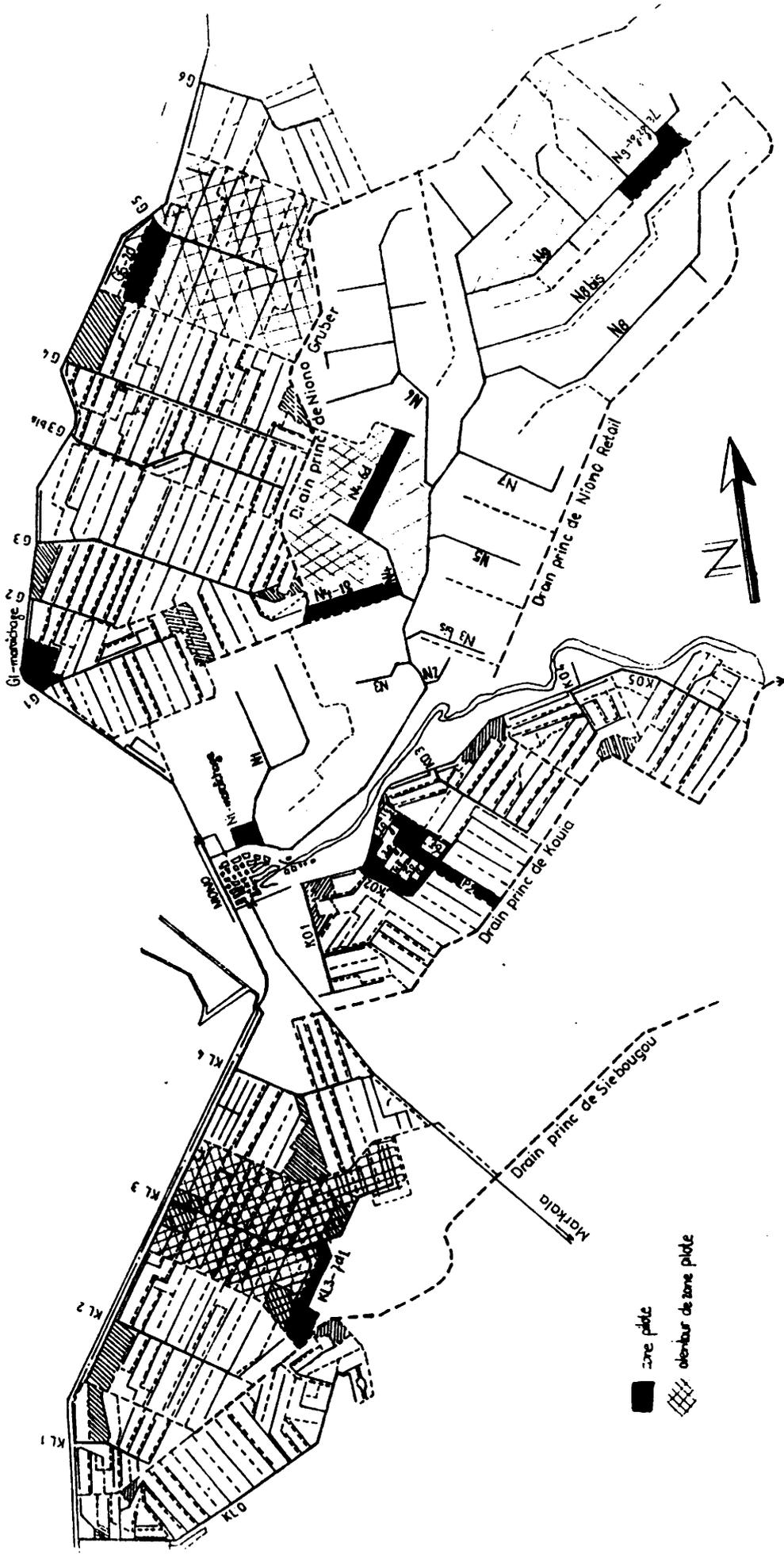
En 1988 M. Coulibaly a fait une étude pour trouver une relation entre la dégradation des terres et la répartition en différents types de sol. Selon les résultats, les sols de type Moursi ont les valeurs moyennes les plus élevées de pH et d'EC. Les Sèno présentent l'ESP moyen le plus élevé, suivis des Moursi. En dehors de ces études de gravité des phénomènes de salinisation, d'alcalinisation et de sodisation, N'Diaye (1987) a fait une étude géochimique pour chercher l'origine des sels. Il a suivi les deux hypothèses faites par Bertrand (1985) sur les causes possibles des processus d'alcali(ni)sation/salinisation. Les hypothèses sont les suivantes:

- 1 - mauvaise qualité chimique des eaux du Niger;
- 2 - remontée de la nappe phréatique alcalinisée au contact de couches profondes du sol chargées en Na⁺.

A la suite de cette étude, N'Diaye a rejeté l'hypothèse d'une origine géologique des sels. Il a montré que l'eau de la nappe phréatique dérive des eaux d'irrigation par concentration, ce qui met en faveur l'hypothèse 2.

Fig III-1

La situation des zones pilotes dans la zone de NIONO



III LA RECHERCHE

3.1 Choix des zones pilotes

Les études faites ont été conduites suivant la méthodologie consignée dans le rapport de mission de W.F. van Driel (1989), comme décrite dans l'annexe I.

Pour l'identification et le suivi des phénomènes de salinisation/alcali(ni)sation on a choisi des zones pilotes, étant des unités tertiaires (niveau arroseur). On prend aussi ses alentours, les unités secondaires (niveau partiteur), en considération. Pour la sélection des zones pilotes on a considéré les facteurs suivants:

- l'importance des effets des phénomènes de salinisation/alcali(ni)sation en utilisant l'expérience des paysans et des projets et en regardant les taches noires et blanches;
- le type de sol (afin que les types de sol les plus importants seront tous représentés);
- si une zone a été réaménagée ou non et de quelle manière le réaménagement a été fait (pour estimer l'effet du réaménagement sur la salinisation, l'alcalinisation et la sodisation);
- si le paysan fait la double-culture ou non (afin de voir l'effet de la double-culture sur la salinisation, l'alcalinisation et la sodisation).

8 zones pilotes ont été sélectionnées. Elles se situent toutes dans la zone de Niono, dans les 2 secteurs. On a choisi les zones dans les surfaces des partiteurs de N9, N4 (1g et 6d), KL3, G5 et KO2 (en riziculture) et de N1 et G1 (en culture maraichère). (voire le figure III-1 pour une vue générale de la situation dans la zone de Niono)

Description des zones pilotes (quelques observations sont aussi notées par zone dans le tableau IV-1):

N9: c'est une zone très affectée avec un sol Moursi (argile lourd). On a observé des taches noires. La zone n'a pas été réaménagée et on ne fait pas de double-culture;

N4-1g: c'est une zone affectée avec un sol Danga/Dian (argile limoneux). On a observé des taches noires. La zone a été réaménagée par le projet Retail. On ne fait pas de double-culture;

KL3: c'est une zone affectée avec un sol Danga/Séno (limon sableux). On a observé des taches noires. La zone a été réaménagée par l'ARPON (sans planage). On ne fait pas la double-culture;

G5: c'est une zone affectée avec un sol Moursi/Dian (argile lourd). On a observé des taches noires. La zone n'a pas été réaménagée et on ne fait pas la double-culture;

N1: c'est une zone affectée en culture maraichère. Le sol est du type Danga/Dian (limon sableux). On a observé des taches noires. La zone a été réaménagée par le projet Retail;

G1: c'est une zone très affectée en culture maraichère en non-réaménagée. Le sol est du type Séno-Danga (limono-sableux). On a observé des taches noires et blanches;

KO2: c'est une zone supplémentaire non-affectée qui a été ajoutée parce que le réaménagement y a passé l'année dernière (du projet ARPON). On n'a pas observé des taches. Le sol est du type Danga (limon). On ne fait pas la double-culture. Cette zone sera étudiée moins détaillée;

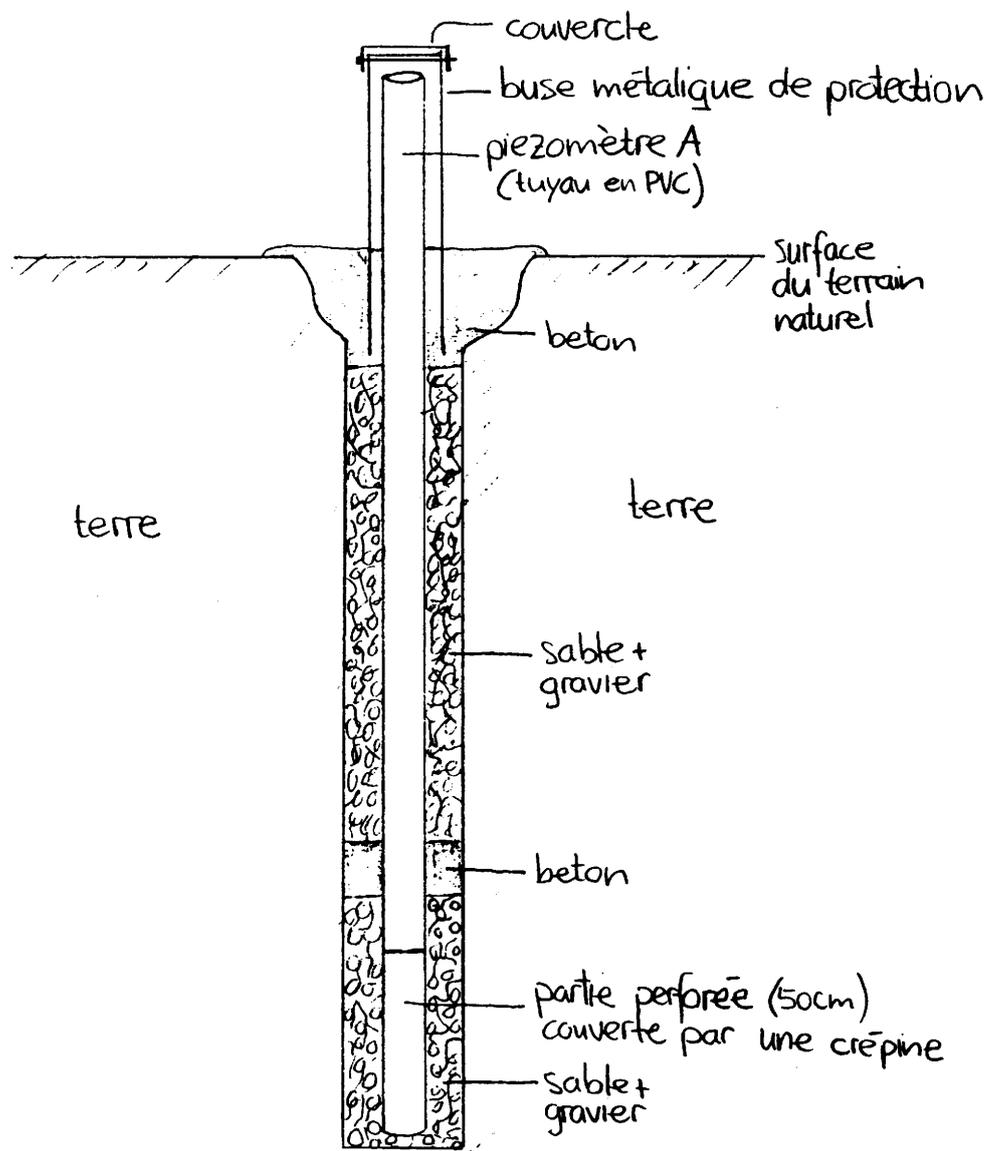


Fig III-2 : Dessin de piezomètre A

N4-6d: c'est une zone qui a été ajoutée plus tard à la demande du projet Retail. On n'a pas observé des taches, mais on a remarqué une baisse des rendements subite. Le sol est du type Danga (limon). Le projet Retail y a fait le réaménagement. On y fait la double-culture.

Dans ces zones on a effectué les études comme elles sont proposées dans l'annexe I. Dans les paragraphes suivants on trouve la description de ces études en détail.

3.2 L'étude hydrologique

3.2.1 Objectifs

Les sels sont apportés par les eaux d'irrigation (voire paragraphe 2.2) et enlevés éventuellement par les eaux de drainage. Tous les transports des sels suivent les mouvements d'eau. Pour cette raison, nous voulons connaître les quantités des eaux (d'irrigation, de drainage, de pluie) et les mouvements d'eaux souterraines. Nous sommes intéressés aussi à la remontée de la nappe en dehors des zones irriguées.

3.2.2 Méthodologie

L'irrigation a été suivie là où ça peut être mesuré (dans les zones aménagées du Retail, le N4-1g et le N4-6d) (voire annexe III). Ailleurs on a fait seulement des observations qualitatives sur le réseau d'irrigation.

Un suivi quantitatif du drainage n'était pas possible. Le réseau de drainage n'est pas construit et équipé d'une manière que les débits peuvent être mesurés facilement. Pour le réseau de drainage on a fait des observations qualitatives.

Pour la pluviométrie on s'est servi des mesures pluviométriques faites le plus proche des sites (voire annexe IV).

Afin de suivre les mouvements des eaux souterraines, on a installé des piezomètres dans chaque zone pilote. Figure III-2 montre un tel piezomètre.

Généralement on a suivi l'idée de faire une série de piezomètres entre le partiteur et le grand drain et une petite série entre l'arroseur et le petit drain, suivant un dispositif en T.

Ainsi on peut trouver les gradients éventuels dans la nappe phréatique entre les canaux d'irrigation et les canaux de drainage. Aussi on peut suivre la vitesse de la remontée de la nappe avec la pluie et l'irrigation et la baisse après. Dans les canaux d'irrigation et de drainage dans la zone, des échelles ont été installées pour suivre l'influence des niveaux d'eau dans ces canaux sur le mouvement de la nappe phréatique.

Les piezomètres sont installés en couples, un piezomètre d'une profondeur de 3m (A) et un piezomètre d'une profondeur de 1,5m (B). Par la différence entre les niveaux d'eau dans les deux piezomètres, c'est-à-dire la différence entre les pressions d'eau aux profondeurs différentes, on peut connaître les mouvements verticaux sur place.

Les plans des zones et les sites des piezomètres se trouvent dans l'annexe V.

La fréquence des mesures du niveau d'eau dans la piezomètre dépend de la variation attendue. Au début de la saison culturale avec les premières pluies et irrigations on a mesuré 2 ou 3 fois par semaine. Graduellement on a diminué la fréquence jusqu'à 2 fois par mois. Par des mesures topographiques on a obtenu les

niveaux de référence des sommets des piezomètres. Au même temps le profil transversal de la surface suivant le série des piezomètres est fait. Avec les niveaux de référence, les mesures des niveaux d'eau dans les piezomètres peuvent être transformés en niveaux absolus. (voire annexe VI)

Afin de connaître les quantités d'eau du courant horizontal ou vertical, on a besoin de données sur la perméabilité des différents horizons. Nous avons entrepris des testes de perméabilité dans quelques carrés d'observation et là où ça nous semblait utile. (voire tableau III-1)

Une recherche de puits a été entrepris en dehors de la zone irriguée pour connaître le niveau de la nappe. La situation de maintenant a été comparée avec des anciennes cartes, qui montrent les niveaux des années passées. Ainsi nous pouvons connaître l'évolution.

3.2.3 Résultats

A. Irrigation et drainage

Dans ce chapitre nous donnons les mesures (si disponibles) et les observations sur l'irrigation et le drainage en général à l'Office du Niger et par zone.

Pour une bonne compréhension des observations sur la situation de drainage à l'Office de Niger il faut savoir d'abord que c'est très difficile à établir un bon drainage comme l'Office du Niger se trouve dans un delta avec des terres très plates. Aussi dans l'histoire le drainage était négligé comme au début en 1932 la nappe phréatique se trouvait à une profondeur d'au moins 30 mètres et pour cela le drainage n'était pas important. La nappe phréatique montait très vite et maintenant elle se trouve à une profondeur de 1 à 3 mètres à la fin de la saison sèche. Le réseau de drainage qui existe sert à évacuer les eaux de pluies exceptionnelles et pour le drainage superficiel des parcelles après l'irrigation. Il n'est pas capable de faire un drainage profond. La situation topographique (la pente est trop faible) exige que les drains sont prolongés sur une distance de 25 à 30 km en dehors des zones irriguées. Pour un drainage profond, cette distance doit encore être dépassée ou pompage.

Au KL3 les mesures d'irrigation et de drainage manquent. Le niveau d'eau dans l'arrosoir est toujours bas. Les paysans à la fin de l'arrosoir ont des problèmes avec l'irrigation par un manque d'eau dans l'arrosoir. A cause de ça ils sont en retard avec le semis. Leurs champs sont mal planés et les buttes ne peuvent pas être inondées (le manque d'eau est une cause qu'ils n'investissent pas beaucoup dans leur champs). Le drain d'arrosoir ne fonctionne pas bien non plus. Le niveau d'eau y est souvent plus élevé que la nappe phréatique, mais moins élevé que l'eau dans le champs, donc il y a seulement un drainage superficiel. L'eau dans le drain ne s'évacue pas vite. Le drain de partiteur est en bon état.

Au G5 la situation ressemble celle du KL3. La pente de l'arrosoir est trop faible et les paysans y font des barrages pour faire monter l'eau. Par conséquence les paysans à la fin de l'arrosoir reçoivent moins d'eau. La situation du drainage est la même qu'au KL3.

Du N4-1g les chiffres d'irrigation sont disponibles (voire annexe III). Le N4-1g a été réaménagé et le réseau d'irrigation fonctionne bien. Le réseau de drainage ne fonctionne pas bien. Les

parcelles à coté-drain étaient inondées trop longtemps.

Aussi du N4-6d les chiffres d'irrigation sont disponibles (voire annexe III). Le N4-6d a été réaménagé et le réseau d'irrigation fonctionne bien. Le réseau de drainage n'est pas optimal. Le niveau d'eau est trop élevé parce que l'eau stagne dans le drain du partiteur.

Du N9 il n'y a pas des mesures d'irrigation disponibles. Le réseau d'irrigation fonctionne très mal. L'irrigation n'est pas contrôlée. On remplit le partiteur et les paysans prennent comme ils veulent. Il se passe qu'on irrigue du drain. Les arroseurs sont en mauvais état. Le réseau de drainage fonctionne très mal aussi. Le N9 était inondé très longtemps par une couche d'eau qui dépasse 50cm.

Le K02 vient d'être réaménagé l'année passée. Il n'y a pas des données sur l'irrigation, ni sur le drainage. Les réseaux d'irrigation et de drainage sont en bon état.

Le N1, une zone maraîchère, a été réaménagé. Le réseau d'irrigation est en bon état. On irrigue des sous-arroseurs avec une calebasse. Le drain ne fonctionne pas optimal parce que plus en aval il est utilisé comme arroseur (on y met des barrages). Le niveau d'eau dans le drain est toujours élevé. Il n'y a pas des sous-drains. Pendant la campagne de riziculture les parcelles sont inondées, sauf à côté du partiteur et de l'arroseur.

Au G1, une zone maraîchère non-réaménagée, le réseau d'irrigation est en bon état. On irrigue avec une calebasse aussi. Un réseau de drainage manque. Pendant la campagne de riziculture, toutes les parcelles sont inondées. Le G1 se trouve dans un basfond et l'eau n'y sort pas. Le drainage est (presque) nul pendant toute l'année.

Généralement la situation de l'irrigation à l'Office du Niger est médiocre. Il y a des parcelles qui ne reçoivent pas assez d'eau. Sur quelques partiteurs l'irrigation n'est pas contrôlée. Dans les zones réaménagées, le réseau d'irrigation, généralement fonctionne bien.

Dans l'introduction nous avons déjà remarqué qu'un bon drainage est difficile à achever dans l'Office du Niger. On peut dire que partout, sauf dans une partie des zones réaménagées, le réseau de drainage ne fonctionne pas bien ou pas du tout.

B. Pluie

Pour toutes les sites les données pluviométriques sont disponibles (voire annexe IV). On voit que les quantités de pluie sont très variables d'une zone à l'autre, même sur courte distance.

C. Eaux souterraines

Généralement le mouvement de la nappe phréatique est en relation avec l'irrigation cumulative et la pluie (annexe VII donne un exemple). Nous avons trouvé la nappe à la fin de la saison sèche à une profondeur d'environ 3 mètres maximal. Pendant la campagne elle est montée jusqu'à 0,5 mètre en-dessus de la surface, ce qui fait une variation pendant l'année d'environ 3,5 mètres.

Pour pouvoir estimer les mouvements horizontaux, il faut connaître le gradient de la nappe phréatique et la perméabilité du sol. Avec ces données on peut calculer par la loi de Darcy la vitesse du courant d'eau.

La loi de Darcy est:

$$v = K * (H1 - H2) / (X1 - X2)$$

v = la vélocité de l'eau (mm/jour)

K = la conductivité hydraulique ou la perméabilité (m/jour)

$(H1 - H2) / (X1 - X2)$ = le gradient hydraulique de la nappe phréatique

Le gradient hydraulique peut être calculé par les graphiques d'annexe VIII. La perméabilité est mesurée au KL3, au G5 et au G1. Ces perméabilités avec les vélocités des courants d'eau sont montrés dans le tableau III-1.

Tableau III-1: Les courants d'eau aux différentes profondeurs

zone	type de sol	profondeur (m)	perméabilité (m/j)	gradient (%)	courant horizontal (m/j)
KL3	C1 sabl/arg	1,20	38	0,64	0,02
	C2 arg/lim	0-1,00	0,05	0,64	0,000032
	C2 arg	1,40	6,3	0,64	0,004
	C2 sabl	1,75	12,7	0,64	0,008
	C3 sabl/lim	0-0,20	0,10	0,64	0,000064
	C3 sabl/arg	0,20-0,60	0,17	0,64	0,00011
G5	C2 arg	0-... (homogène)	0,15	0,64	0,000096
G1	P1 arg/lim/sabl	0,50-1,00	2,13	0,13	0,00028
	P1 arg	1,00-2,00	0,62	0,13	0,000081
	P2 sabl/arg+ gravier	+3,25	0,64	0,13	0,000083

Les gradients de la nappe sont très faibles, ainsi que les perméabilités, ce qui résulte à une vélocité d'eau horizontale négligeable. En tirant cette conclusion, il faut mettre en question l'estimation de la vélocité d'eau de KL3, C1, qui est extrêmement élevée. Vu les types de sol (et les perméabilités attendues) et les gradients dans les autres zones, nous pensons que la conclusion que le courant d'eau horizontal est négligeable est valable pour toutes les zones. Pour les horizons plus profonds que 3 mètres on n'a pas des données et on n'en peut pas tirer des conclusions. Il n'est pas exclu qu'il y a des aquifers, comme l'Office du Niger se trouve dans une plaine alluviale. Ces aquifers seront être formés comme des lentilles, parce que la plaine alluviale se trouve dans un bassin imperméable, comme montré dans le figure III-3.

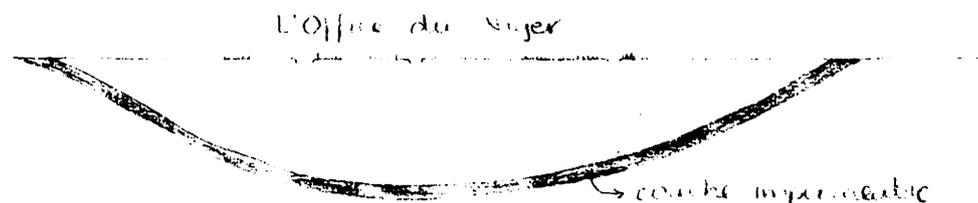


Figure III-3: Situation de l'Office du Niger dans la plaine alluviale

Pour estimer les mouvements verticaux on utilise aussi la loi de Darcy. Le gradient on calcule par la différence en pression d'eau à une profondeur de 3m et de 1,5m, mesurée par la couple de piezomètres (A et B). De cette manière on estime la remontée capillaire (si les piezomètres ont montré un courant en haut) ou la percolation (si les piezomètres ont montré un courant en bas), ce qui est valable quand le sol entre 1,5m et 3m de profondeur est homogène.

Au KL3 sur tous les sites, sauf P8 (qui a un courant en haut), on a trouvé qu'il n'y a pas un gradient vertical. Au G5 tous les piezomètres, sauf P5, montrent un courant en haut jusqu'à environ mi-août. Normalement le gradient est environ $0,05/1,5 = +0,03$. Avec une perméabilité de $0,15\text{m/j}$ la remontée capillaire est 5 mm/j . Après mi-août il y a un courant en bas. Le gradient ne dépasse pas $-0,03/1,5$, ce qui donne une percolation de 3mm/j . Au G1 il y a un courant en haut. Le gradient est $0,02$. La perméabilité dans l'argile est $0,62\text{ m/j}$, ce qui donne une remontée capillaire de $0,01\text{m/j}$. Au N4-1q on trouve des courants en haut à côté drain. A côté partiteur il y a un courant en bas. Au N9 des courants sont en bas. Au N4-6d, N1 et KO2 les courants ne sont pas clairs ou pas connus.

Si on attend que, là où on a mesuré un courant en haut pendant les mois de la recherche de phase I, le courant continue pendant toute l'année, on peut tirer la conclusion avec certain précaution que la salinisation sur ces endroits provient de cette remontée capillaire.

D. La nappe phréatique en dehors de la zone irriguée

Selon les histoires, la nappe phréatique se trouvait avant les aménagements du Kala inférieur, plus profond que 40 mètres. Les ouvriers durant les aménagements et les colons dans les premières années avaient des problèmes sérieux à trouver de l'eau souterraine.

En 1957 la nappe était déjà montée considérablement (voir graphique) et dans les années '80 il paraît que la nappe se trouvait dans une position stable. Ça veut dire que l'eau est près de la surface vers le fala de Molodo et le casier d'irrigation, mais descend rapidement en s'éloignant du fala. A 20 km du fala la nappe ne paraît plus d'être influencée par l'eau d'infiltration du fala et du casier. Figure III-4 montre une coupe transversale de la région avec les nappes phréatiques des différentes années.

- sources :- épaisseur quaternaire: communication personnelle Opération Puits
- C.T. et grès: carte hydrogéologique 1957, échelle 1:100.000
 - nappe 1940: basée sur les histoires (pas mesurée)
 - nappe 1957: carte hydrogéologique 1957
 - nappe 1981: Sogreah, étude de faisabilité N'Debougou, 1982
 - nappe 1989: mesures personnelles

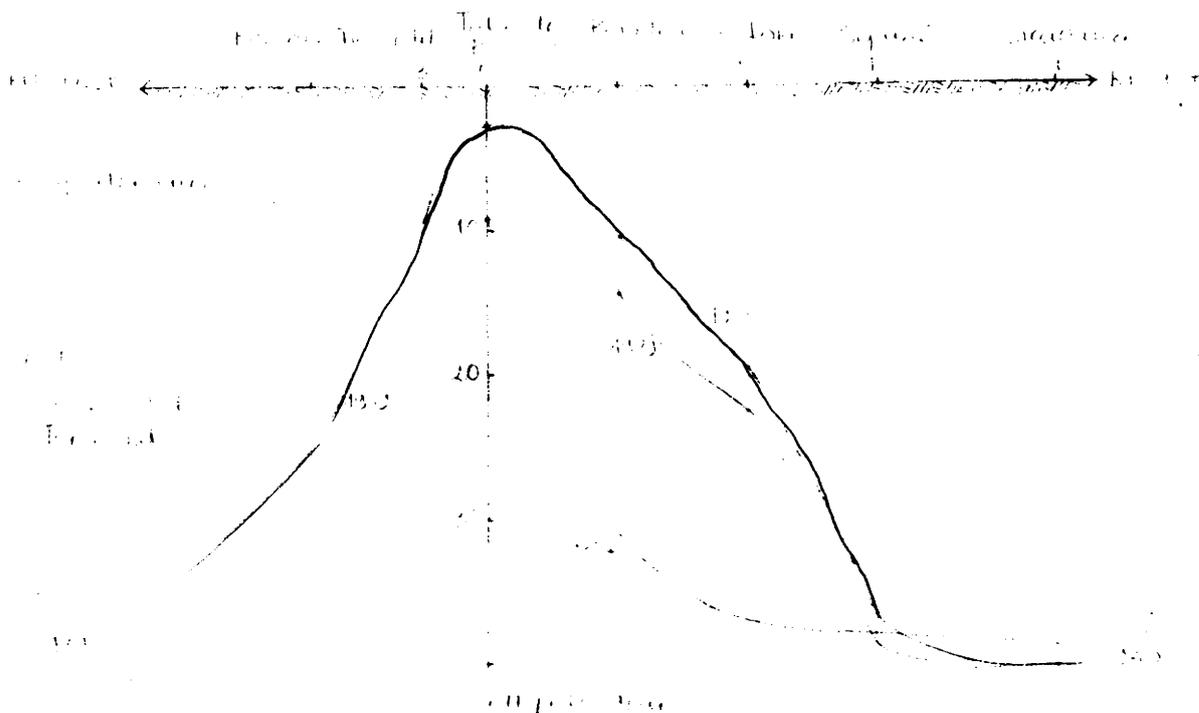


Figure III-4: Coupe transversale avec des nappes phréatiques

3.3 Etude chimique

3.3.1 Objectifs

L'étude chimique sert à connaître les lieux qui sont attaqués par les phénomènes de salinisation, de sodisation et d'alcalinisation et de spécifier par quel(s) phénomène(s) exactement. Aussi nous voulons connaître l'évolution des phénomènes dans le temps et l'espace. Par cette manière nous espérons à comprendre les processus qui se réalisent sur les endroits affectés et des facteurs qui les influencent et peut-être on peut prévoir leur développement. Cette connaissance, ensemble avec une carte sur laquelle sont indiqués les lieux affectés, peut aider dans la lutte contre la salinisation, la sodisation et l'alcalinisation.

3.3.2 Méthodologie

Les études chimiques sont entreprises dans les zones déjà décrites dans le chapitre 3.1. La base est la description pédologique, faite pendant l'installation des piezomètres. Dans cette description on trouve des données sur la couleur, la texture, la présence de nodules calcaires, l'oxyde de fer (décrit comme taches jaunes, oranges ou rouges) et argile réduite (décrite comme A blanche) (annexe IX) et la présence de taches en surface. Les taches donnent une indication sur les phénomènes qui se trouvent sur place. On les remarque le plus clair juste après la saison d'irrigation et surtout sur des élévations dans le terrain. On connaît trois différents types des taches qui indiquent une affectation des phénomènes: les taches blanches, les taches noires et les taches huileuses.

Les taches blanches en croûtes se trouvent sur les sols

salins. (USDA Handbook no.60) Les sels sont transportés en haut par la remontée capillaire et précipitent à la surface. Parmi les taches blanches (en croûtes) on peut rencontrer celles qui consistent purement de carbonate de sodium et autres qui consistent essentiellement des nitrates de sodium, de calcium et de magnésium. (van Driel, 1989)

Les taches noires se trouvent sur les sols alcalins. (USDA Handbook no.60) Souvent le pH des salants noirs est supérieur à 10. Toujan a décrit les salants noirs comme des matières organiques dispersées dues à l'alcalinité sodique et rassemblée à la surface par la remontée capillaire. (Toujan, 1979) Dans les salants noirs on trouve essentiellement des bicarbonates de sodium, accompagnés de 30% des autres anions. (van Driel, 1989) Les taches huileuses sont peu connues. Le sol donne l'impression qu'il est recouvert d'huile. Sa couleur devient un peu plus foncée et le sol semble humide. La terre a un goût salé (comme NaCl). On y trouve un pH neutre et une EC extrêmement élevée. Ce n'est pas sur que les taches huileuses indiquent la sodicité.

Pendant l'installation des piezomètres on a pris également des échantillons de sol pour une analyse chimique complète. On a pris 4 échantillons par site de piezomètre à 0-20cm, 20-40cm, 140cm et 240 cm de profondeur. Au laboratoire de D.R.D. (Division de Recherche-Développement) les échantillons sont analysés sur l'EC et pH, pour avoir une idée sur la salinisation et l'alcalinisation. Une analyse complète est faite par le laboratoire des sols Sotuba qui montre aussi la sodisation par l'ESP (annexe XI). Les analyses de sol montrent la situation au début de la saison culturale. L'évolution pendant la saison est suivie par moyen d'échantillons d'eau qui sont prélevés deux fois par mois des piezomètres (l'eau de la nappe phréatique) et des canaux influents d'irrigation et de drainage de toutes les zones pilotes. On peut douter si l'eau des piezomètres est représentative pour la qualité d'eau de la nappe phréatique, parce qu'on n'a pas eu les moyens de vider les piezomètres avant chaque prélèvement. Au laboratoire de DRD on a fait les analyses d'EC et de pH (annexe XI). Une fois par mois les échantillons sont analysés aussi au laboratoire des sols Sotuba. Là on a déterminé le pH, l'EC et les taux de Ca, Mg, Na et K. De là on a calculé le SAR (annexe XI). Les EC, pH, ESP et SAR sont classifiés selon les classifications suivantes:

EC1:2,5	interprétation
< 0,1	non-salin
0,1 - 0,4	en début salin
0,4 - 1	salin
> 1	très salin

pH	interprétation
> 9	extr. alcalin
8,3 - 9	très alcalin
7,5 - 8,3	moyennement alcalin
7,0 - 7,5	peu alcalin
6,5 - 7,0	neutre
6,0 - 6,5	peu acide
5,2 - 6,0	moyennement acide
4,5 - 5,2	très acide
< 4,5	extr. acide

ESP (%) / SAR (mmol ^{1/2} /litre ^{1/2})	interprétation
< 9 (SAR < 7.5)	non-sodique
9 - 15 (SAR 7.5 - 13)	en début de sodisation
15 - 22 (SAR 13 - 20)	sodique
> 22 (SAR > 20)	très sodique

NB.: la corrélation entre l'ESP et le SAR est seulement valable dans une situation d'équilibre

3.3.3 Résultats

A. Sol

Au KL3 les sols sont du type Danga et Seno. La texture en surface est généralement limono-sableuse (au P8 un peu plus argileuse). En profondeur la texture devient plus sableuse. En surface on trouve beaucoup de salants noirs, parfois des salants blancs. La salinisation en surface est plus grave qu'en profondeur. P8 est une exception parce que c'est salin à 1,40 m et le reste du profil est en début de salinisation. P8 est plus attaqué que la plupart des autres sites au KL3. Sur les buttes la salinisation est plus grave. P13 se trouve sur une butte. C'est salin en surface. Les sites à côté drain sont plus attaqués que les sites à côté partiteur. Généralement le KL3 est non-salée ou en début de salinisation, les buttes sont salines.

L'alcalinité se trouve surtout en profondeur. Normalement le pH monte avec la profondeur. En surface il y a peu de problèmes avec l'alcalinité, sauf au P2, P8 et P13 (donc sur une butte et à côté drain).

La sodicité se manifeste seulement sur la butte de P13. Le reste du KL3 est non-sodique. Peut-être P8 sera sodique dans l'avenir.

Le G5 a des sols du type Moursi ou Dian-Moursi. Les profils sont homogènes, argileux ou limono-argileux. En profondeur on trouve parfois un peu plus de sable. Dans tout le profil il y a des nodules calcaires. En surface on trouve des taches noires et blanches. La salinité en surface et en profondeur sont environ les mêmes: c'est salin ou en début de salinisation.

L'alcalinité se manifeste surtout en profondeur. La surface n'est pas beaucoup attaquée (classifiée comme peu alcalin).

La sodicité n'est pas un problème. Tous les problèmes sont plus graves à côté drain qu'à côté partiteur.

Le sol au N4-1g n'est pas homogène. A côté partiteur les sols sont du type Danga (sablo-limoneux). Il y a une couche d'argile entre 0,5 et 2m. A côté drain le sol est du type Moursi ou Dian (argileux ou limono-argileux) avec des nodules calcaires. En profondeur il y a plus de sable. On trouve des salants noirs. Les profils sont généralement en début de salinisation. A côté partiteur c'est salin. La variation d'EC entre la surface et la profondeur n'est pas grande.

A côté partiteur les problèmes d'alcalinité sont graves. De ce côté les sols sont très attaqués par la sodicité aussi. Les P6, P8 et P10 sont très attaqués par la salinité, l'alcalinité et la sodicité. P10 se trouve sur une butte.

Le sol au N4-6d est du type Danga ou Dian, en surface argileux ou sablo-limoneux, en profondeur plus sableuse. Les analyses montrent qu'il n'y a presque pas des problèmes de salinisation ou

d'alcalinisation. Parfois c'est en début de salinisation et moyennement alcalin à une profondeur de 2,40 m. Deux sites sont en début de sodisation, un site est sodique en profondeur.

Les sols au N9 étaient classifiés comme Moursi ou Dian-Moursi mais la texture, selon les analyses de Sotuba, n'est pas tellement argileuse. En surface elle est limono-sableuse. Vers le drain elle est un peu plus argileuse. En profondeur elle est limono-argilo-sableuse. En surface il y a peu de salants noirs et beaucoup de salants blancs. Généralement les sols au N9 sont en début de salinisation ou salin. Les différences entre la surface et la profondeur ne sont pas grandes. Sauf P5 qui est plus salin en profondeur qu'en surface.

L'alcalinité au N9 est très variable. P1 est très alcalin. P3, P4 et P8 par contre, sont très acides. P6, P7 et P9 sont moyennement acides. En profondeur quand même, presque tous les sites sont moyennement ou extrêmement alcalins. L'alcalinité augmente avec la profondeur. Peut-être l'acidité est à cause de matière organique, provenant des grandes inondations sur le N9 chaque année.

On trouve la sodicité au P4 et P2. Pour le P2 tout le profil est sodique. P4 et P9 sont en début de sodisation.

Le sol au K02 est du type Danga, limoneux ou sablo-limoneux en surface. Le taux d'argile augmente avec la profondeur mais après 1,5 ou 2 mètres ça devient de nouveau sableux. Il n'y a pas beaucoup de taches. Les sols sont non-salés sauf au P5 où ils sont en début de salinisation. En surface on ne trouve pas d'alcalinité mais en profondeur quelques sites sont très alcalins. Le pH augmente avec la profondeur.

La sodicité est le seul problème au K02. P5, P7 et P10 sont sodiques. Pour le P5 tout le profil est sodique, pour P7 et P10 on trouve la sodicité en surface. P1 et P2 sont en début de sodisation.

Au N1 les sols sont du type Danga et du type Dian. A côté d'arroseur les sols sont sablo-limoneux, à côté drain les sols sont argileux. En profondeur on peut trouver tout: argiles sous les Danga, sables sous les Dian. En surface on trouve parfois peu de salants blancs. Les sols sont en début de salinisation ou salin. Généralement la salinité se trouve en surface.

L'alcalinité se trouve surtout en profondeur mais P2 et P6 sont très alcalins dans tout le profil.

Presque tous les profils sont sodiques en surface (sauf P7).

Les profils du G1 sont très variables. Il y a des profils qui sont argileux, il y en a qui sont sablo-limoneux. En profondeur on trouve presque partout de sable. Il y a beaucoup de taches blanches, noires et huileuses. Tous les sols au G1 sont attaqués par au moins un des trois phénomènes de salinisation, d'alcalinisation et de sodisation. Tous les sols sont salins ou très salins. L'alcalinité se manifeste dans presque tous les profils (sauf P8) en surface ou en profondeur ou dans tout le profil. Tous les sols sont sodiques ou en début de sodisation. Surtout les buttes sont attaquées.

B. Evolution des phénomènes

Avec l'aide des échantillons d'eau (pris des piezomètres et des

canaux d'irrigation et de drainage) nous suivons l'évolution des phénomènes dans le temps. On suppose que le sol est en balance avec la solution de sol et on peut supposer que la composition ionique est un reflet de la composition ionique du sol. Nous supposons que le premier échantillon d'eau est un reflet du sol au début de la saison culturale. Les échantillons d'eau des piezomètres A représentent les couches de sol entre 2,5 et 3 m. Les échantillons des piezomètres B représentent les couches de sol entre 1 et 1,5m.

Ici nous parlons surtout de l'évolution dans le temps. Les processus de salinisation, de sodisation et d'alcalinisation sont trop lent pour noter une évolution dans l'espace dès maintenant.

La qualité d'eau d'irrigation est suivie aussi. Dans le passé différents auteurs ont déjà donné leur opinion sur la qualité d'eau d'irrigation. Nous donnons leurs opinions d'abord avec notre commentaire. Après nous continuons avec nos résultats de recherche sur la qualité des eaux site par site.

En général les différents auteurs ont constaté que l'eau d'irrigation, venant du Niger a une bonne qualité. La composition ionique de l'eau d'irrigation est montrée en tableau III-2.

Tableau III-2: La composition ionique de l'eau d'irrigation (Niger) (N'Diaye, 1987)

Na+ (meq/l)	Ca ²⁺ /Mg ²⁺ (meq/l)	HCO ₃ ⁻ (meq/l)	EC (mmho/cm)	SAR (mmol ^{1/2} /l ^{1/2})	RSC (meq/l)
0,13	0,27	0,44	0,036	0,35	0,17

RSC = l'alcalinité résiduelle (residual sodium carbonate meq/l), en formule: RSC = concentration HCO₃⁻ - concentration Ca²⁺/Mg²⁺
Le tableau III-3 peut servir pour une orientation sur la qualité d'eau pour irrigation.

Tableau III-3: Classification des eaux d'irrigation (Bolt et Bruggenwerth, 1978, selon USDA handbook no. 60)

EC mmho/cm	0,25	0,75	2,25
péril de salinisation: bas	mediocre	elevé	
SAR mmol ^{1/2} /l ^{1/2}	7	13	20
péril d'alcalinisation: bas	mediocre	elevé	
RSC meq/l	1,25	2,5	
péril d'alcalinisation: bas	mediocre	elevé	
Classification:	sans péril	mariginal	inutilisable

Selon cette classification les eaux du Niger sont sans péril. Mais en combinaison avec le mauvais drainage, comme on a observé dans le chapitre précédent, on trouve que les eaux souterraines deviennent de plus en plus concentrées en sels. Avec l'évapotranspiration pendant la saison sèche les sels montent jusqu'en surface et causent des problèmes pour la culture de la prochaine année. L'effet de la concentration sur la composition ionique de l'eau est montré par van Driel (1989).

Tableau III-3: L'effet de la concentration sur la composition ionique de l'eau d'irrigation

	Na ⁺ meq/l	Ca ²⁺ +Mg ²⁺ meq/l	HCO ₃ ⁻ meq/l	CE mmho/cm	SAR
eau d'irrigation	0.13	0.27	0.44	0.036	0.35
10x concentrée					
avant précipitation	1.3	2.7	4.4		
après préc. 0.01 atm	1.3	2.7	4.4	0.36	1.12
après préc. 0.05 atm	1.3	2.7	4.4	0.36	1.12
20x concentrée					
avant précipitation	2.6	5.4	8.8		
après préc. 0.01 atm	2.6	2.1	5.5	0.45	2.54
après préc. 0.05 atm	2.6	4.6	8.0	0.66	1.71
40x concentrée					
avant précipitation	5.2	10.8	17.6		
après préc. 0.01 atm	5.2	1.3	8.1	0.68	6.45
après préc. 0.05 atm	5.2	3.6	10.4	0.87	3.88
100x concentrée					
avant précipitation	13	27	44		
après préc. 0.01 atm	13	0.4	17.4	1.45	28.7
après préc. 0.05 atm	13	1.7	18.7	1.55	14.1

Comme montrée dans ce tableau, cette concentration de l'eau d'irrigation amène la salinisation (l'EC monte beaucoup) et l'alcalinisation (le rapport HCO₃⁻/Ca²⁺ et Mg²⁺ monte beaucoup donc le pH va monter) Cette concentration amène aussi la sodisation. Quand l'eau d'irrigation contient de (bi-)carbonate (comme l'eau du Niger), CaCO₃ et MgCO₃ vont précipiter et par conséquence le rapport Na⁺/Ca²⁺ et Mg²⁺ et le ESP augmentent.

Les eaux au KL3 ne sont pas salines, sauf au P8. Ça correspond bien avec les analyses de sol. Pendant la saison culturale il y a des montes et des baisses d'EC, mais généralement la tendance est vers la baisse ou la stabilité. P3 est une exception: pour le A et le B les EC montent. Les eaux des canaux d'irrigation sont bonnes et améliorent pendant la saison. Les eaux des drains sont plus salines mais leurs EC n'arrivent jamais à 0,2 mmho/cm.

Les pH des eaux des piezomètres au début de la saison sont alcalins sans exception. Pendant la saison tous les pH baissent vers la neutralité. Quelques eaux restent peu alcalines. L'eau de P8 reste moyennement alcaline.

Les SAR sont souvent assez faibles. Souvent même tellement faible que l'ESP qu'on calcule par le SAR, est négatif. Les SAR du P8 et P13 sont montés, mais restent sous 7,5 mmol^{1/2}/l^{1/2}.

Les EC au G5 sont un peu élevées. L'évolution pendant le temps n'est pas spectaculaire. Les montes et les baisses ne sont pas grandes, sauf pour P8B où l'EC est presque doublé (de 1,1 à 2,1 mmho/cm). Les eaux des canaux d'irrigation ne sont pas de la même bonne qualité comme on trouve souvent à l'Office du Niger. Parfois l'eau de l'arroseur est même plus saline que l'eau du petit drain.

Quand même la qualité d'eau d'irrigation est améliorée pendant la saison.

Les pH au début étaient très élevés (classe très alcalin). Pendant la saison tous les pH sont baissés avec 1 à 1,5 unité. Vers la fin tous les pH se trouvaient dans la classe peu alcalin ou moyennement alcalin. Les eaux d'irrigation et de drainage sont améliorées de la même manière concernant le pH.

Le SAR est augmenté beaucoup, souvent même doublé. Mais l'ESP calculé reste sous la limite de 9%.

Les EC au N4-1g sont variables et représentent à peu près les analyses de sol. A côté drain les EC sont basses. A côté partiteur les EC sont hautes. Les piezomètres juste à côté du drain ont une EC stable. Les autres EC montent mais pas beaucoup (sauf P8B qui monte de 2,1 à 3,5 mmho/cm). Les eaux d'irrigation sont bonnes. Les eaux de drainage ne sont pas très salées.

Les pH à côté partiteur étaient moyennement ou très alcalins au début de la saison. A côté drain les pH étaient peu alcalins. Pendant la saison tout est baissé, la plupart vers la neutralité. P8 n'est pas amélioré beaucoup.

Les SAR sont un peu faibles mais pendant la saison ils sont montés un peu. Seulement au P8B l'ESP calculé arrivait à une valeur de 9.3%.

Les EC au N4-6d sont faibles et stables. La qualité des eaux d'irrigation est bonne et augmente pendant la saison. Les eaux des drains ne sont pas salines. Souvent ça n'arrive même pas à 0,1 mmho/cm.

Les pH sont peu ou moyennement alcalins au début et peu alcalin ou neutre vers la fin de la saison culturale. Les eaux d'irrigation sont peu ou moyennement alcalines. Les drains sont moins alcalins.

Les SAR sont très faibles et baissent.

Toutes les eaux au N9 sont salines, surtout les eaux de P2, P3 et P5. P5 était surtout salin en profondeur et les échantillons d'eau montrent ça très bien. Les EC de P5A sont les doubles des EC de P5B. Pendant la saison les EC montent ou sont stables. Les eaux d'irrigation (arroiseur) sont d'une mauvaise qualité (0,3 mmho/cm) comparées avec l'eau du drain (0,1 mmho/cm). Peut-être le drain fonctionne comme arroseur et l'arroiseur fonctionne comme drain.

Les pH sont très variables au début de la saison culturale. On trouve des eaux acides et des eaux alcalines. A la fin de la saison tous les pH sont peu alcalins. Les pH des eaux d'irrigation sont bons.

Les SAR sont faibles et baissent.

Au K02 les EC sont basses, sauf au P1 et P5, conformément les résultats des analyses de sol. Presque tous les EC baissent ou sont stables sauf celle du P4 qui est monté de 0,3 à 0,8 mmho/cm. Les eaux d'irrigation sont bonnes et améliorent pendant la saison. Les eaux des drains ne sont pas très salines.

Les pH au début de la saison étaient moyennement ou très alcalins. Vers la fin de la saison tout est baissé vers la neutralité ou faible alcalinité. P5 reste moyennement alcalin. Les eaux d'irrigation et de drainage montrent la même évolution.

Les SAR sont très faibles et constants.

Les EC au N1 sont assez faibles. Ça correspond avec les analyses de sol parce que la salinité se trouvait surtout en surface. Pendant le temps les EC sont constantes. Les EC de l'arroseur sont un peu élevées mais on n'a pas irrigué comme la saison de maraichage n'était pas en cours. L'eau du drain est presque de la même qualité que l'eau de l'arroseur.

Les pH des eaux ne sont pas très élevés et presque constants pendant la saison de riziculture. On peut noter une baisse faible.

Les SAR sont faibles et montent un peu.

Les EC au G1 sont très élevées et reflètent bien les analyses de sol. Quelques piezomètres profonds (P1A, P5A, P6A et P8A) sont installés dans la couche de sable qui se trouve en profondeur. Ces piezomètres montrent la même EC et donnent l'impression d'être installés dans un aquifer. L'évolution des EC n'est pas très clair. Dans quelques piezomètres ça monte, dans autres ça baisse ou reste constant. P9B montre une grande chute en EC en novembre mais en surface il n'y a aucune amélioration visible. Une connection entre P9B et la mare, qui se trouve à une distance de moins de 10 mètres, est possible. La qualité d'eau dans l'arroseur et le distributeur est bonne mais il n'y avait pas d'irrigation. L'EC de l'eau de la mare est constante: 0,2 mmho/cm.

Les pH étaient extrêmement élevés au début de la saison de riziculture. Vers la fin tous les pH ont baissés à un niveau normale ou peu alcalin.

Les SAR sont faibles sauf pour P4A et P7B à la fin de septembre. Il y a une monte des SAR.

Récapitulatif on peut dire que la salinisation et la sodisation se trouvent surtout sur les buttes et en surface. L'alcalinité peut se trouver sur les buttes aussi mais se déplace facilement en profondeur. Sans exception l'alcalinité augmente avec la profondeur. Parfois les phénomènes se concentrent près du drain, parfois près du partiteur. Donc ici il n'y a pas une relation. Les eaux de la nappe phréatique sont beaucoup plus salines et alcalines que les eaux d'irrigation. L'évolution de la salinisation et la sodisation pendant la saison culturale est progressive sur quelques sites et régressive sur autres. Il n'y a pas une relation claire. L'évolution de l'alcalinisation est régressive pendant la saison culturale. Presque partout les pH alcalins baissent avec 1 à 1,5 unité vers la neutralité. Les pH acides montent vers la neutralité. Les différences entre les EC et pH des piezomètres différents peuvent être grandes ce qui supporte la conclusion de l'étude hydraulique qu'il n'y a (presque) pas des courants horizontaux.

Les EC, pH et SAR de toutes les eaux d'irrigation sont améliorés pendant la saison culturale. La qualité et l'évolution des eaux de drainage sont variables.

3.3.4 Balance de sel

A. Objectifs

Quand on connaît le niveau des sels, on voudrait savoir aussi avec quelle vitesse l'EC va monter dans l'avenir. Nous voulons calculer cette évolution avec l'aide de la balance de sel pour le cas du G1. Nous avons choisi le G1 parce que le G1 se trouve dans un bas-fond et il n'y a pas de drainage.

B. Methodologie

Avant faire une balance de sel il faut d'abord établir une balance d'eau:

$$I + ER + P + C = D + ETa + \Delta S + \Delta H$$

I = irrigation (mm)

ER = écoulement superficiel venant des rizières (mm)

D = drainage (mm)

P = précipitation (mm)

ETa = évapotranspiration actuelle (mm)

C = eau influente de profondeur comme alimentation de la nappe phréatique (mm)

ΔS = différence d'eau stockée dans le profil (mm)

ΔH = différence de la couche d'eau sur la surface (mm)

La différence en EC peut être calculée avec la formule suivante:

$$EC = \frac{ECi * I + ECr * ER + ECc * C - ECd * D - ECs * \Delta S}{SP * X}$$

ECi = conductivité électrique d'eau d'irrigation (mmho/cm)

ECr = conductivité électrique d'eau des rizières (mmho/cm)

ECc = conductivité électrique d'eau influente de profondeur (mmho/cm)

ECd = conductivité électrique d'eau de drainage (mmho/cm)

ECs = conductivité électrique d'eau stockée dans le profil (mmho/cm)

SP = pourcentage de saturation exprimé comme poids d'eau par poids de sol sec

X = l'épaisseur de la couche d'eau souterraine qu'on considère (mm)

Figure III-5 montre les éléments de la balance d'eau.

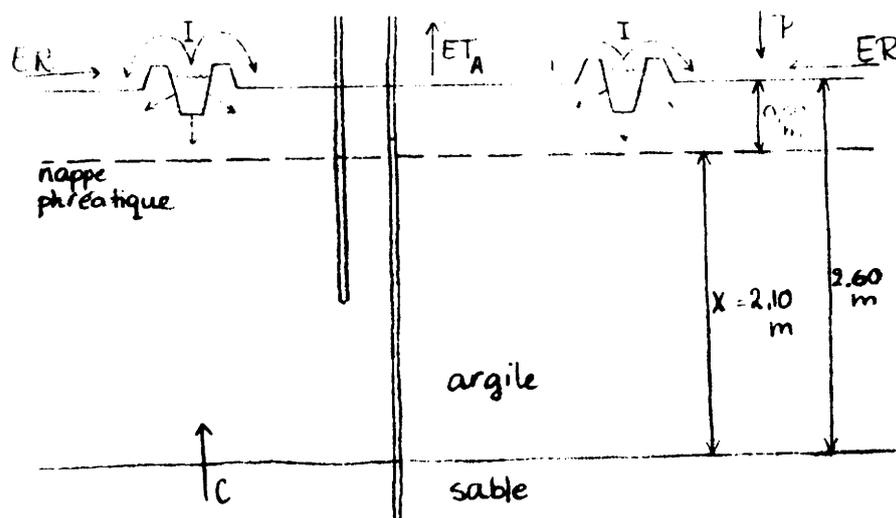


Figure III-5: Les éléments de la balance d'eau au G1

Dans le cas du G1 certains éléments de la balance ont été mesurés, autres doivent être estimés. Nous avons fait les suppositions suivantes d'abord:

1) Il y a une couche d'argile jusqu'à une profondeur moyenne de 2,6 m. La balance de sels concerne cette couche d'argile. Dans cette couche il y a uniquement des courants verticaux. Le courant

horizontal est négligeable (voire chapitre 2.3). La nappe phréatique se trouve sur une profondeur moyenne de 0.5 m.

2) Le drainage est nul.

3) Pendant la saison sèche la nappe phréatique ne baisse (presque) pas parce qu'il y a une remontée d'eau continue qui est alimentée par le canal Grüber.

4) On n'utilise pas des engrais chimiques.

La balance d'eau a été établie comme suit:

Nos mesures concernent les mois juillet à novembre. Pour cette raison ces mois ont été calculés mois par mois et les mois de décembre à juin ont été calculés ensemble.

L'irrigation n'a pas été mesurée comme la saison de maraîchage commence en novembre. Il n'y a pas des mesures disponibles des années précédentes. On cultive des oignons et avec l'aide de l'Agricultural Compendium (1981) et les suppositions que 50% de la surface est cultivée (selon observation) et que l'efficacité de l'irrigation est 50% (infiltration des canaux et excès d'eau appliqué) on estime que les oignons reçoivent 560 mm en total. La saison culturale commence à la fin d'octobre. Du total 20 mm sont assignés à octobre et 80 mm à novembre. Les 480 mm qui restent sont assignés à décembre-juin.

L'ER est un écoulement superficiel qui vient des rizières pendant la saison d'irrigation de riz. Il forme un facteur d'équilibre dans les mois de juillet et août.

Comme on a jugé les données pluviométriques du G1 pas valable (voire annexe IV), on prend les données du N1, le site le plus proche au G1.

La quantité d'eau influente de profondeur a été calculée avec la méthode expliquée en chapitre 3.3.2.C. La perméabilité de l'argile a été estimée à 10 mm/jour selon des données de la littérature sur la perméabilité et l'infiltration des sols argileux. Les gradients pour les mois de juillet à novembre ont été calculés avec les différences moyennes des piezomètres A et B en mm. Comme ni le niveau de la nappe phréatique, ni la situation climatologique, ni la situation de la culture sur les parcelles changent beaucoup de novembre vers les mois de décembre à juin, nous supposons que la remontée capillaire dans les mois de décembre à juin sont les mêmes comme en novembre.

L'évapotranspiration actuelle est le facteur qui doit équilibrer la balance. L'évapotranspiration de référence est donnée par BEAU (1981). Dans les mois d'août à octobre, quand il y a d'eau et des adventices en surface, nous avons supposé que l'ETA est égale à l'ETr. Dans les mois de juillet et novembre l'ETA est estimée plus basse (environ 4.4 mm/jour) et dans les mois de décembre à juin l'ETA est le facteur qui équilibre la balance.

La différence de la quantité d'eau stockée dans le profil est calculée avec l'aide des niveaux d'eau dans les piezomètres et une porosité de 40% pour argile (BEAU, 1981).

Le ΔH concerne une couche d'eau qui apparaît sur la surface dans le mois d'août et qui disparaît dans le mois de septembre. Le ΔH est le facteur qui équilibre la balance d'eau dans ces mois et les résultats conformément nos observations.

Dans la balance des sels la précipitation et l'évapotranspiration actuelle n'apparaissent pas comme elles ne contiennent pas des sels.

L'EC de l'eau d'irrigation est mesurée.

Pour l'Ecr nous avons pris l'EC de l'eau de drainage des

rizières comme on a mesuré dans les petits drains des zones de riziculture.

L'EC de l'eau de la remontée en haut (C) est donnée par le moyen des EC dans une mois des piezomètres qui sont installés dans le sable (voire chapitre 3.3.3). Pour les mois de décembre à juin nous avons estimé que ça reste constant.

Comme l'EC de l'eau stockée dans le profil, nous avons pris le moyen de tous les piezomètres dans un mois.

C. Résultats

Le tableau III-4: montre tous les mesures et estimations ensemble et la calculation de la balance.

Tableau III-4: La balance d'eau et de sels du G1 sur l'année 1989

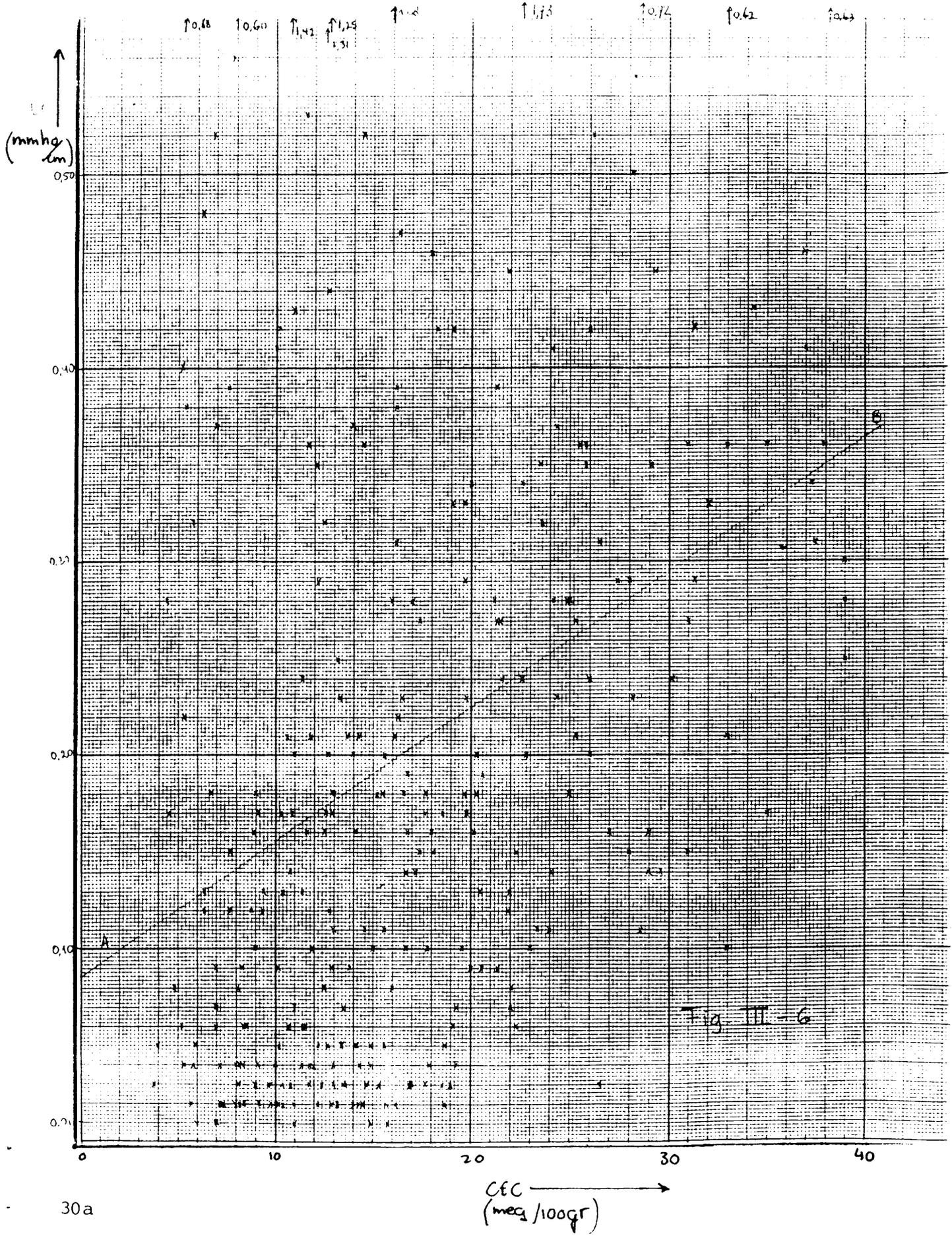
	dec.-juin	juillet	août	sep.	oct.	nov.	total
Irrigation (mm)	460	-	-	-	20	80	500
Précipitation (mm)	70	125	195	44	48	-	482
Remontée c. (mm)	140	3	1	-	7	20	171
Drainage (mm)	-	-	-	-	-	-	-
ETa (mm)	-645	-133	-180	-174	-180	-135	-1447
ΔS (mm)	-25	-129	-28	42	105	35	0
ΔH (mm)	-	-	-88	88	-	-	0
ERr (mm)	-	134	100	-	-	-	234
total	0	0	0	0	0	0	0
ECi (mmho/cm)	0,05	-	-	-	0,03	0,04	
ECc (mmho/cm)	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4	
ECs (mmho/cm)	1,2	1,2	1,5	1,5	1,3	1,3	
ECr (mmho/cm)		0,1	0,1				
ΔEC (mmho*mm/cm)	49	-140,2	-10,5	25,2	139,9	56,7	120,1

Le ΔEC dans la couche total est 120,1 mmho*mm/cm. Cette couche contient une quantité d'eau de 840 mm (l'épaisseur X est 2100mm et le pourcentage saturé est 40% selon BEAU (1981) pour l'argile, donc $0,40 * 2100 = 840$ mm). Donc l' ΔEC de l'année 1989 est $120,1/840 = 0,14$ mmho/cm.

3.3.5 Corrélation entre les phénomènes et les types de sol

Dans cette étude nous avons cherché une relation entre les différents phénomènes et les types de sol par deux manières. Par moyen d'enquête (voire paragraphe 3.5) nous avons demandé aux paysans quels types de sol sont plus sensibles aux phénomènes. Dans ce paragraphe nous décrivons la manière par moyen de l'étude chimique.

Pour bien comparer les effets des différents phénomènes sur les types de sol, on a besoin d'un paramètre qui peut donner une indication sur le type de sol. Pour la relation entre l'EC, le pH et le type de sol nous avons utilisé le CEC (la capacité d'échange des cations). Les sols sableux ont un CEC bas et les sols argileux ont un CEC élevé. Nos échantillons ont un CEC jusqu'à 39 meq/100gr de sol. Leur taux d'argile est supérieur à 50% et leur taux de sable ne dépasse pas 16%. Le CEC le plus bas est ce de 3.8 meq/100gr. Cet échantillon a un taux de sable supérieur à 75%. Un CEC de 20meq/100gr indique généralement un sol avec des taux de sable, de limon et d'argile qui sont à peu près les mêmes. Pour comparer l'ESP avec le type de sol, le CEC n'est pas un bon



30a

Fig. III-7

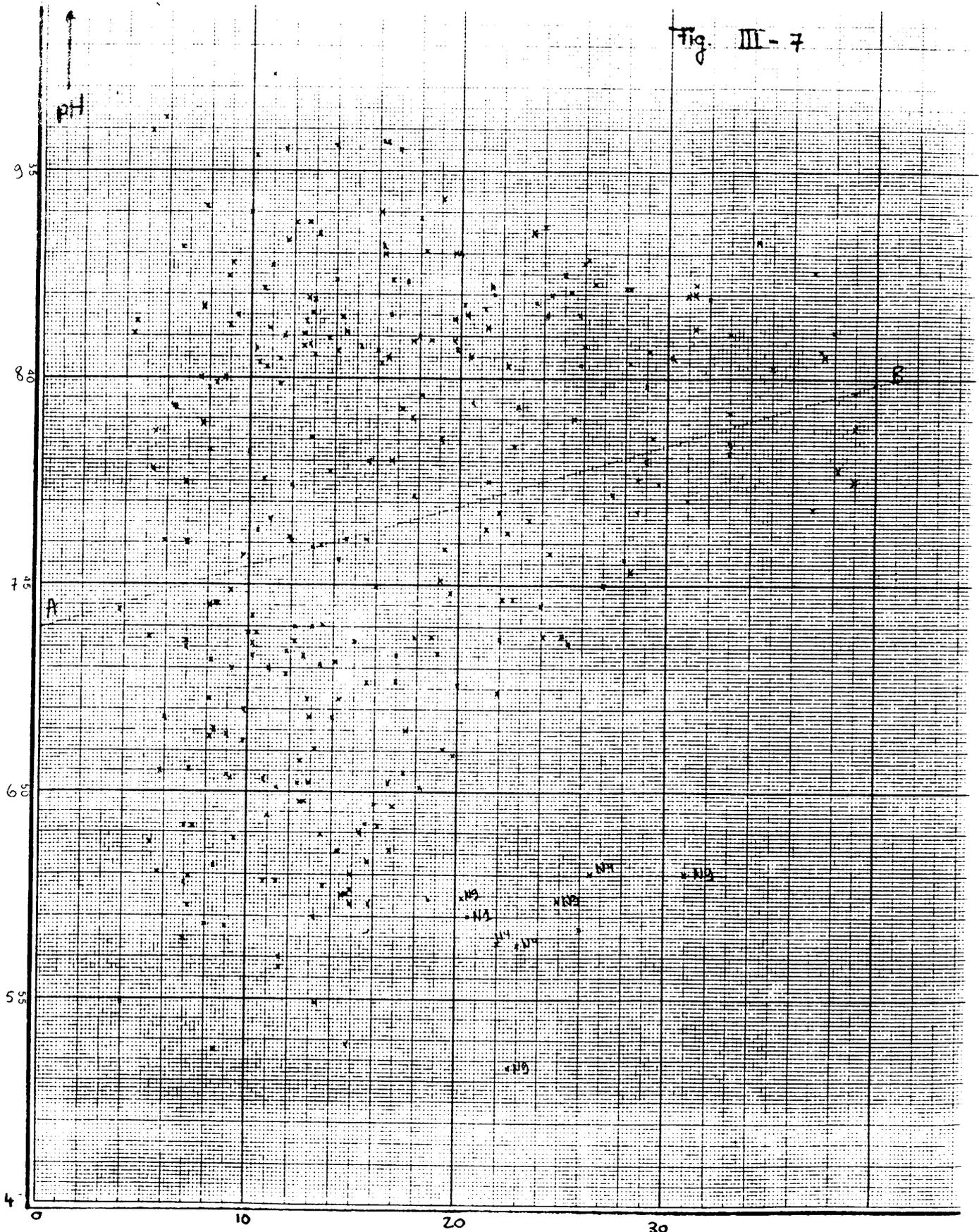
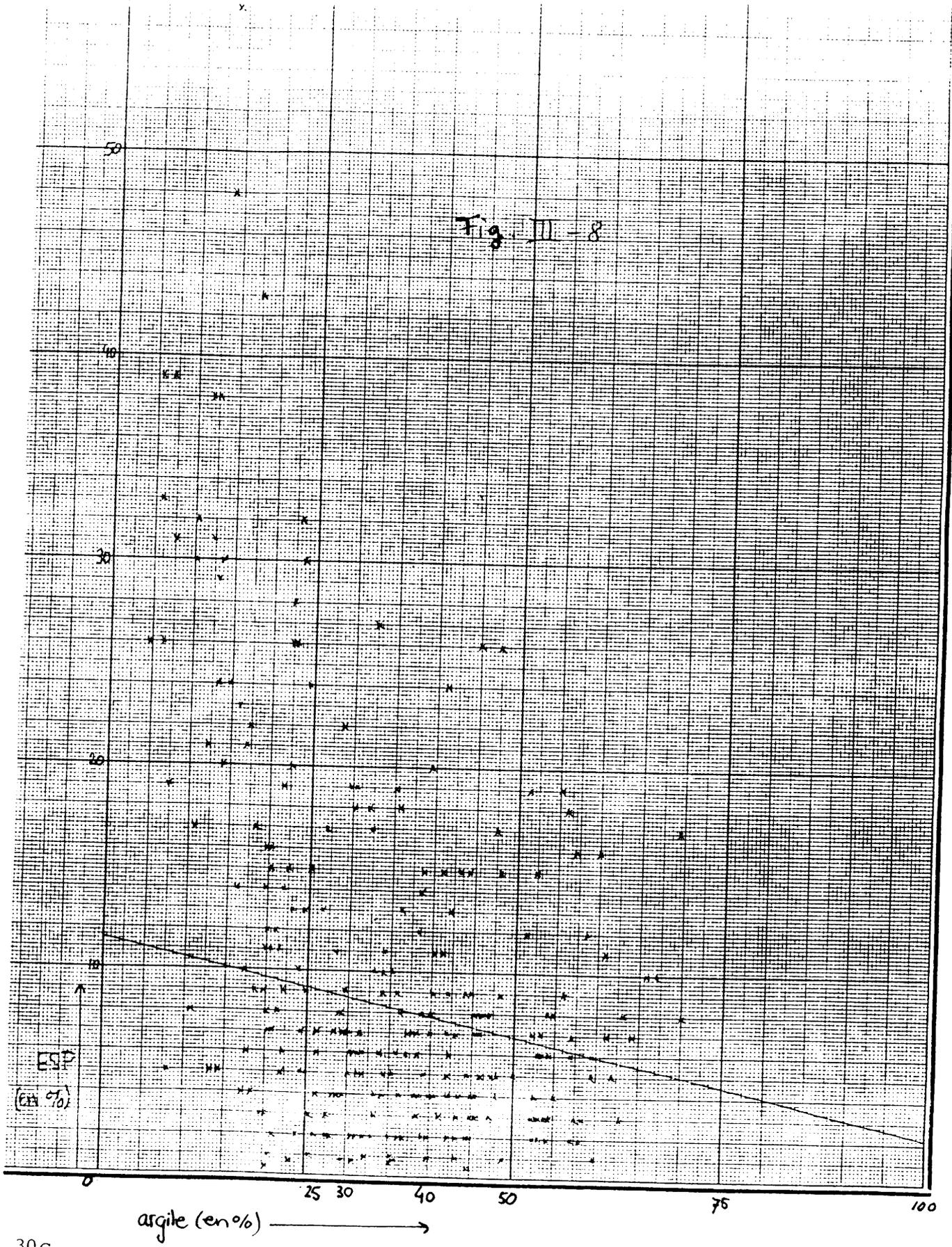


Fig. III-8



30c

paramètre parce que l'ESP est directement déterminé par le CEC ($ESP = Na^+ / CEC * 100\%$). Pour cela on a comparé l'ESP avec le taux d'argile.

Pour trouver une relation entre l'EC et le CEC et le pH et le CEC, nous avons établi deux graphiques dans lesquels toutes les 295 échantillons de sol sont représentés (sauf ces carrés d'observation). Figure III-6 montre la relation entre la salinisation et le CEC. Ce graphique montre que les échantillons de sol avec un CEC élevé ont plutôt une EC élevée qu'une EC basse. On peut voir que 95% des échantillons avec une EC inférieure à 0.1 (non-salin) se trouvent dans la classe avec un CEC inférieur à 20meq/100gr (les sables). Si on applique une régression linéaire, on trouve la ligne A-B (la formule est: $EC = 0.086 + 0.007CEC$). Le coefficient de régression est assez bas: 0.27.

La relation entre le pH et le CEC est montrée par figure III-7. Ici on voit qu'avec un CEC qui monte, le pH devient de moins à moins variable. Le pH des échantillons avec un CEC inférieur à 20 meq/100gr peut varier entre 4.7 et 9.8. Pour les échantillons avec un CEC supérieur à 20meq/100gr cette variation est limitée (pour la plupart de ces échantillons) entre 6.5 et 8.8. Les échantillons non-confirmant viennent tous des parties marécageuses du N1, N4-6d et N9. Une régression linéaire donne la ligne A-B ($pH = 6.796 + 0.029CEC$) donc le pH monte quand le CEC monte, mais pas très fort. Le coefficient de régression est 0.21, donc assez bas.

Figure III-8 montre la relation entre l'ESP et le taux d'argile. Les échantillons avec un taux d'argile bas ont plutôt un ESP élevé. Les ESP extrêmes sont trouvés uniquement dans la groupe des taux d'argile bas. Une régression linéaire donne la ligne A-B (formule: $ESP = 10.15 - 0.075 * \text{taux d'argile}$), mais le coefficient de régression (-0.117) et le figure montrent déjà qu'une régression linéaire n'est pas à ça place ici. Il est possible qu'il y a une corrélation, mais elle n'est pas linéaire.

De ces trois comparaisons on peut dire que les coefficients de régression linéaire approchent le zéro, ce qui veut dire que cette régression est très basse. On peut conclure qu'entre les différents phénomènes et les types de sol il n'existe pas une régression linéaire. Quand on regarde les trois figures (III-6,7,8) on peut néanmoins voir une certaine corrélation entre l'EC, le pH et l'ESP avec le type de sol, mais cette corrélation n'est pas linéaire.

3.4 Etude agronomique

3.4.1 Objectifs

Par une étude agronomique on a voulu connaître les effets de la salinisation et de l'alcali(ni)sation, sur la végétation en général, sur les différents stades de développement des plantes de riz et les rendements en particulier.

3.4.2 Méthodologie

Les effets de la salinisation, d'alcalinisation et de sodisation sur la végétation en générale ont été décrit suffisamment dans USDA Handbook no.60. Généralement la végétation sur les endroits affectés est moins dense et moins développée. La culture peut avoir l'aspect d'un manque d'eau ou les feuilles peuvent être brûlés. On peut trouver des endroits sans culture ou avec uniquement quelques adventices qui sont résistantes aux sels si la salinité et/ou l'alcali(ni)té sont assez sévères. Aussi la culture

peut montrer une couleur bleue/verte. Le bleu est du à une couche cirée lourde sur la surface des feuilles plus que normal. Le vert foncé est du à une augmentation de la contenance en chlorophyl. Sauf les couches cirées et la couleur bleue/verte nous avons pu observer tout les effets décrits ci-dessus. Entre autre avec l'aide d'observation de ces effets nous avons fait la cartographie qui est décrite dans le chapitre 3.5.

Pour l'étude des effets de la salinisation, l'alcalinisation et la sodisation sur les différents stades de développement et les rendements du riz, nous avons installés 3 carrés d'observation de 25m² dans 4 zones pilotes en riziculture, 12 carrés en total. 2 carrés sont installés sur des terres affectées et un dans un site pas (visiblement) affecté, pour ce dernier sert comme carré de témoin. Les carrés sont installés en milieu paysan sous des conditions non-controlées, c'est-à-dire les carrés sont cultivés par les paysans selon leurs habitudes. On a opté de faire une comparaison qualitative des carrés affectés et des carrés non-affectés. Dans une telle comparaison on ne peut pas éviter quelques différences en conditions, mais on peut les accepter.

Deux fois par stade (levée-tallage-épiaison) les plantes dans un carré de 1m² à l'intérieur des carrés d'observation ont été comptées, afin de connaître la sensibilité à la salinisation/alcali(ni)sation par stade.

Une fois par mois on a prélevé des échantillons de sol mélangé, pris des différents coins du carrés, des zones racinulaires (de 0-20cm et 20-40cm de profondeur) pour suivre le développement de la salinisation/alcali(ni)sation dans cette zone. Une fois par deux mois un bilan ionique a été déterminé des échantillons de 0-20cm de profondeur.

Par carré 10 touffes de riz sont matérialisées pour faire régulièrement des mesures de la taille pour étudier la régularité de la croissance du riz.

Enfin, les récoltes des carrés sont pesées (paille et grains) pour comparer les rendements des carrés affectés et des carrés non-affectés.

3.4.3 Les résultats

Les résultats du suivi agronomique des carrés d'observation sont montrés dans l'annexe XII.

Avec les résultats des analyses des échantillons de sol on trouve que tous les carrés affectés sont plus alcalins, plus sodique et plus salins que les carrés de témoin. Par ces résultats on voit aussi que les carrés de témoin ne sont pas des véritables témoins, parce qu'ils ne sont pas complètement non-affectés. Toutefois, la différence en affectation est grande et pour cela ils peuvent servir dans cette étude pour donner une impression des effets agronomiques de la salinisation/alcali(ni)sation. Si on tient à cette supposition, on voit que l'affectation touche la croissance et le développement des différents stades des plantes. Aucun stade n'est épargné par les effets des phénomènes de salinisation, d'alcalinisation et de sodisation.

Pour la levée la différence entre les carrés affectés et les carrés de témoin est relativement pas grande mais directement après la levée on voit que les plantes des carrés de témoin sont plus vigoureuses et on voit que certains plantes des carrés affectés sont sechées avant le tallage, d'où une réduction de nombre de plantes par m² dans le stade de tallage. Pour le tallage les carrés de témoin du N9 et du KL3 l'emportent largement sur les

carrés affectés. Dans les carrés affectés le tallage est lent ou ne se réalise pas et les plantes flétrissent et meurent. Mais pour le G5 et le N4 les plantes des carrés de témoin sont un peu moins tallées que celles des carrés affectés. Donc il est difficile de tirer des conclusions de cette stade. Dans le stade d'épiaison, la différence est la plus grande entre les carrés affectés et témoins. Certains carrés sont déjà avant ce stade dépourvu des plantes, suit à un séchage, causé par des sels, ou les plantes n'épint pas, même si elles existaient encore.

La croissance est en général plus rapide dans les carrés de témoin que dans les carrés affectés. Dans les carrés affectés les plantes sont restés rabougries, souvent avec un aspect buissonnant. Il faut noter que les dates de semis ne sont pas tous les mêmes. L'écart entre ces dates peut avoir une influence.

Déjà si on regarde les stades d'épiaison (les panicules) des différents carrés, on attend une différence entre les rendements des grains des carrés affectés et des carrés de témoin. Si on regarde les mensurations d'hauteur des touffes de riz on attend aussi une différence des rendements de paille. Les deux rendements sont montrés dans l'annexe VII.

Les conditions sous lesquelles l'étude a été faite ne sont pas tous optimales (différence entre dates de semis, pas partout la même quantité d'engrais, pas partout la même variété). Si par contre on tient à ces carrés d'observation comme une bonne comparaison entre des terres affectées et des terres non-affectées, on voit que les influences des phénomènes de salinisation, d'alcalinisation et de sodisation sur la croissance et le développement du riz sont très grandes.

3.5 L'enquête auprès des paysans

3.5.1 Objectifs

Avec l'enquête on a voulu:

- préciser l'importance des phénomènes de salinisation et d'alcali(ni)sation dans les zones d'études et leurs alentours;
- savoir comment et où les phénomènes se manifestent et savoir depuis quand ces phénomènes sont observés;
- déterminer l'impact du réaménagement;
- connaître le comportement des cultures et des adventices sur les terres affectées;
- profiter de la connaissance et l'expérience des paysans sur les causes et les remèdes de la salinisation et l'alcali(ni)sation.

3.5.2 Méthodologie

Nous avons entrepris une enquête dans toutes les zones d'études et les alentours, sauf le K02. L'enquête fut menée en deux parties:

- la première partie concerne les interviews individuelles, touchant environ 400 exploitants. L'enquête était formulée dans la langue bambara comme c'est la langue principale dans la région. Pour les zones de riz il y avait une enquête avec des questions sur la riziculture et le maraîchage (voire annexe XIII). Pour les deux zones en maraîchage il y avait une enquête avec des questions concernant le maraîchage uniquement (voire annexe XIV);
- la deuxième partie consiste en des visites de terrain afin de confirmer et infirmer les résultats obtenus lors de la première partie; elle consiste d'une cartographie de toutes les terres affectées des zones pilotes et les alentours. Pendant la cartographie les arroseurs où se concentrent nos études sont

Tableau III-5: L'importance et l'évolution des phénomènes

zone	nombre de familles à enquêter	nombre de familles enquêtées	nombre de familles ayant des problèmes	surface attribuée (ha)			surface affectée en % de la surface totale			évolution des phénomènes en % des enquêtés					
				riz casier	riz hors casier	maraf-chage	cult. sèche	r.c.	r.h.c.	m.	c.s.	progr.	régr.	stable	abst.
KL3	115	92	84	414,3	60,9	38,0	296,2	12	31	46	7	67	23	9	1
G5	80	61	57	283,8	16,8	9,7	14,2	5	4	20	3	44	16	18	23
N4	83	41	31	139,0	13,0	19,8	14,8	6	3	4	2	42	23	35	-
N9	59	56	47	305,9	210,2	40,1	2,3	6	1	30	-	66	15	19	-
G1	60	59	44			6,0				33		72	4	24	-
N1	182	100	49			19,8				7		39	10	43	8
total	579	409	312	1143,0	300,9	133,4	327,5	8	7	28	7	55	15	25	5

cartographiés en détail. Le reste du partiteur est fait moins détaillé et moins précis. La cartographie concerne le G5, le N9, le KL3 et le G1 et le N1.

3.5.3 Les résultats

3.5.3.1 L'importance des phénomènes

L'importance des phénomènes est déterminée par deux manières: par les interviews et par la cartographie. Toutes les informations sur l'importance des phénomènes, déterminées par les interviews, sont données dans le tableau III-5. La différence entre le nombre de familles à enquêter et le nombre enquêté est dûe surtout au nombre de non-résidents, ayant un champ dans les zones de nos partiteurs. La surface affectée en riziculture est 7 à 8% du total des surfaces. Le KL3 (avec les sols Danga et Séno) est plus affecté. La surface affectée en maraîchage est plus grande: environ 28% du total des surfaces. La majorité des enquêtés (55%) pense que l'évolution des phénomènes est progressive. Seulement 15% pense à la régression. Par 60% des enquêtés les phénomènes sont observés depuis 1-10 ans, par 16% depuis 11-20 ans et par 21% depuis plus que 20 ans.

En comparant ces résultats avec les résultats obtenus par la cartographie, on note quelques différences. Par la cartographie les surfaces affectées sont estimées généralement plus grandes que par les interviews. Pendant la cartographie nous avons utilisé 4 classes d'affectation de sol:

- 1 - légèrement affecté - production non-affectée mais on voit des signes d'affectation comme des taches;
- 2 - moyennement affecté - production réduite;
- 3 - très affecté - production moins qu'environ 50% de la production normale;
- 4 - extrêmement affecté - sans production.

Il faut noter que cette classification est subjective. Surtout la différence entre classe 2 et 3 n'est pas très claire. Mais pour nos objectifs et notre demande la précision était assez.

Avec les cartes, produites pendant la cartographie (voire annexe XV), on peut estimer que 1/4 à 1/3 des sols cartographiés est entre légèrement et extrêmement affecté.

3.5.3.2 La manifestation des phénomènes

Dans la manifestation des phénomènes nous sommes intéressés dans les facteurs suivants:

- comment est-ce que le paysan identifie les phénomènes?
- où se manifestent les phénomènes: - sur quels sols?
 - où dans le champ?

Nous avons trouvé que les paysans identifient les phénomènes par les différentes taches d'affectation sur le sol. On a observé des taches noires, des taches blanches et des taches huileuses. Dans les rizières les taches noires et blanches sont mentionnées dans la même fréquence. Les taches huileuses sont mentionnées dans 22% des avis. Les détails par zone sont montrés dans tableau III-6. Néanmoins il n'est pas possible de lier la fréquence en pourcentages d'observation d'un certain type de tache avec la pourcentage de terres affectées d'un certain phénomène dans une zone (par exemple, si on dit que les taches noires indiquent l'alcalinité, ça ne veut pas dire que 18% des terres affectées au G5 sont affectées par l'alcalinisation).

Tableau III-6: L'importance des taches par zone (en % des avis)

type de tache	total rizières	KL3	G5	N4	N9	total maraichages	G1	N1
noire	39	53	18	28	39	60	47	45
blanche	39	32	45	42	43	26	23	28
huileuse	22	15	37	30	18	28	30	27

Nous avons demandé également quels types de sol sont touchés par les phénomènes. Les résultats dans les rizières ont confirmé les résultats obtenus par N'Diaye (1987). Les Danga et les Séno sont plus susceptibles aux phénomènes de salinisation et d'alcali(ni)sation que les Moursi et les Dian. Dans les maraichages les opinions étaient différentes. Là, on pense que les phénomènes se trouvent surtout sur les Séno et les Moursi (43% des avis était pour les Séno, 31% pour les Moursi). Les Danga sont mentionnés en 19% des avis et les Dian en 7% des avis. Les détails se trouvent en tableau III-7.

Tableau III-7: L'importance des phénomènes suivant les types de sol (en % des avis)

type de sol	total rizière	KL3	G5	N4	N9	total maraichages	G1	N1
Séno	36	35	36	42	26	43	43	42
Danga	39	47	32	30	30	19	18	19
Dian	6	9	3	4	7	7	7	9
Moursi	19	9	29	24	37	31	32	30

Il faut bien noter que les Danga sont les sols qui occupent 44% des surfaces de la zone de Niono, donc il est évident que les paysans observent souvent les phénomènes sur les Danga.

La question 'où se situent les taches dans le champ?' a été demandée pour les rizières seulement. La grande majorité des réponses était que les taches se trouvent sur les buttes (94% des avis), 1% des avis était pour les basfonds (avec 5% d'abstention).

3.5.3.3 L'impact du réaménagement

Généralement les opinions sur l'impact des différents réaménagements sur l'évolution de la salinisation et d'alcali(ni)sation étaient positives. Tableau III-8 montre les avis sur l'impact des réaménagement du projet ARPON et du projet Retail.

Tableau III-8: Avis sur l'évolution des phénomènes après les réaménagements d'ARPON au KL3 (1983) et du Retail au N4 (1987)

	ARPON (KL3)	Retail (N4)
progression	7%	13%
régression	58%	13%
stable	25%	10%
abstention	10%	64%

Si on peut tirer des conclusions de ces deux zones, malgré le

grand pourcentage d'abstention et le fait qu'on a regardé seulement deux zones réaménagées, on peut dire que le réaménagement de Retail est jugé moins positif que le réaménagement d'ARPON. Le N1 a aussi été réaménagé par le Retail, mais la plupart des exploitants ont reçu leur parcelle après ce réaménagement, la raison pour laquelle nous n'avons pas pu recueillir des opinions sur ce réaménagement. Tableau III-9 montre les opinions des paysans qui ont vu une régression des problèmes après la réaménagement, sur l'impact des réaménagements dès la première année.

Tableau III-9: Avis sur l'impact des réaménagements dès la première année (en pourcentages des avis)

	KL3, ARPON	N4, Retail
effet dès la première année	56	23
pas encore d'effet en première année	6	6
abstention	38	71

Il faut noter que les pourcentages élevés d'abstention sont dus au grand nombre de nouveaux colons.

3.5.3.4 Le comportement des cultures et des adventices

Dans l'enquête nous avons demandé l'avis sur le comportement des cultures par stade de développement. Le tableau III-10 en est le résultat. Dans ce tableau on a toujours pris le stade le plus limitant pour la production pour estimer la sensibilité d'une culture par rapport à l'autre.

Tableau III-10: Avis des familles cultivantes des cultures sur une surface affectée sur le comportement de ces cultures (en pourcentage sur l'ensemble des zones)

	riz	oignon	tomate	patate	piment	ail	gombo	tabac
bon	6	7	24	14	13	5	11	19
mauvais	72	74	44	53	31	43	33	15
abstention	22	19	32	33	56	52	56	66

De ce tableau on peut conclure que la tomate et la patate sont relativement bien résistantes à la salinisation et l'alcali(ni)sation. Le riz, l'oignon et l'ail par contre, sont sensibles. Tirer des conclusions sur le tabac, le piment et le gombo n'est pas possible, vu le pourcentage élevé d'abstention.

Les opinions sur l'affectation du goût et la conservation de l'oignon sont données dans le tableau III-11.

Tableau III-11: Avis sur l'affectation du goût et la conservation de l'oignon des familles cultivantes l'oignon sur une surface affectée (en pourcentages des avis)

	goût	conservation
bon	12	9
mauvais	37	51
abstention	51	40

Généralement on dit que le goût des oignons des surfaces affectées est amer. Le pourcentage élevé d'abstention est du au fait qu'on ne récolte rien sur les surfaces affectées.

La question sur les types des adventices qui se comportent bien en zone affectée a résulté dans un grand nombre de noms des espèces en bambara. Cette connaissance a été utilisée pendant la cartographie pour reconnaître des terres affectées.

3.5.3.5 Les causes et les remèdes

Beaucoup de causes et de remèdes aux problèmes de salinisation et d'alcali(ni)sation ont été mentionnées.

Les causes principales selon les paysans sont l'irrigation, le mauvais planage et les engrais (surtout le fumier organique). Les différences en avis entre les zones n'étaient pas très grandes. Tableau III-12 montre les détails.

Tableau III-12: Avis sur les causes de salinisation et d'alcali(ni)sation sur l'ensemble des zones (rizières et maraîchage)

mauvais planage	16%
irrigation	24%
engrais	18%
abstention/autre	42%

Il faut noter ici qu'il existe une cause très claire sur les zones maraîchères: la destruction des termitières et l'épansion de ses terres sur le champ, parce que beaucoup de sels sont collectés dans la terre de ces termitières.

Les principaux remèdes selon les paysans sont surtout le planage et le paillage. Aussi pour les remèdes, les différences en avis entre les zones ne sont pas grandes, sauf entre les zones rizières et les zones maraîchères. Le tableau III-13 montre les détails.

Tableau III-13: Avis sur les méthodes de lutte contre la salinisation et l'alcali(ni)sation (en % des avis)

	rizière	maraîchage
décapage + planage	43	26
paillage	41	40
fumier organique	-	25
arrosage fréquent	-	3
abstention/autre	16	7

Sur l'ensemble, 75% des paysans ont utilisé leur méthode de lutte proposée. Leurs résultats sont tellement variables qu'on ne peut pas conclure qu'il y a des méthodes de lutte qui sont appréciées comme vraiment efficaces.

Tableau IV-1 : Vue générale des données par zone

zone	type de sol	réseau d'irrigation	réseau de drainage	plage	cauants d'eau verticaux	lieux d'affleurement	salinisation	salinisation de l'irrigation	salinisation de la saignée (évaluation)	qualité d'eau d'irrigation	qualité d'eau de drainage	causes possibles d'affleurement
Ng	marsi (limon-sableuse selon Sene)	très mauvais	très mauvais	non	en bas	(pas de remarques)	salin/en début salin	très aride, très plu. en profondeur	très variable, après les plu. sont peu alcalins	faible	faible	causes possibles d'affleurement : mauvais réseau de drainage, irrigation et de drainage mauvais, qualité d'eau d'irrigation
N4-18	danga/dian	bon	très mauvais	oui	en haut à côté d'un drain de partiteur en bas à côté de partiteur	sur les buttes	alcalin sodique	à côté d'un drain de partiteur, basse et str. drain de partiteur à côté de partiteur, tout basse sur leur hauteur et monte	faible, monte	—	non-salin	manque de drainage
KL3	danga/seno	mauvais à côté d'un drain de partiteur, reste bon.	pas optimal, seulement superficiel	non	non	sur les buttes plus qu'à côté d'un drain	plus en profondeur, en début salin	non, EC basse ou reste stable neutre	alcalin, pH	EC est bonne, samedicre au cours de la saison	plus salin	peu de problèmes, être causés par mauvais drainage
G5	marsi/dian	mauvais à côté d'un drain de partiteur, cause d'une faible pente forte sur	pas optimal, seulement superficiel	non	en haut jusqu'à mi-acuit, en bas à partir de mi-acuit	à côté d'un drain de partiteur plus qu'à côté de partiteur	plus en profondeur, en début salin	faible, stable	très alcalin, pH baisse vers peu alcalin	EC pastères bonne samedicre, pH samedicre	bonne samedicre	manque de drainage
K02	danga	bon	bon	oui	?	—	pas en surface, plus en profondeur	EC basse, baisse ou reste stable neutre	alcalin, pH baisse vers neutre	EC est bonne samedicre	pas très salin	?
N4-6d	danga	bon	pas bon, le drain du partiteur fonctionne mal	oui	non	—	non	faible, stable	faible, baisse	EC est bonne, peu alcalin (combiné)	non-salin	pas des problèmes, réaction de pas alcalin ces problèmes
G1	seno/danga	bon	nul	non	en haut	sur les buttes	alcalin sodique	salin, évolue avec variation	très élevé, baisse fortement	bonne	bonne (20mm)	manque de drainage
N1	danga/dian	bon	mauvais	non	non	—	sur tout en profondeur, en début salin	faible, stable	faible, stable	EC est peu élevée	EC est peu élevée	manque de drainage

IV CONCLUSIONS

4.1 Introduction

Dans le chapitre suivant on veut tirer des conclusions sur les facteurs qui peuvent influencer les phénomènes de salinisation, d'alcalinisation et de sodisation, le développement des phénomènes et leurs influences. Nous commençons avec nos conclusions sur l'importance des phénomènes à l'Office du Niger pendant la période de notre recherche. Ces observations, ensemble avec les données quantitatives, forment la base pour notre synthèse sur la dynamique des processus de salinisation, d'alcalinisation et de sodisation. Cette synthèse est suivie par des conclusions que nous pouvons tirer sur les phénomènes mêmes et leurs effets agronomiques. Finalement nous donnons nos conclusions sur les effets du réaménagement. Une vue générale des données par zone est montrée dans le tableau IV-1.

4.2 L'importance des phénomènes de salinisation, d'alcalinisation et de sodisation à l'Office du Niger

L'enquête auprès des paysans sur l'importance des phénomènes montre que 7 à 8% des surfaces sous riziculture, et 28% des surfaces sous marâchage est affecté et la cartographie montre que 1/4 à 1/3 des terres cartographiées est affecté (voire paragraphe 3.5.3.1). Donc la conclusion est que les terres de l'Office du Niger sont affectées d'une manière assez importante.

4.3 L'irrigation

Généralement le réseau d'irrigation à l'Office du Niger n'est pas très mauvais, surtout dans les zones réaménagées. Les problèmes qu'on peut rencontrer sont des champs vers le fin d'un arroseur qui ne peuvent pas être irrigués ou des cas où on irrigue par le drain (voire paragraphe 3.2.3).

La qualité d'eau d'irrigation (venant du Niger) est bonne et s'améliore pendant la saison de riziculture par l'action diluante des pluies. Mais par une concentration elle peut causer la salinisation, l'alcalinisation et la sodisation. La qualité de l'eau de la nappe s'améliore aussi pendant la saison de riziculture par l'alimentation d'eau d'irrigation et de pluie qui dilue les sels (voire paragraphe 3.3.3).

4.4 Le drainage

Déjà dans le paragraphe 3.2.3 on a noté que la topographie de l'Office du Niger et les alentours est très difficile pour faire un bon drainage. Dans les zones pilotes on a vu qu'un drainage profond manque complètement. Même un drainage superficiel manque sur quelques zones. Le drainage de quelques zones réaménagées fonctionne mieux qu'ailleurs. Le mauvais drainage a contribué à la montée de la nappe phréatique. Parfois on trouve que le drain est utilisé comme arroseur plus en aval, ce qui cause un malfonctionnement du drainage en amont.

La qualité de l'eau de drainage est généralement inférieure à

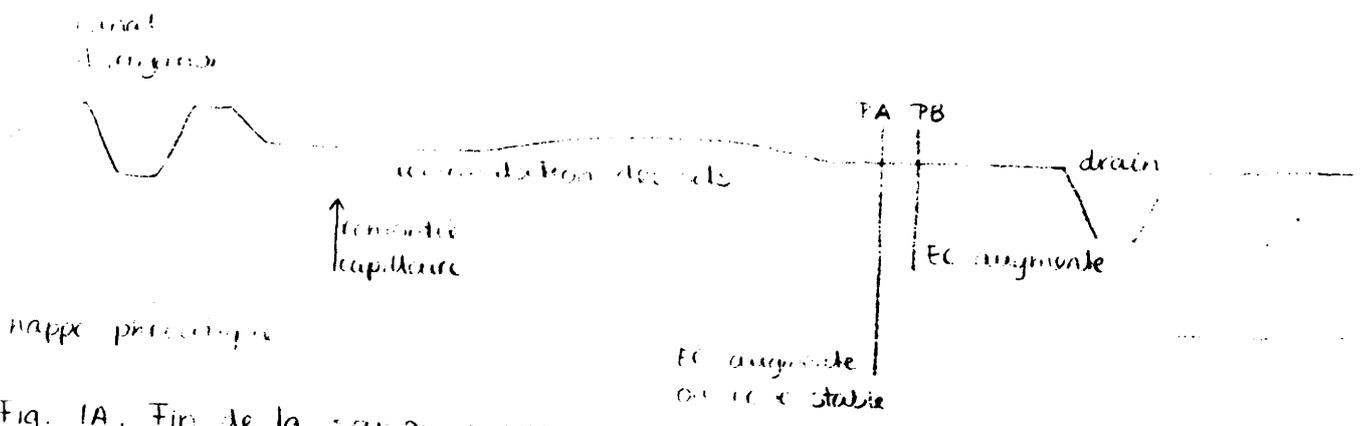


Fig. 1A. Fin de la saison sèche

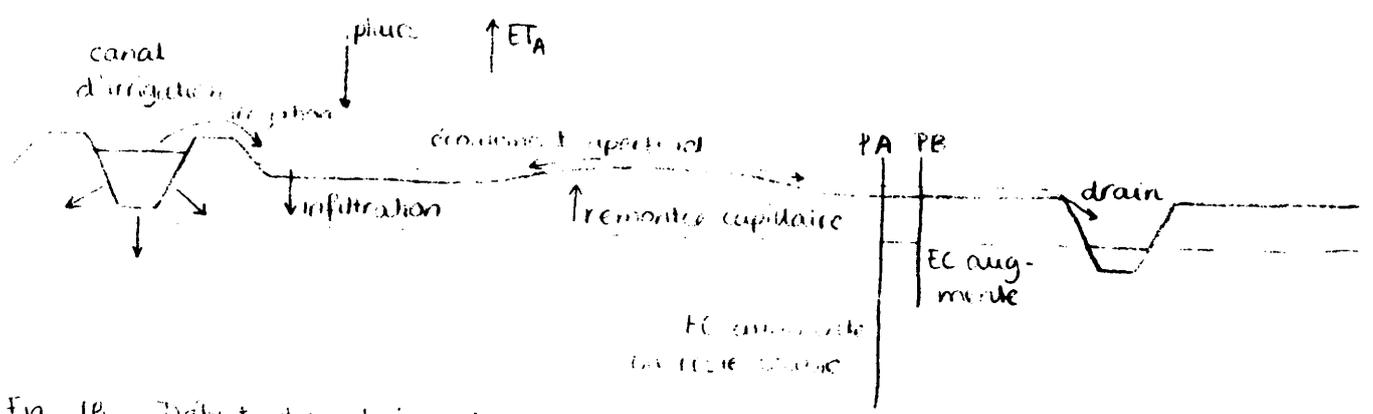


Fig. 1B. Début des pluies et d'irrigation.

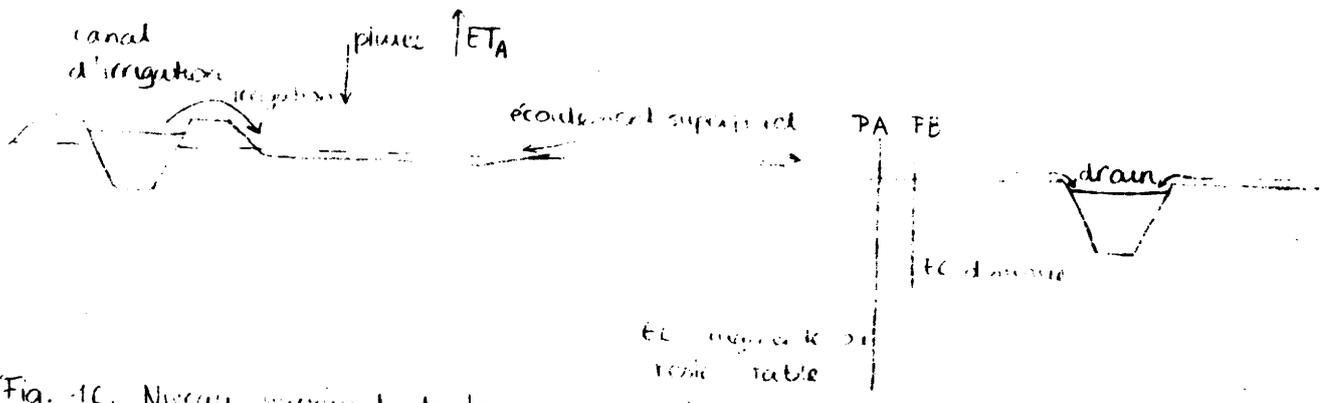


Fig. 1C. Niveau maximal de la nappe phréatique.

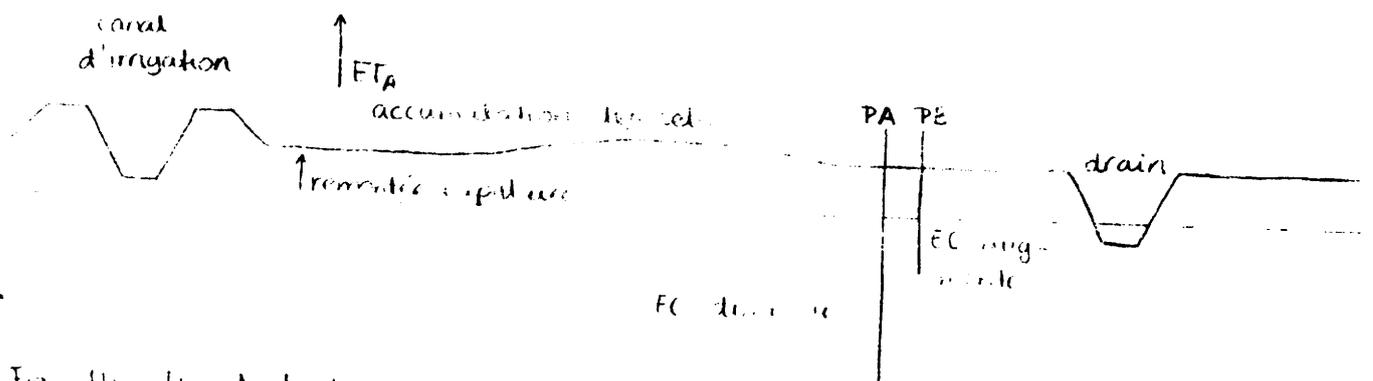


Fig. 1D. Début de la saison sèche.

celle de l'irrigation, mais la concentration de sel n'atteint jamais celle de l'eau de la nappe. Une grande partie de l'eau de drainage vient de l'écoulement superficiel. Le lessivage des sels ne suffit pas et par cette raison le mauvais drainage est une cause principale de la salinisation, l'alcalinisation et la sodisation. (voire paragraphe 3.3.3)

4.5 Le planage

Un mauvais planage a une influence qui favorise les phénomènes de salinisation et d'alcalinisation, ce qui a été montré par des enquêtes (paragraphe 3.5.3.2) et par nos analyses (paragraphe 3.3.3). Par ces analyses on a trouvé que les sites qui se trouvent sur des élévations sont souvent plus affectés par la salinisation ou l'alcalinisation que des autres. Cela peut être expliqué par le fait que ces parties ne sont pas inondées facilement pendant l'irrigation. Ces parties seront inondées moins longtemps ce qui veut dire que la remontée capillaire et l'évapotranspiration sont plus importantes, qui transportent des sels vers la surface, et le lessivage manque.

4.6 Les courants d'eau souterrains

Par les gradients faibles de la nappe phréatique et par la perméabilité faible du sol, les courants latéraux sont négligeables dans les horizons jusqu'à 3m de profondeur. Les courants verticaux, par contre, peuvent être importants, ce qui implique que plus profond que 3m il y a des courants d'eau horizontaux. La direction et l'intensité varient par endroit et par période. (voire paragraphe 3.2.3c)

4.7 Une modèle sur la dynamique des processus de salinisation, d'alcalinisation et de sodisation

Nous avons tenté d'établir une modèle des mouvements d'eau et des sels pendant l'année dans les rizières et dans les maraichères. Nous avons divisé l'année en quatre périodes. Les premières trois périodes sont suivies par cette étude. Pour la saison sèche nous donnons notre attente. Les quatre périodes dans les rizières sont rendues visibles dans les figures 1A, 1B, 1C et 1D et les quatre périodes dans les maraichères sont montrées dans les figures 2A, 2B, 2C et 2D.

4.7.1 Les rizières

Dans la première période (fig. 1A) il n'y a pas d'irrigation, ni de pluie. La nappe phréatique se trouve sur le niveau le plus bas de l'année. Il existe une différence de potentiel entre la nappe et la surface et par conséquent il y a un mouvement d'eau et des sels vers la surface. En cas que la nappe se trouve trop bas, ce mouvement peut s'arrêter mais un lessivage des sels n'est jamais possible par manque d'eau. Donc pendant (une partie de) la saison sèche il y a une accumulation des sels à la surface et l'EC du piezomètre B augmente aussi par concentration de la nappe ou reste stable si le transport en haute s'est arrêté.

La deuxième période commence avec le début des pluies et le début des irrigations en juillet (fig. 1B). La nappe phréatique monte mais n'atteint pas encore la surface. La nappe est alimentée par les pluies et l'eau d'irrigation. La concentration des sels à

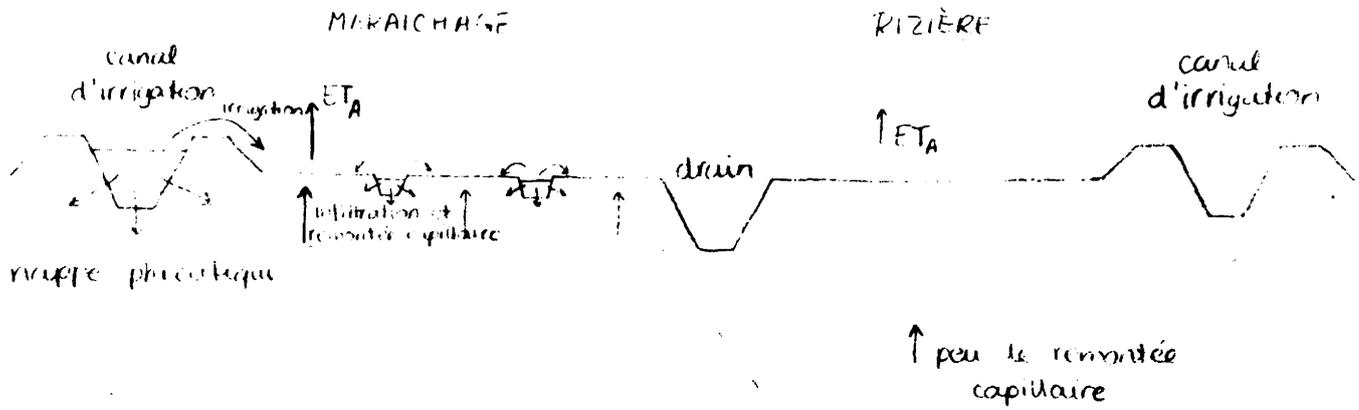


Fig. 2A. Fin de la saison sèche.

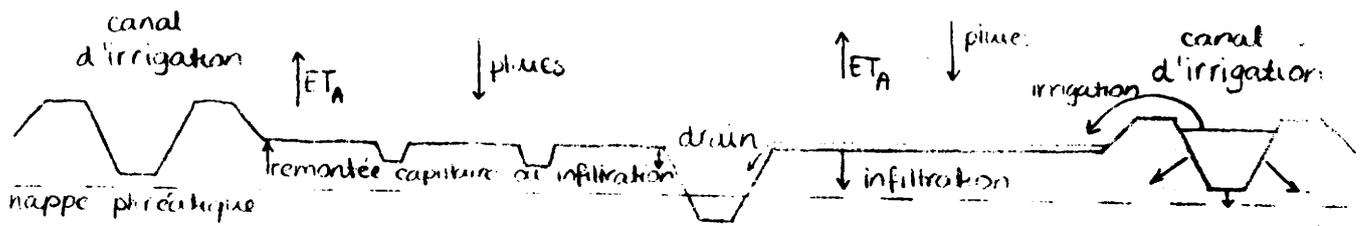


Fig. 2B. Début des irrigations dans les rizières et des pluies.

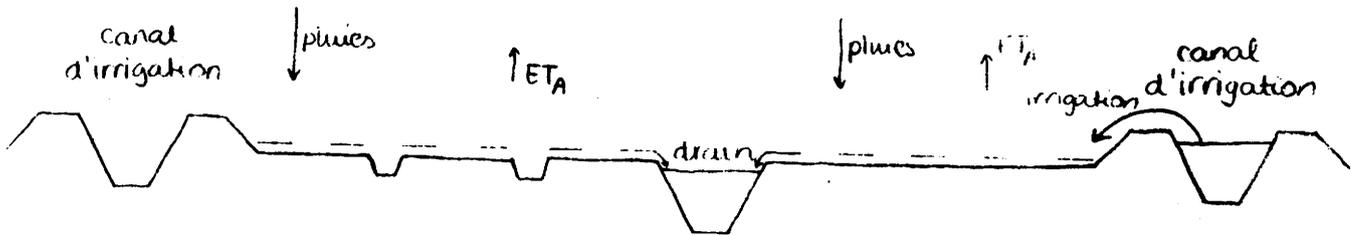


Fig. 2C. Niveau maximal de la nappe phréatique.

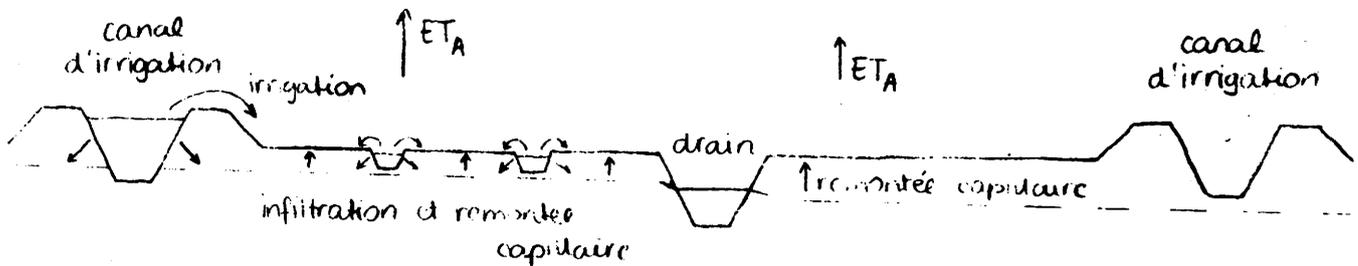


Fig. 2D. Début de la saison sèche.

la nappe peut augmenter ou diminuer. La grande quantité d'eau qui s'ajoute à la nappe diminue la concentration des sels. Mais les sels qui étaient accumulés à la surface sont résolus et transportés vers la nappe ce qui peut augmenter la concentration. Il faut noter qu'il y a aussi des sels qui sont transportés par le drainage superficiel vers les drains, mais la plupart des sels sera déjà transportée en bas avant ce dernier processus peut être exécuté. L'eau d'irrigation amène un peu de sels aussi qui s'ajoutent au système. Le lessivage par l'eau d'irrigation et de pluie fait augmenter l'EC du piezomètre B et il commence à faire augmenter l'EC du piezomètre A à une profondeur plus basse. Sur les buttes dans le champ ce lessivage est beaucoup moins. Souvent les buttes ne sont pas inondés et l'eau écoule superficiellement et ne peut pas s'infiltrer. Probablement la remontée capillaire y continue ou recommence (la nappe est montée) en amenant des sels comme dans la saison sèche.

Pendant la saison des pluies et d'irrigation la troisième période commence (fig. 1C). La nappe se trouve à son niveau maximal, souvent même au dessus de la surface. Souvent les buttes ne sont pas inondées et le lessivage est encore difficile. Les sels sont évacués par l'écoulement superficiel uniquement. Dans le sol il y a très peu de mouvements d'eau. Les sels sont mélangés dans le profil par diffusion. Encore il y a des sels qui s'ajoutent par irrigation et des sels qui sont évacués par drainage. L'EC de B diminue sous l'influence de la pluie et d'irrigation. Pour le piezomètre A on voit que l'EC reste stable ou augmente. Cette augmentation peut seulement être expliquée par l'influence des sels qui étaient accumulés à la surface et qui sont descendus avec les pluies.

Finalement il y a la quatrième période qui commence par le début de la saison sèche (fig. 1D). Il n'y a plus d'irrigation, ni de pluie. La nappe a commencé à baisser. Une certaine quantité d'eau et de sels est encore évacuée par le drainage. Après peu de temps ça sera finit. Il y a une remontée capillaire qui commence à s'installer. Par conséquent il y a un transport de sels et d'eau vers la surface qui continue pendant (une partie de) la saison sèche. L'eau disparaît par l'évapotranspiration. Une partie des sels s'accumule à la surface. L'autre partie reste dans le sol et l'EC de piezomètre B augmente de nouveau. L'EC du piezomètre A diminue d'abord, ce qui peut seulement être expliqué par une approvisionnement d'eau.

4.7.2 Les maraichères

Dans les maraichères la situation est différente. De nouveau on commence l'année à la fin de la saison sèche (fig. 2A). Il n'y a pas de pluie, les jardins sont irrigués. La nappe sous les jardins se trouve sur un niveau plus haut que sous les rizières. Par conséquent il y a plus de remontée capillaire dans les jardins qui amène des sels vers la surface (plus que dans les rizières). Les sels ne sont pas dilués par la pluie, parce que les pluies n'ont pas commencé. C'est possible qu'il y a un peu de drainage, mais souvent le drainage manque. L'eau d'irrigation amène des sels. L'évapotranspiration est grande, parce que le climat est chaud et sec. L'accumulation des sels à la surface est grande. Il n'y a pas des données sur la qualité d'eau dans les piezomètres.

Quand l'irrigation dans les rizières et les pluies commencent (fig. 2B), la saison maraichère est terminée. La nappe des rizières monte et comme les rizières sont beaucoup plus grandes

que les maraichères et les entourent, la nappe des jardins ne baisse pas ou seulement très peu. La pluie amène des sels par infiltration vers la nappe. Si il y a de drainage, une quantité des sels sera évacuée. Quand il y a une manque de drainage, il est possible que l'eau des rizières coule superficiellement vers les maraichères en amenant des sels.

Pendant la troisième période (fig. 2C), la nappe atteint son niveau maximal dans les rizières et aussi dans les maraichères. Des grandes parties des maraichères sont inondées. Les sels sont mélangés dans le profil par diffusion. Les concentrations diminuent.

Dans la quatrième période la saison sèche commence. Les irrigations dans les maraichages commencent, mais dans les rizières elles sont terminées. La nappe sous les rizières a commencé à baisser et sous les jardins également. Mais sous les jardins la nappe sera maintenue à un certain niveau par les irrigations qui sont faites. La remontée capillaire reprend entre les irrigations et l'accumulation des sels à la surface également.

4.7.3 Une comparaison entre les rizières et les maraichères

En comparant les processus dans les rizières et dans les maraichères on note les différences suivantes qui expliquent pourquoi les maraichères sont plus attaquées que les rizières:

- dans la première période à la fin de la saison sèche, la nappe des rizières est beaucoup plus profonde que celle des maraichères. La remontée capillaire et le transport des sels vers la surface dans les jardins sont beaucoup plus grands. L'eau de la nappe est concentrée des sels.

- dans la deuxième période quand les pluies et les irrigations commencent dans les rizières, un lessivage des sels accumulés à la surface commence. Dans les jardins on a arrêté les irrigations, donc le lessivage y prend place par les eaux de pluie uniquement.

- dans la troisième période les situations dans les rizières et les maraichères sont les mêmes. Tous les deux sont inondés. Les sels sont mélangés dans le profil par diffusion. Il faut noter que les maraichères sont seulement inondés quand les rizières sont proches des maraichères.

- dans la quatrième période la nappe a baissé et la remontée capillaire recommence et aussi le transport des sels vers la surface. La remontée capillaire dans les rizières diminue pendant la saison sèche quand la nappe baisse. Dans les maraichères la nappe est maintenue et le transport des sels aussi.

- un manque de drainage dans les jardins accentue les phénomènes parce que tous les sels qui sont ajoutés par irrigation ne sont pas évacués par drainage.

4.8 Les processus de salinisation, d'alcalinisation et de sodisation

Notre enquête auprès des paysans dans les rizières a confirmé les résultats de N'Diaye (1987) (aussi par moyen enquête) que les sols Séno et Danga sont les plus affectés. Un grand pourcentage des paysans dans les maraichères a vu les affectations sur les Séno et les Moursi. (voire paragraphe 3.5.3.2)

Par les analyses chimiques (voire paragraphe 3.3.5) de nos échantillons des zones pilotes, nous avons vu que tous les types de sol peuvent être affectés par chaque phénomène, mais les probabilités et les intensités ne sont pas les mêmes. Pour tous

les phénomènes la base des problèmes est formée par une balance des sels qui est déséquilibrée. Pendant l'année il y a plus de sels que sont ajoutés au système par irrigation qu'évacués par drainage. La composition ionique de l'eau d'irrigation et les propriétés du sol sont responsables de la manière dont les phénomènes se manifestent et de quel degré.

4.8.1 La salinisation

La salinisation est due à une trop grande concentration de sels solubles dans le sol. On peut trouver tous les types de sel. Généralement la salinité diminue avec la profondeur (voire paragraphe 3.3.3A). Les sols sableux ont une réaction différente à la salinisation que les sols argileux. Dans les sols sableux il y a moins de particules d'argiles, donc moins de cations sont absorbés et plus de cations sont libres dans la solution de sol. Les cations suivent les mouvements d'eau dans le sol et soudain les symptômes de salinisation peuvent apparaître et disparaître. Aussi il y a une meilleure diffusion dans le profil, donc l'EC est généralement plus bas. Cette liberté des cations est un avantage quand on veut réclamer un sol affecté. Le lessivage des sels est facile. Dans les sols argileux presque tous les cations sont absorbés par les particules d'argile. Les mouvements des cations sont lents et si les mouvements d'eau en haut dominant, les cations s'accumuleront dans les couches de sol en surface. La diffusion dans le profil est très peu, parce que les cations ne sont pas libres et les sols argileux sont moins perméables. L'EC peut monter dans les couches d'accumulation. Le lessivage des sels est difficile.

4.8.2 L'alcalinisation

L'alcalinisation est un phénomène causé par des anions donc son caractère diffère du phénomène précédent qui est causé par des cations. Le pH est augmenté par des (bi-)carbonates. Généralement le pH augmente avec la profondeur mais les extrêmes sont trouvés à la surface des buttes. Les anions ne sont pas absorbés par les argiles et restent libres dans la solution et par cette raison très sensibles aux mouvements d'eau. Ça peut expliquer pourquoi on trouve les pH élevés en profondeur. Les (bi-)carbonates sont transportés avec l'eau d'infiltration. Sur les buttes il n'y a (presque) pas d'infiltration, donc les (bi-)carbonates s'accumulent et le pH monte (voire paragraphe 3.3.3A). Une relation entre l'alcalinité et le type de sol n'est pas assez claire. (voire paragraphe 3.3.5)

4.8.3 La sodisation

Pour la sodisation nous n'avons pas trouvé une préférence de distribution dans le sol (voire paragraphe 3.3.3A). Les sols argileux sont moins sensibles à la sodisation que les sols sableux. Une explication peut être trouvée dans l'équilibre d'absorption des cations par les argiles. Les argiles ont une préférence pour les cations avec une valeur 2+ (comme Ca²⁺ et Mg²⁺). Quand il y a beaucoup d'argiles, les cations 2+ seront absorbés d'abord, mais quand leur concentration dans la solution de sol diminue par rapport au Na⁺, les cations 1+ (comme Na⁺ et K⁺) seront absorbés aussi. Dans le cas où il y a peu d'argiles, plus de Na⁺ restera en solution, donc l'ESP sera élevé. (voire paragraphe 3.3.5, fig. III-6)

Pour des sols sableux le lessivage des sels est facile et sa

texture prévient une détérioration de structure comme on craint souvent dans la réclamation des sols argileux.

4.9 Les effets agronomiques de salinisation, d'alcalinisation et de sodisation

Les phénomènes peuvent avoir des influences néfastes sur les plantes dans tous leurs stades de développement. Pourtant, notre étude agronomique n'était pas assez détaillée pour tirer des conclusions des phénomènes pris isolement ou des conclusions quantitatives. Néanmoins on a vu que les rendements ont baissé fortement. (voire paragraphe 3.4.3)

USDA Handbook no. 60 (1954) montre que les cultures maraichères sont plus sensibles aux sels que le riz. Cette différence est causé surtout par les différentes circonstances sous lesquelles les deux sont cultivés: les cultures maraichères sur une terre avec une contenance en eau inférieur à celle de la pâte saturée et le riz sur une terre avec une contenance en eau supérieur à celle de la pâte saturée.

4.10 Les effets du réaménagement

Quelques caractéristiques du réaménagement sont présentées ci-dessous:

	réaménagé	non-réaménagé
irrigation:	bien réglée	sous-optimale
drainage:	au moins superficiel	manquant ou superficiel
planage:	fait dans un nombre des zones	inexistant
répiquage:	exigé par Retail, recommandé par ARPON	rare

Selon nos observations les phénomènes ne se manifestent pas beaucoup moins dans les zones réaménagées que dans les zones non-réaménagées, sauf si le planage est bien fait dans les zones réaménagées (paragraphe 3.3.3A). Des enquêtes on peut apprendre qu'il existe une régression des effets de salinisation, d'alcalinisation et de sodisation selon les paysans, déjà dès la première année après le réaménagement (paragraphe 3.5.3.3). Peut-être il est trop tôt pour voir les effets du réaménagement, mais il est clair que le planage a un effet positif. D'une part on a besoin de moins d'eau pour inonder toute la parcelle, d'autre part une inondation plus complète peut mieux prévenir l'accumulation des sels sur certaines parties de la surface. Aussi un drainage amélioré, bien qu'une irrigation bien réglée a un effet positif comme déjà conclu dans les paragraphes 3.4 et 3.5.

V RECOMMANDATIONS

Après une étude des causes possibles des phénomènes de la salinisation et de l'alcali(ni)sation on a vu que pas tous les causes ont une influence avec une même intensité. Non plus sont tous les influences très claires. Mais avec certaine prudence on peut dire que les effets d'un mauvais planage et un mauvais drainage sont les plus forts. Une fois qu'on veut commencer à trouver des solutions (phase II) aux problèmes mentionnés, il est à recommander d'étudier les possibilités de changer les effets de ce mauvais planage et en plus de ce mauvais drainage.

Le problème d'un mauvais planage doit être résolu en relation avec l'irrigation. L'irrigation et le planage ont le même objectif en fait: inonder toute la surface d'une couche d'eau. Une bonne gestion de l'eau d'irrigation peut seulement être réalisée en combinaison avec un bon planage. Aussi une compartimentage des parcelles, en combinaison avec planage peut faciliter l'inondation de la surface.

Concernant le drainage pas beaucoup de données quantitatives étaient connues. Pour estimer la quantité de drainage nécessaire à évacuer le surplus de sels, on a besoin d'établir des balances de sel. Pour cela aussi des données d'irrigation sont nécessaires, qui manquent souvent. Comme la quantité de drainage dans nos zones pilotes est nihil et sinon, difficile à mesurer, il nous semble utile de faire des testes de drainage sur des parcelles de teste bien suivies. Pour le drainage on peut également essayer plusieurs méthodes de drainage (tuyaux souterrains, canaux + pompage). Une fois que les quantités de drainage sont estimées par des balances de sel, les meilleures méthodes de drainage peuvent être étudiées pour les différents types de sol.

Il nous semble clair qu'une étude socio-économique sera indispensable ici. Cette étude peut donner des résultats intéressants pour le réaménagement, comme les types de sol bon pour une réhabilitation et des sols moins bon pour une réhabilitation.

Pour des tests à estimer la balance de sel il peut être utile d'installer des tuyaux pour mesurer la profondeur de la nappe phréatique. Il faut noter que les piezomètres mesurent seulement les pressions d'eau à 1,5 et 3,0m de profondeur et la vraie profondeur de la nappe n'est pas connue.

Dans notre étude hydrologique de phase I nous n'avons pas pu expliquer pourquoi on trouve des sites avec un flux d'eau en haut et des sites avec un flux en bas et pourquoi la direction de ce flux peut changer dans le temps. Plus de connaissance sur la remontée capillaire et l'infiltration peut probablement donner plus de perspectives aux solutions de la salinisation et de l'alcali(ni)sation. Les intensités de la remontée capillaire et de l'infiltration sont importants pour la balance de sel. Avec les piezomètres installés on connaît seulement ses influences de 1,5 à 3,0m de profondeur, tandis que l'influence tout près de la surface est plus important. Probablement une série des piezomètres avec

une profondeur entre 0 et 1,5m (0,5m, 1,0m) donne plus d'information.

Il faut trouver des moyens de vider les piezomètres avant chaque prélèvement d'eau afin d'être sûr que l'échantillon est une bonne représentation de la qualité d'eau à cette profondeur.

Certains tests spécifiques pour améliorer le drainage peuvent être exécutés. Une solution possible pourrait être de faire un drainage par pompage pendant une partie de l'année pour faire baisser la nappe phréatique fortement. Si on le faisait à la fin de la saison de riziculture il y aura moins d'évaporation pendant toute la saison sèche et donc moins d'accumulation de sels à la surface.

Une étude plus profonde est nécessaire pour connaître l'existence des aquifères et la qualité d'eau de ces aquifères. Les aquifères avec une mauvaise qualité d'eau sont intéressants si on veut faire un drainage par pompage pendant une partie de l'année, comme proposé ci-dessus. De cette manière on évacue facilement des sels et on réalise un baisse général de la nappe phréatique.

On doit déterminer le niveau critique sous lequel la nappe doit rester pendant une période de l'année afin de prévenir que plus de sels montent à la surface que peuvent être lessivés pendant la saison de pluie et d'irrigation. Le niveau critique peut être déterminé avec l'aide des balances de sel. Si on regarde l'exemple de la balance de sel du G1, on voit qu'il y a un surplus de 120,1 mmho/cm par année. L'EC de l'eau souterraine est environ 1,2 mmho/cm, donc si on peut réaliser un drainage à la fin de la saison de riziculture de 100mm, on est sûr que les phénomènes ne peuvent plus progresser et qu'il y a même une régression, parce que la remontée capillaire diminuera. Dès que les phénomènes sont réduits jusqu'à un niveau acceptable on peut diminuer le drainage et faire augmenter le niveau de la nappe au moment qu'on est arrivé à un équilibre entre les sels qui arrivent et les sels qui sont évacués.

Une autre solution pourrait être de faire une période de lessivage des sels accumulés à la surface, en combinaison de puddelage et drainage, juste avant la saison culturale et les premières pluies, au lieu de laisser descendre ces sels par les premières pluies quand le semis est déjà fait. Si on avait des données quantitatives sur le drainage on pourrait estimer l'intensité et la durée d'une telle opération (par la balance de sel).

Une méthode pour diminuer la remontée capillaire et l'accumulation des sels à la surface pendant la saison sèche peut être l'application d'une couche de mulch sur le sol. Dans les cas où la sodisation est un problème on peut tester si une application de la matière organique peut diminuer l'ESP. La matière organique a un CEC élevé et peut avoir un effet positif.

En faisant ces tests, aussi pendant phase II le réaménagement doit continuer avec planage, éventuellement en combinaison avec compartimentage, car leurs effets positifs sont déjà connus. Pour pas détériorer le drainage on doit éviter qu'un drain est utilisé comme arroseur (ou un arroseur comme drain), comme on fait parfois.

Aussi les résultats d'une étude agronomique sont indispensables

et très importants pour l'étude économique. L'effet de la salinisation et de l'alcali(ni)sation sur les cultures n'est pas devenu très clair dans phase I. Il y avait trop des différences entre les carrés d'observation: des différences entre les variétés de riz, des différentes dates de semis/transplantation, des différentes dates de début d'irrigation, etc. Il est à recommander de continuer cette étude, mais d'augmenter le nombre des carrés et d'essayer de diminuer les influences mentionnées en collaboration avec les paysans.

Aussi dans le reste des continuations des études il faut collaborer étroitement avec les paysans. Ils connaissent bien les problèmes de la salinisation et de l'alcali(ni)sation et ils les prennent très sérieux et ils sont intéressés à trouver une solution efficace.

BIBLIOGRAPHIE

- BEAU Rapport études. Besoin en eau au niveau d'arroseur. Riz et canne à sucre. Office du Niger, Ségou, Mali. Département d'Irrigation et de Génie Civile de l'Université Agricole de Wageningen, 1981.
- Bertrand, R. Sodisation et alcalinisation des sols de l'Office du Niger. Rapport d'une mission d'appui au stage du M. Kabirou N'Diaye, 1985.
- Bolt, G. H., Soil Chemistry, A. Basic Elements. Scientific Bruggenwert, M.G.M. Publications Company Elseviers, Amsterdam, 1978.
- Coulibaly, M. Etude de fertilité des sols du projet Retail. Mémoire de fin d'études. Ecole Supérieure, Bamako, Mali, 1988.
- Coulibaly, M. Etude sur l'alcalinité et la sodicité des sols du projet Retail. Office du Niger, projet Retail, 1989.
- Coulibaly, N. L'impact des remontées salines sur le programme et la production rizicole à l'Office du Niger. Cas de la Zone de Niono. Mémoire de fin d'études, Institut Polytechnique Rural de Katibougou, Mali, 1987.
- Dabin, B. Contribution à l'étude des sols du Delta Central Nigérien. L'Agronomie Tropicale 6, no 11-12, pages 606-637, 1951.
- Dabin, B. Les problèmes d'utilisation des sols à l'Office du Niger. Pages 1165-1176, Doc. 92. 2me Conférence Interafricaine des Sols, Léopoldville, 1954.
- Dembele, S. L'impact des remontées salines sur le programme et la production rizicole à l'Office du Niger; cas de la zone de Niono. Mémoire de fin d'études, Institut Polytechnique Rural de Katibougou, Mali, 1986.
- Dicko, M.K. Etude agropédologique et hydrodynamique des phénomènes de salinisation de l'alcalinisation des terres à l'Office du Niger. Mémoire de fin d'études, Institut Polytechnique Rural de Katibougou, Mali, 1989.
- Diepen, C. van Projet ARPON. Les sols irrigués des casiers rizicoles de l'Office du Niger au Mali. Rapport de mission, 1984.
- Driel, W. van Salinisation, alcalinisation et sodisation des terres de l'Office du Niger (Mali). Rapport de mission. I.E.R., Bamako, Mali, 1989.
- GEAU Rapport final projet gestion de l'eau, Office du Niger, Tome I. Rapport principal sur la gestion de l'eau et l'expérimentation agricole dans le périmètre irrigué de l'Office du Niger. Office du Niger. Université Agricole de Wageningen, 1984.
- ILACO Agricultural Compendium for rural development in the tropics and subtropics. Scientific

- Publications Company Elseviers, Amsterdam, 1980.
- ILRI Drainage principles and applications, publication 16, Vol. III. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, 1980.
- Keita, B. Etude morphopédologique de reconnaissance du Kala inférieur. Office du Niger, I.E.R., 1989.
- N'Diaye, M. K. Evaluation de la fertilité des sols à l'Office du Niger. Contribution à la recherche de causes et origines de la dégradation des sols dans le Kouroumari. Thèse diplôme de docteur-ingénieur. L'Institut National Polytechnique de Toulouse, 1987.
- Office du Niger Rapports agricoles des fins de campagne (1983-1989). Office du Niger, Ségou, Mali.
- Richards, L. A. e.a. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils, USDA Handbook no. 60, revised version 1969. U.S. Salinity Laboratory Staff.
- Sanago, M. K. Note de synthèse sur l'évolution de la sodisation et d'alcalinisation des sols du Kolodougou (K1). Office du Niger, 1988.
- Schreyger, E. L'Office du Niger au Mali. La problématique d'une grande entreprise agricole dans la zone du Sahel. Wiesbaden, 1984.
- SOGREAH Aménagement hydroagricole dépendant du canal du Sahel - Etude de faisabilité. Sogreah Ingénieurs Conseils, Grenoble, 1982.
- Toujan, M. Aménagement hydroagricole dépendant du canal du Sahel. Evolution des sols irrigués. Office du Niger, Rapports 320546 R23 et R29. Sogreah, Grenoble, 1979 et 1980.
- Traoré, O. M. Impact de l'alcali(ni)sation et de la salinisation sur la production rizicole à Niono. Mémoire de fin de cycle. Institut Polytechnique Rural de Katibougou, Mali, 1989.