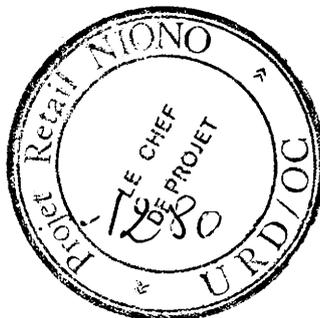




I. E. R
INSTITUT D'ECONOMIE RURALE
DU MALI



H12
Recommandation de l'Etat
du Niger

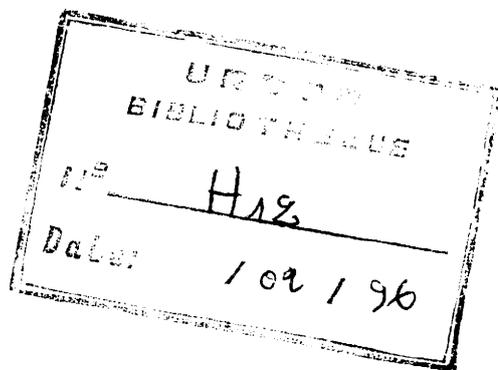
LA DEGRADATION DES SOLS A L'OFFICE DU NIGER

JEAN PIERRE BARRAL & M.K. DICKO

Février 1996

PSI MALI
TRAVAUX ET ETUDES N°1

000/0025

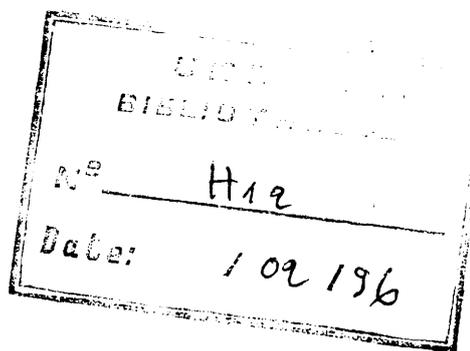


FAC : DECISION 93014800
"STRUCTURE ET ARTICULATION DES RECHERCHES AGRICOLES ET RURALES
EN AFRIQUE SAHARA II - 1995
MINISTERE FRANCAIS DE LA COOPERATION

000

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

LA DEGRADATION DES SOLS A L'OFFICE DU NIGER



Février 1996

J.P. Barral et M.K. Dicko

1. PRÉSENTATION DE L'OFFICE DU NIGER	1
1.1 Géographie	1
1.2 Historique	1
1.3 Climat	1
1.4. Substratum géologique	1
1.5. Les sols	2
1.6. L'irrigation	3
1.7. Le réseau de drainage	3
1.8. Système de culture.	3
2. LES SOLS SALÉS.	5
2.1 Les différents phénomènes de dégradation	5
2.2 Les voies d'évolution de la salinité.	5
2.3 Méthodes de mesure	6
2.3.1. La conductivité électrique.	6
2.3.2. Le pH	6
2.4. Classification des sols salsodiques.	7
2.4.1 La salinité.	7
2.4.2 La sodicité.	7
2.4.3. L'alcalinité.	8
3. LA DÉGRADATION DES SOLS À L'OFFICE DU NIGER	9
3.1. Evolution des sols.	9
3.2 Importance de la dégradation des terres à l'Office du Niger.	10
3.2.1 Etude bibliographique.	10
3.2.2. Enquête réalisée aux mois de septembre 1995.	10
4. LES MÉCANISMES DE LA DÉGRADATION.	15
4.1 Qualité des eaux à l'Office du Niger.	15
4.1.1 Evolution de l'eau d'irrigation.	15
4.1.2. Les eaux souterraines.	17
4.2. Dynamique de la nappe	18
4.2.1 L'évolution de la nappe phréatique sur le long terme.	18
4.2.2 L'évolution saisonnière de la nappe phréatique.	18
4.2.3. Les mesures de conductivité hydraulique.	19
4.3 Les sols.	20
4.3.1 La position topographique.	20
4.3.2 L'importance du flux de remontée capillaire.	20

4.3.3 La capacité d'échange cationique.	21
4.3.4 La structure.	21
4.3.5. Le taux de matière organique.	21
4.3.6. Conclusion	22
4.4 La gestion de l'eau.	22
4.5. Le fonctionnement du drainage.	24
4.6. Elements d'un bilan des eaux.	24
4.6.1. Fonctionnement hydrique des sols.	24
4.6.2. Bilan des eaux.	25
4.6. Les systèmes de culture.	25
4.6.1 La riziculture	25
4.6.2 Le maraîchage	27
4.6.3 La canne à sucre.	27
4.6.4. Autres cultures de diversification	28
4.6.5 Conclusion	28
5. CONCLUSIONS	29
Programme de recherche	29
Objectifs	29
Dispositif expérimental	30
REFERENCES	32
ANNEXE 1: CARTE DE L'OFFICE DU NIGER	
ANNEXE 2: RÉSULTATS DE L'ENQUÊTE PAR VILLAGE.	
ANNEXE 3 : SCHÉMA GÉNÉRAL D'UN CASIER RIZICOLE À L'OFFICE DU NIGER	

1.6. L'irrigation

L'irrigation du delta intérieur du delta intérieur a été rendu possible grâce à la remise en eau des anciens défluent du fleuve Niger que sont le fala de Molodo dans le Kala et le Fala de Boki were dans le Macina.

La construction du barrage de Markala sur le Niger a permis de relever la côte d'eau à un niveau suffisant pour maintenir les canaux en eau pendant l'étiage.

A partir du canal adducteur creusé dans le fala l'irrigation est organisée comme suit:

- les canaux primaires (distributeurs) dominent les rizières de part leur installation sur les levées des berges. Ils ont une longueur variant entre 10 et 20 km subdivisée en biefs permettant d'assurer la maîtrise de l'eau.
- les partiteurs : sur une longueur de 1000 à 1500 mètres traversent la pleine perpendiculairement aux distributeurs
- Les arroseurs arrosent des portions de 15 à 25 ha de part et d'autre du partiteur

Dans certains casiers, on rencontre des sous arroseurs à l'intérieur des parcelles de 1 à 2 ha.

1.7. Le réseau de drainage

Le réseau de drainage existant a été conçu pour l'évacuation des eaux excédentaires des parcelles, et ne permet pas un drainage profond.

Cette situation est expliquée par deux raisons (Bertrand, 1993):

- la profondeur des nappes, au moment des aménagements, à au moins une vingtaine de mètres.
- les normes d'irrigation du coton (principale culture de l'époque) ne favorisant pas un relèvement rapide de la nappe.

Mais la culture du riz se généralisa au détriment de celle du coton et entraîna la submersion quasi permanente des champs. Cette situation a favorisé la remontée rapide des nappes, affleurantes en hivernage et à environ 2 2 mètres de profondeur en fin de saison chaude.

1.8. Système de culture.

Dans les zones non encore touchées par le réaménagement, la culture du riz reste peu intensifiée, avec un itinéraire du type :

- labour et hersage après les premières pluies (ou après la préirrigation si le planage le permet)
- semis à la volée en sec
- variétés photosensibles à cycle long
- levée sous pluie, ou sous irrigation si le planage n'est pas trop déficient.
- fertilisation organique quasi-inexistante, alors que la fertilisation minérale est systématique.

Les rendements obtenus sont de l'ordre de 2 t/ha.

Le système de culture a pu s'intensifier dans les zones réhabilitées, et de plus en plus dans les zones non réhabilitées étant donné la réussite de ce nouvel itinéraire technique. Il est caractérisé par :

- la préirrigation systématique
- l'utilisation de variétés à paille courte non photosensible
- le repiquage
- de fortes fumures minérales.

Cette sédimentation serait intervenue à la suite d'une alternance de périodes arides et humides au Quaternaire. Les systèmes dunaires mis en place pendant cette période auraient barré le passage au fleuve changeant son cours vers la direction Nord-Nord/Est tandis que se poursuivait le colmatage des fossés d'effondrement précédant le percement du seuil de Tossaye et la formation du deuxième erg de Sokolo. Cela a entraîné l'exondation de cette partie du delta.

1.5. Les sols

De leur formation à nos jours, les sols du delta intérieur ont très peu évolué du fait de l'aridité du climat auxquels ils sont soumis. Les variations superficielles souvent observées sont plutôt liées à la nature variable des alluvions qu'à un processus pédogénétique. Les sols de l'Office du Niger sont pauvres en matière organique (0,4% pour les Seno et Danga à 1% pour les sols plus lourds, Dian et Moursi), celle-ci est peu évoluée. Dans le delta vif par contre, la végétation de graminées recouvrant les Boi fing leur confère une teneur plus élevée en matière organique (2%) .

Les premières cartographies ont proposé une classification vernaculaire basée « essentiellement sur l'aspect du sol et tenant compte beaucoup plus des propriétés structurales, de la couleur et du microrelief des sols que de leur composition granulométrique réelle » (Dabin, 1951).

Une nouvelle cartographie a fait l'objet de l'étude morphopédologique du Kala inférieur au 1/20 000 (Keita et al. 1991) mais la classification vernaculaire reste la plus utilisée malgré la confusion qu'elle peut créer.

Tableau 1.1 : Répartition des surfaces par type de sol dans le Kala Inférieur (Keita et al, 1991)

Zones	Répartition des sols (%)							
	C1	C2F	C2L	L2	L1	S2	S1	La
Niono	31	4	16	14	7	7	4	2
Molodo	12	6	8	26	34	10	4	0
Ndébouyou	15	23	17	24	23	7	3	9
Total	19	11	13	22	20	8	4	4

L'étude morphopédologique (Tableau 1.1) des sols du Kala inférieur a proposé la classification suivante:

- C1: vertisols à drainage externe nul ou réduit, à structure arrondie (Moursi, Dian-Moursi)
- C2F: vertisol à drainage externe nul ou réduit à structure grossière (Dian);
- C2L: sols hydromorphes peu humifères à tendance vertique, faiblement alcalisés (Dian);
- L2: sols hydromorphes peu humifères à gley oxydé associés à des amphigley à nappe perchée (Danga, Danga blé, Danga fing);
- L1: sols hydromorphes peu humifères à gley oxydé de profondeur (Danga, Danga blé);
- S2, S1, La: sols hydromorphes à gley profond et à fort battement de nappe (Seno, Danga blé);
- Q1: sols hydromorphes peu oxydés à gley plus ou moins profond et à fort battement de nappe (Seno, Danga blé).

Par rapport à la riziculture ces sols sont repartis en quatre grands groupes:

* Groupe I: C1, C2F, C2L: Faible teneur en matière organique; sensibilité à l'alcalinisation et à la sodisation; drainage difficile à contrôler; nappe très peu profonde; très forte cohésion dans l'ensemble du profil; dégradation consécutive à l'alcalinisation et à la sodisation; pH élevé.

* Groupe II: L2, L1: Très peu de contrainte majeures.

* Groupe III: S2, S1, La: Texture grossière; perméabilité relativement élevée; faible fertilité; alcalinisation et/ou sodisation.

* Groupe IV: Q1 : Matériau très filtrant; position topographique élevée.

1. Présentation de l'Office du Niger

1.1 Géographie

Le delta central nigérien où se situe l'Office du Niger s'étend dans la direction Nord-Est de Sansanding à la région des lacs. Il est limité au Sud et à l'Est par le Niger; à l'ouest par le marigot de Molodo. Au Nord du Kouroumari par la banquette gréseuse de Sokolo.

Un autre défluent, le marigot de Boki-were chemine parallèlement au fleuve et va se jeter dans la région du Macina.

De part leur état hydrologique deux parties distinctes composent le delta:

- à l'est le delta vif actuellement inondé couvrant les régions du Macina et du Diaka
- les plaines septentrionales asséchées depuis longtemps appelées delta mort abritant les provinces du Kala, Kouroumari et du Méma farimaké.

1.2 Historique

Le 5 Janvier 1932, est créé dans le Soudan français un vaste édifice agro-industriel avec pour vocation la culture du coton pour rompre la dépendance des industries textiles françaises avec l'étranger. Ainsi, le riz n'était cultivé à l'Office du Niger que pour satisfaire les besoins alimentaires de indigènes colons. Cette situation a perduré même après les indépendances. En effet ce n'est qu'en 1971 que la culture du riz se généralisa avec l'abandon du coton pour des raisons agro-économiques.

En 1961, soit une année après l'indépendance l'Office du Niger est revenu à l'état malien pour devenir de nos jours une Entreprise Publique à caractère Industriel et Commercial (EPIC).

Devant les faibles rendements et la dégradation du réseau, des plans de redressement de l'Office du Niger ont été élaborés à partir de 1978. Ces plans donnaient la priorité à la réhabilitation en vue de l'intensification de la riziculture sur les casiers existants. Ces réhabilitations furent accompagnées de mesures socio-économiques (suppression de la police économique, création d'associations villageoises) qui ont permis une amélioration spectaculaire des rendements.

1.3 Climat

Le climat semi-aride (300 à 600mm) comporte une seule et courte saison des pluies de juin à septembre avec une longue et pénible saison sèche. On enregistre une très grande variabilité spatiale et temporelle de la pluviosité.

La moyenne annuelle des températures est d'environ 27°C.

Les hautes températures, la faible pluviométrie et la forte évapotranspiration sont à l'origine du bilan hydrique largement déficitaire sur toute l'année sauf en Août où l'on enregistre la plus forte pluviométrie mensuelle.

1.4. Substratum géologique

Le Niger en se retirant au quaternaire a laissé une vaste zone alluviale dont l'épaisseur ne dépassant pas 5 à 6 mètres dans le Kala, atteint 20 mètres et plus dans le Méma. Cela a favorisé la formation de sols de composition granulométrique très variée dépendante des conditions de sédimentation. Les alluvions sont essentiellement constituées de quartz, d'argile kaolinique, d'opale et d'oxydes ferrugineux.

Les sables dunaires se sont formés sur les berges et dans les vallées, les éléments plus fins : argiles et sables fins.

Ndiaye (1987) rapporte la succession des strates définie par Palausi.

Les schistes de Toun, anciens de 400 millions d'années proviennent d'une sédimentation marine. Ils sont recouverts par les grès de Koutiala et Bandiagara. De cette période à l'ère secondaire, aucune sédimentation ne s'est effectuée. Ce n'est qu'après qu'on assistât à la formation des dépôts argilo sableux du continental intercalaire et du continental terminal qui supportent depuis le Quaternaire, les alluvions fluviales du Niger. Les sables éoliens qui se sont formés en dernier ressort sont un remaniement d'alluvions sableuses.

Des rendements de 5 à 6 t/ha pour les zones réhabilitées, de 3 à 4 t/ha dans les zones non réhabilitées sont ainsi obtenus.

Tableau 1.2 : Evolution des superficies cultivées en riz, production et rendement de l'Office du Niger depuis 1982/83* (Office du Niger, Direction Générale).

Campagnes	Superficies (ha)	Production (t de paddy)	Rendement moyen (kg de paddy/ha)
1982/83	35 1881	56 524	1 607
1983/84	36 920	64 663	1 751
1984/85	38 154	64 086	1 680
1985/86	39 433	82 957	2 104
1986/87	39 910	88 011	2 205
1987/88	42 125	98 194	2 331
1988/89	43 352	97 796	2 256
1989/90	44 251	106 593	2 409
1990/91	43 872	143 938	3 281
1991/92	44 435	180 909	4 071
1992/93	44 843	208 541	4 650
1993/94	45 442	222 634	4 899

* Les cultures hors-casiers et contre saison ne sont pas prises en compte.

2. Les sols salés.

2.1 Les différents phénomènes de dégradation

Il est important de distinguer les différents phénomènes qui peuvent intervenir lors de la dégradation des sols irrigués :

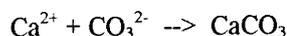
- La salinisation consiste en l'accumulation de sels solubles (essentiellement NaCl) dans le profil du sol. Cette accumulation entraîne une augmentation du potentiel de l'eau présente dans le sol, qui est d'autant plus difficile à mobiliser par la plante. Des phénomènes de toxicité peuvent aussi apparaître vis à vis de différents ions (chlorure, bore). La salinisation se manifeste par une forte conductivité électrique, et parfois l'apparition d'efflorescences blanches si la concentration des sels est importante. Le pH des sols salins est neutre. La salinité des sols est un problème bien connu qui affecte la plupart des périmètres irrigués en zone aride.
- La sodisation provient de la fixation de sodium sur le complexe adsorbant des argiles. La structure du sol se dégrade sous l'action du sodium; il devient compact et imperméable, entraînant l'asphyxie de la plante. Le sodium a de plus un effet toxique sur la plante. Sa détection nécessite la mesure du sodium fixé sur le complexe adsorbant du sol (ESP) ou présent dans l'eau du sol (SAR). La dégradation causée par la sodisation affectant la structure du sol, elle est difficilement réversible, et à un coût très élevé.
- Un sol alcalin est caractérisé par une réaction basique avec un pH situé entre 7,2 (très légèrement alcalin) et 10,5 (très fortement alcalin). Un pH supérieur à 8,5 entraîne des problèmes de toxicité et de carences induites (zinc, phosphore) et une baisse de la quantité de matière organique.
- Le phénomène d'alcalinisation peut être couplé à la sodisation du sol. On parle alors de sols à alcali, qui présentent une structure dégradée (soit massive, soit en prismes compacts) et un pH de l'extrait de pâte saturée supérieur à 8,5 (Van Hoorn, 1994) ou 8,2 (Abrol and al, 1988).

2.2 Les voies d'évolution de la salinité.

Dans les milieux arides, la solution du sol tend à se concentrer sous l'effet de l'évaporation et du prélèvement d'eau par les plantes. Au cours de cette concentration, la salinité augmente et la composition relative en ions de la solution peut évoluer si des phénomènes de précipitation apparaissent.

L'ordre de précipitation des différents minéraux (fonction de leur produit de solubilité) est le suivant : la calcite (CaCO₃), la magnésite (MgCO₃) et le gypse (CaSO₄).

La réaction de précipitation de la calcite est la suivante :



Lors d'un processus de concentration en présence de précipité, les activités de ces deux éléments ne peuvent augmenter simultanément. Si l'alcalinité (c'est à dire la concentration en espèces carbonatées) est supérieure aux équivalents calcium, l'alcalinité augmente avec la concentration des eaux, alors que la solution s'appauvrit en calcium.

Le critère pour décider de la voie d'évolution de la solution après précipitation de la calcite est appelé l'alcalinité résiduelle calcite, qui s'écrit.

$$\text{Alc. rés. calcite} = \text{Alcalinité} - 2\text{Ca}$$

Lorsque l'alcalinité résiduelle calcite est positive, la concentration en calcium diminue, tandis que la concentration en sodium, qui n'intervient dans aucune précipitation, augmente. La solution s'enrichit en sodium par rapport au calcium et voit son SAR augmenter, il y a progressivement saturation du complexe d'échange en sodium. On parle de voie alcaline, aboutissant à un phénomène couplé d'alcalinisation/sodisation (Cheverry, 1974; Servant, 1975).

Si en revanche l'alcalinité résiduelle calcite est négative, la concentration en calcium augmente et l'alcalinité diminue, la solution est dominée par les sels neutres; on parle de voie saline neutre, aboutissant à la salinisation. Ce critère peut être généralisé pour prévoir l'évolution de la solution du sol lors de la précipitation d'autres minéraux (Droubi et al, 1980).

2.3 Méthodes de mesure

2.3.1. La conductivité électrique.

La conductivité électrique (CE) d'un extrait de sol étant liée à la concentration saline du sol, on utilise couramment la CE pour évaluer la salinité d'un sol (unité : 1 dS/m = 1 mmho/cm).

On peut mesurer la CE d'extrait de sol à différents niveaux de saturation :

- La mesure de la CE de l'extrait de pâte saturée (CE_e) sert de référence pour la tolérance des différentes plantes, et est usuellement utilisée pour définir la gamme de salinité du sol.
- Comme l'extrait de pâte saturée demande une préparation laborieuse, on peut effectuer en routine la mesure de la CE d'extrait sol-eau dilués : 1 / 1 (100 g de sol pour 100 g d'eau), 1 / 2 (100 g de sol pour 200 g d'eau), 1 / 2,5 rapport le plus utilisé pour les analyses au Mali.

Dans le cas de sels très solubles (sels de chlorure), la CE est inversement proportionnelle à la teneur en eau. On aura alors une relation **théorique** :

$$CE_{1/n} = (CE_e \times HS) / 100 n \quad (1)$$

où HS est l'humidité à saturation en %.

Si des sels peu solubles sont présents dans les sols (calcite, gypse), ce qui est le cas au Mali, les conversions sont plus hasardeuses. En effet, une augmentation de l'apport d'eau entraînera la dissolution d'une quantité plus importante de sel. La concentration en sel sera la même quel que soit le rapport sol/eau car le sel s'équilibre avec la solution.

On pourra alors avoir un complexe d'échange saturé à plus de 100%, à cause des ions Ca²⁺ libérés par le gypse ou la calcite.

Il faut donc établir une relation expérimentale entre la CE_e et la CE_{1/n} valable pour le type de salinité présente au Mali. Dans le cas des sols de la vallée du fleuve Sénégal (Le Brusq et al., 1981), cette relation expérimentale est loin de vérifier la théorie présentée en (1).

2.3.2. Le pH

La mesure du pH est un paramètre important dans le diagnostic de la dégradation d'un sol. Des valeurs de pH élevées peuvent influencer le comportement physico-chimique du sol indépendamment de la sodicité (dissolution de la matière organique provoquant l'apparition de salants noirs).

Dans les sols à alcali, il existe en général une relation entre le pH_s (pH de l'extrait de pâte saturée) et l'ESP (Tableau 2.1)

Tableau 2.1 : pH de l'extrait de pâte saturée et ESP approximatif (Abrol and al, 1988).

pH _s	ESP approximatif
8,0 - 8,2	5 - 15
8,2 - 8,4	15 - 30
8,4 - 8,6	30 - 50
8,6 - 8,8	50 - 70
8,8	70

La valeur du pH dépendra du rapport de dilution sol / eau de la préparation. Dans un sol à alcali, à un pH_s de 8,2 correspondra un pH de l'extrait 1 / 2 de 9 (Abrol and al, 1988).

De plus, la valeur du pH dépendra de la pression partielle en CO₂. La valeur du pH mesurée sur un extrait de pâte saturée est fonction de l'état d'aération de cet extrait.

Il faut donc spécifier clairement les conditions opératoires de la mesure du pH, et si possible procéder à des mesures de pH in situ qui permettent, de par leur comparaison avec le pH labo, de juger de l'état d'aération du sol.

2.3 Méthodes de mesure

2.3.1. La conductivité électrique.

La conductivité électrique (CE) d'un extrait de sol étant liée à la concentration saline du sol, on utilise couramment la CE pour évaluer la salinité d'un sol (unité : 1 dS/m = 1 mmho/cm).

On peut mesurer la CE d'extraits de sol à différents niveaux de saturation :

- La mesure de la CE de l'extrait de pâte saturée (CE_e) sert de référence pour la tolérance des différentes plantes, et est usuellement utilisée pour définir la gamme de salinité du sol.
- Comme l'extrait de pâte saturée demande une préparation laborieuse, on peut effectuer en routine la mesure de la CE d'extraits sol-eau dilués : 1 / 1 (100 g de sol pour 100 g d'eau), 1 / 2 (100 g de sol pour 200 g d'eau), 1 / 2,5 rapport le plus utilisé pour les analyses au Mali.

Dans le cas de sels très solubles (sels de chlorure), la CE est inversement proportionnelle à la teneur en eau. On aura alors une relation **théorique** :

$$CE_{1/n} = (CE_e \times HS) / 100 n \quad (1)$$

où HS est l'humidité à saturation en %.

Si des sels peu solubles sont présents dans les sols (calcite, gypse), ce qui est le cas au Mali, les conversions sont plus hasardeuses. En effet, une augmentation de l'apport d'eau entraînera la dissolution d'une quantité plus importante de sel. La concentration en sel sera la même quel que soit le rapport sol/eau car le sel s'équilibre avec la solution.

On pourra alors avoir un complexe d'échange saturé à plus de 100%, à cause des ions Ca²⁺ libérés par le gypse ou la calcite.

Il faut donc établir une relation expérimentale entre la CE_e et la CE_{1/n} valable pour le type de salinité présente au Mali. Dans le cas des sols de la vallée du fleuve Sénégal (Le Brusq et al., 1981), cette relation expérimentale est loin de vérifier la théorie présentée en (1).

2.3.2. Le pH

La mesure du pH est un paramètre important dans le diagnostic de la dégradation d'un sol. Des valeurs de pH élevées peuvent influencer le comportement physico-chimique du sol indépendamment de la sodicité (dissolution de la matière organique provoquant l'apparition de salants noirs).

Dans les sols à alcali, il existe en général une relation entre le pH_s (pH de l'extrait de pâte saturée) et l'ESP (Tableau 2.1)

Tableau 2.1 : pH de l'extrait de pâte saturée et ESP approximatif (Abrol and al, 1988).

pH _s	ESP approximatif
8,0 - 8,2	5 - 15
8,2 - 8,4	15 - 30
8,4 - 8,6	30 - 50
8,6 - 8,8	50 - 70
8,8	70

La valeur du pH dépendra du rapport de dilution sol / eau de la préparation. Dans un sol à alcali, à un pH_s de 8,2 correspondra un pH de l'extrait 1 / 2 de 9 (Abrol and al, 1988).

De plus, la valeur du pH dépendra de la pression partielle en CO₂. La valeur du pH mesurée sur un extrait de pâte saturée est fonction de l'état d'aération de cet extrait.

Il faut donc spécifier clairement les conditions opératoires de la mesure du pH, et si possible procéder à des mesures de pH in situ qui permettent, de par leur comparaison avec le pH labo, de juger de l'état d'aération du sol.

2.4. Classification des sols salsodiques.

Deux grands types de sol salsodiques peuvent être définis à partir de critères sur la salinité et la sodicité :

- **Les sols salins** : caractérisés par leur richesse en sels solubles et leur structure conservée. Selon le type anionique de la salure, on peut distinguer *les sols salins à complexe calcique* (ESP<15%) et *les sols salins à complexe sodique* (ESP>15%). Pour ces derniers, malgré l'importance du sodium échangeable, la présence d'une solution fortement concentrée empêche la défloculation.
- **Les sols à alcali** : caractérisés par un ESP supérieur à 15%, une structure dégradée par alcalisation, et le plus souvent un pH très élevé, pouvant atteindre des valeurs de 9-10.

Pour chacun des trois phénomènes de dégradation liés à la salinisation, il existe une classification qui permet de juger de l'importance du phénomène considéré.

2.4.1 La salinité.

La classification la plus courante pour juger du degré de salinité d'un sol se base sur la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturé (tableau 2.2).

La classification utilisée par le laboratoire des sols de Sotuba (Tableau 2.3), n'est, à notre connaissance, pas justifiée par des relations expérimentales comparant la CE_e avec la CE_{1/2,5}.

Tableau 2.2: Classification des sols salés (Van Hoorn, 1994).

CE _e (dS/m)	Classification	Effet sur le rendement des cultures
0 - 2	Non salin	Effet négligeable
2 - 4	Légère salinité	Cultures sensibles affectés
4 - 8	Salin	Beaucoup de cultures affectés
8 - 16	Forte salinité	Seules les cultures tolérantes produisent
> 16	Salinité excessive	Quelques cultures très tolérantes peuvent produire.

Tableau 2.3 : Classification des sols salés du laboratoire des sols de Sotuba.

CE _{1/2,5} (dS/m)	Classification (Sotuba)
0 - 0,1	Non salin
0,1 - 0,4	Peu salin
0,4 - 1	salin
> 1	très salin

Là encore apparaît la nécessité d'établir une relation expérimentale sur un extrait sol/eau faisable en routine permettant de juger de la salinité d'un sol et d'apprécier si ce pourra être un facteur limitant pour la culture.

2.4.2 La sodicité.

Le sodium échangeable affecte la croissance des plantes de deux façons : il cause des problèmes de toxicité et dégrade la structure du sol. Excepté pour des cultures très sensibles au sodium (citronnier, noisetier), la dégradation de la structure du sol sous l'action du sodium a une influence prépondérante sur les rendements.

La valeur de l'ESP au-delà de laquelle la structure du sol se dégrade (effet de seuil) dépend notamment de la texture du sol considéré et de la minéralogie des argiles présentes.

Habituellement, on retient la valeur intermédiaire de 15% (Servant, 1975; Van Hoorn, 1994).

De récentes recherches (Sumner, 1993) ont néanmoins montré que la dispersion des argiles, une des causes de la baisse de perméabilité en milieu sodique, peuvent survenir pour des valeurs d'ESP faibles, si la solution percolante est faiblement concentrée.

2.4.3. L'alcalinité.

De façon préliminaire, le laboratoire de Sotuba a développé une classification portant sur l'alcalinité à partir de valeurs du pH mesurées sur des extraits 1 / 2,5 (tableau 2.4), et qui tient compte de la dynamique du processus d'alcalinisation / salinisation.

Tableau 2.4 : Classification de l'alcalinité des sols.

Classification	pH 1/2,5
sol neutre	< 6,5
sol en cours d'alcalinisation	6,5 - 8,1
sol alcalin	8,1 - 9
sol très alcalin	> 9

Comme pour l'interprétation des valeurs de conductivité électrique, cette classification est beaucoup plus sensible que ce qui existe dans la littérature. La limite d'alcalinisation est généralement prise à 8,5 et ceci pour le pH de l'extrait de pâte saturé. On a vu que cette valeur était supérieure pour un plus grand rapport de dilution (8,8 pour le pH 1/2,5 dans Bertrand, 1981). De plus, l'appellation 'en cours d'alcalinisation' préjuge de l'évolution du phénomène.

3. La dégradation des sols à l'Office du Niger

3.1. Evolution des sols.

L'évolution des sols à l'Office peut être suivie grâce aux différentes missions pédologiques qui se sont succédées sur les terres du Delta, d'avant leur mise en eau à aujourd'hui.

Dabin en 1951 notait que les terres du delta intérieur ne sont pas sodiques en raison de la faible teneur en Na échangeable qu'on y rencontre (1 pour mille). Cependant, il expliquait la faible stabilité structurale de certains sols (Danga) par le faible taux de calcium sur le complexe d'échange.

Après Dabin, la première étude pédologique à l'ON fut celle de Toujan en novembre 1980. Cette mission avait pour objet de comparer les résultats d'analyse de 1980 à celle de 1951 réalisées par Dabin. Pour cela, des prélèvements de sol (sur 16 sites) ont été effectués à l'emplacement des prélèvements effectués 30 ans plus tôt par Dabin, et ils ont été analysés par des méthodes aussi proches que possible de celles utilisées par Dabin.

La mission est arrivée à la conclusion que les sols de l'ON ont évolué vers une dégradation par la détérioration de certains paramètres physiques et chimiques, notamment:

- chute de la perméabilité d'environ 300%;
- diminution de 50% du taux d'agrégats stables;
- augmentation de 200 % du sodium échangeable (qui peut localement évoluer autour de 15 % de la capacité d'échange);
- augmentation du pH d'une unité pouvant localement dépasser 8.5 en relation avec sodium;

Bertrand en 1986 concluait qu'une évolution aussi rapide des sols du delta intérieur du Niger vers le pôle alcalin sodique mettrait « en péril la pérennité de l'ON et de façon plus alarmante le complexe sucrier de Dougabougou » si des dispositions d'étude interdisciplinaires n'étaient pas entreprises avant quinze ou vingt ans.

Selon lui, deux phénomènes auraient concouru à cette dégradation rapide et catastrophique des sols de l'Office du Niger.

L'eau du Niger est déséquilibrée vers le pôle carbonaté bien que faiblement minéralisée. En se concentrant par évaporation elle devient sodique ($SAR > 1,2$) et salée ($CE > 1,5 \text{ mmho/cm}$)

Les eaux de nappe sont nettement plus minéralisées, plus sodiques ($SAR_{adj} > 30$) et salées. Il émet l'hypothèse que lors de sa remontée la nappe aurait traversé des couches sodiques de certaines alluvions qui les ont enrichi en sels.

Ainsi la résolution du problème réside d'une part dans un drainage profond efficace pour maintenir la nappe à un niveau permettant de limiter les remontées capillaires, et d'autre part dans l'apport d'amendement calciques dans l'eau d'irrigation et sur les sols dégradés.

N'diaye M.K. (1987) dans sa recherche de causes de la baisse de fertilité des sols du Kouroumari a confirmé le caractère évolutif de la dégradation par sodisation de ces sols. L'utilisation d'un modèle de concentration de l'eau du Niger a permis d'identifier comme cause de la dégradation la qualité de l'eau du Niger, soumise à une concentration importante du fait d'un mauvais drainage.

Les contraintes pédologiques à la production de la canne à sucre ont été étudiées par Sidibé (1987). Des tâches stériles dues à l'alcalinisation-sodisation sont une des contraintes majeures. Elles sont liées à un engorgement temporaire qui provoque une concentration des sels, essentiellement du sodium.

La zone de production rizicole de Niono a été étudié par Dicko M.K. (1989), Ndiaye et al. (1990), Trea et al (1989). Les zones de maraichage sont plus affectées que les zones de riziculture. Le phénomène d'alcalinisation-sodisation a été identifiée sur les buttes difficilement irrigables en riziculture, et sur deux secteurs maraichers où la nappe reste proche de la surface durant toute la saison de culture.

Les résultats d'analyse de sol de N'diaye et al (1990) et de Coulibaly M. (1988) montrent qu'il s'agit d'un phénomène d'alcalinisation/sodisation. On observe une augmentation concomitante du pH et de l'ESP. les échantillons de sol ayant un pH supérieur à 8 ont aussi une ESP supérieur à 10.

La mission de Van Hoorn (1992) avait pour objet d'évaluer la phase d'identification des problèmes de salinisation et d'alcalinisation des sols de l'Office du Niger réalisée par N'diaye et al. en 1990.

Selon lui, avec le niveau d'intensification actuelle permettant d'atteindre des rendements de plus de cinq tonnes par hectare, « il n'est pas du tout sûr que ces phénomènes aient un caractère évolutif » et que « l'état actuel des terres quant à l'alcalinité et à la sodicité ne présente pas un obstacle essentiel à la monté des rendements ». La situation serait stable depuis longtemps par le fait que:

- la nappe est proche de la surface depuis 25 ans;

- il existe un lessivage faible mais suffisant qui va limiter la concentration de l'eau irrigation à un SAR inférieur à 5. Localement ce lessivage sera moins important sur les points hauts ne recevant pas suffisamment d'eau et là où une couche argileuse peu perméable limitera la percolation.

Ces hypothèses sur le fonctionnement de la nappe assurant un lessivage suffisant restent à confirmer.

3.2 Importance de la dégradation des terres à l'Office du Niger.

3.2.1 Etude bibliographique.

Dabin (1951) et Aubert avaient déjà remarqué des tâches à salants noirs près de Kokry (dans le Macina) et Niono (dans le Kala inférieur). Mais c'était un phénomène alors très localisé car la plupart des sols avait un pH neutre à acide.

Une enquête agronomique effectuée par N'diaye (1987) a montré que l'importance de la dégradation dans le Kouroumari est fonction de l'âge d'apparition des problèmes. Ainsi existe-t-il des villages où la proportion des terres affectées peut être relativement importante. Cependant les superficies dégradées dans cette zone de l'ON sont assez modestes tandis que 10% des terres du complexe sucrier sont dégradées.

Une enquête agronomique a été effectuée par N'diaye et al. (1990) concernant sept villages de la zone repartis entre les distributeurs Retail, Kolodougou et Gruber.

Elle révèle que 7% des rizières sont dégradées ou en cours de l'être, et cette proportion passe à 24% s'agissant des zones de maraîchage.

L'étude morphopédologique du Kala inférieur (Keita et al, 1991) a donné lieu à un nombre importants de prélèvements. Les conclusions (Bertrand et al., 1993) sont les suivantes : environ 30% des terres ont un pH voisin de 8 entre 20 et 40 cm et plus de 50% ont un pH supérieur à 8 entre 50 et 100 cm. Ce sont les sols de cuvette les plus affectées par les phénomènes d'alcalinisation, et le pH augmente avec la profondeur. Localement les sols de levée sont sodisés.

Les pertes économiques se font sentir nettement sur la canne à sucre dont les rendements chutent de 75t/ha à 25t/ha dès les premières repousses.

3.2.2. Enquête réalisée aux mois de septembre 1995.

Cette enquête a été conduite durant le mois de septembre, par 10 enquêteurs répartis sur trois zones.

Le but principal de cette enquête était de connaître l'importance des superficies affectées par le phénomène de dégradation. **Par superficies affectées, nous entendons les zones où apparaissent des efflorescences (ségué en Bamanan) au cours de l'année. C'est un indicateur qualitatif de la présence d'une dégradation. Les superficies réellement touchées par le phénomène d'alcalinisation-sodisation peuvent donc être plus importantes.** En effet, l'apparition des efflorescences est notamment conditionnée par une humidité du sol suffisamment de la saturation associée à un processus de remontées capillaires; la solution du sol pourra être suffisamment concentrée pour provoquer des problèmes agronomiques sans pour autant que des efflorescences apparaissent. Les paysans citent notamment certains problèmes qui peuvent être induits par la dégradation : sol dur, non réponse du riz à l'apport d'engrais.

Cette enquête se voulait exhaustive sur ces zones. Cependant, le nombre important de non-résidents (30% sur le Retail), l'absence des paysans, et le temps relativement court imparti à l'enquête fait que de 55% à 65 % des surfaces a été enquêté suivant les zones. On peut supposer que cela n'introduit pas de biais dans l'estimation

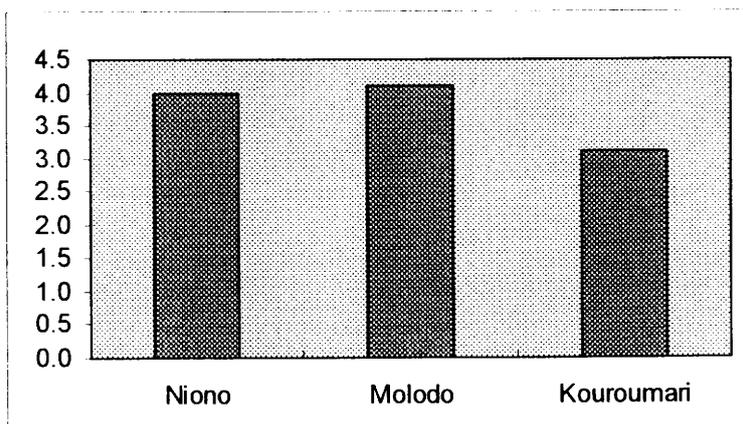
des superficies affectées par la dégradation au sein d'une zone. Néanmoins, dans quelques villages situés dans le Kouroumari, le pourcentage des exploitants enquêtés est tellement faible qu'on ne peut pas considérer l'échantillon comme représentatif (ces villages, situés à côté d'une grosse agglomération, ont une proportion de non-résidents importante). Pour les résultats détaillés par village, voir en Annexe 1.

A. Riziculture

- Superficies affectées

Le pourcentage de superficies cultivées en riziculture (figure 3.1) affectées varie peu suivant les zones. Il vaut 4,4 % sur la zone de Niono, 4,1 % dans la zone de Molodo, et 3,1 % dans le Kouroumari. En revanche, on constate une grande variabilité inter-villages. Certains comme Molodo I ont 15 % de leur surface où apparaissent des efflorescences. D'autres ne sont pratiquement pas touchés par le phénomène.

Figure 3.1: Superficie affectée, en pourcentage de la superficie enquêtée.



Ce pourcentage moyen de 4 % est inférieur à la valeur de 7 % trouvée précédemment (N'diaye et al., 1991). Dans l'enquête de N'diaye et al, les villages choisis sont parmi ceux qui sont le plus affectés. On observe néanmoins que pour deux villages du partiteur KL, Kolodougou et Gnoumanké, cette enquête trouve 5% des rizières affectées, et l'enquête précédente 13%. Cela peut s'expliquer par la pratique du repiquage maintenant répandue dans toute la zone de Niono. En effet pour préparer le repiquage, le paysan maintient une lame d'eau sur la parcelle, ce qui n'était pas le cas pour un semis direct. Ainsi un lessivage des sels est mieux assuré par le repiquage et la submersion diminue la basicité du sol.

- Position des efflorescences

Les efflorescences apparaissent systématiquement sur les buttes (98 % des avis), et les paysans préconisent une submersion de ces parties ou le maintien en permanence d'une lame d'eau pour remédier à leur apparition .

- L'effet du réaménagement

Le Retail réaménagé est légèrement plus affecté que les zones non réaménagées (figure 3.2) (dont en particulier le Retail non réaménagé). Or la plupart des paysans s'accordent à dire que le réaménagement permet de diminuer la surface des efflorescences en permettant la submersion des buttes. Pour expliquer cette contradiction, on peut avancer que le réaménagement a permis de mettre en culture des zones hautes, auparavant délaissées, où se posent particulièrement des problèmes de dégradation. Venant confirmer cette hypothèse, on observe certaines zones au sein du Retail où les efflorescences sont apparues depuis peu de temps.

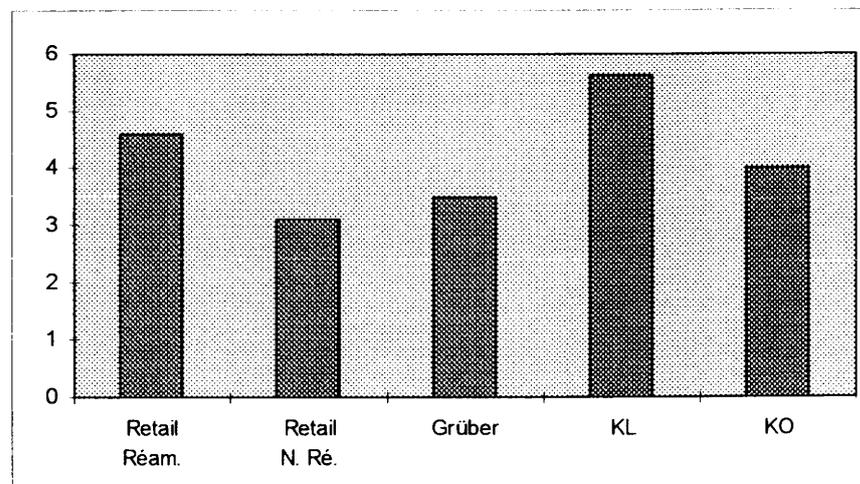
Au sein du Retail deux villages, N9 et N10, sont très affectés par les problèmes de dégradation, pour des raisons qui restent à élucider (figure 3.3).

Le partiteurs KL est le plus affecté. Il a été réaménagé par ARPON en 82 sans planage, et sur ce partiteur prédomine des sols de levées sablo-limoncux.

Le partiteur KO, présentant les mêmes sols que le KL, est moins affecté que ce dernier. Il a bénéficié d'un réaménagement ARPON avec planage.

Le Grüber, récemment raménagé par ARPON avec planage, est moins affecté que les autres parties de la zone de Niono.

Figure 3.2. Superficie affectée dans la zone de Niono, en pourcentage de la superficie enquêtée



En conclusion, l'effet du réaménagement est peu perceptible dans les chiffres. Le planage a eu des effets positifs selon l'avis de tous les paysans. Néanmoins, l'utilisation de cet indicateur ne permet pas de juger du changement de dynamique provoquée par la réhabilitation. La disparition d'efflorescences ne veut pas dire qu'on a créé une dynamique plus favorable à la conservation des sols.

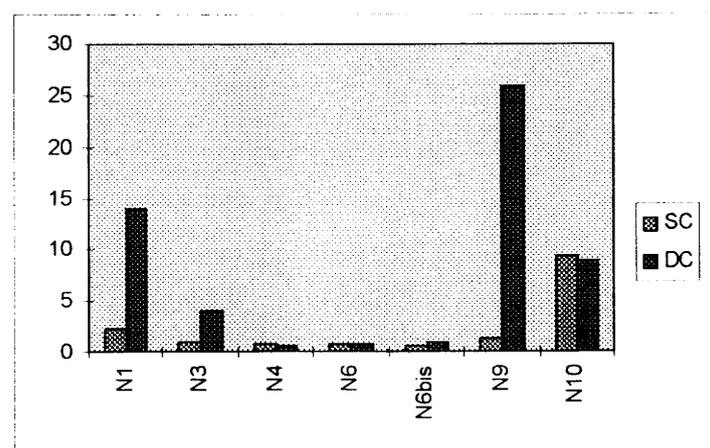
- Les sols cultivés en double culture

Sur les partiteurs KL et KO, où les paysans choisissent les sols qui seront cultivés en double culture, le pourcentage de superficies affectées est nul. On peut supposer que les paysans vont choisir les meilleurs sols pour les travailler en double culture, ce qui explique l'absence d'efflorescences.

En revanche, sur le Retail et le Grüber (un site) où l'emplacement de la double culture est imposé, les sites sont diversement affectés par le phénomène d'alcalinisation-sodisation. Le pourcentage moyen est de 9,5 %. Le N9, le N1 et le N10 présentent un pourcentage important de sols de double culture affectés (figure 3.3). Est-ce liée à l'emplacement des sols de double culture, propices au ségué, ou à l'influence de la double culture sur la dynamique des sels ?

Il est intéressant de noter que de nombreux paysans font état de problème de fertilité sur les sols de double culture ou pensent que la double culture est mauvaise pour le sol.

Figure 3.3: Superficie affectée par village au sein de la zone Retail en simple culture et en double culture, en pourcentage de la superficie enquêtée.



- Les types de sol affectés.

Une des questions posées aux enquêtés portait sur le type de sol où se situent les efflorescences. Le paysan répondait par la dénomination vernaculaire. Il a été difficile de traduire ces informations en terme de superficie affectée par type de sol, étant donné les confusions possibles entre les noms de sol.

Les résultats, très qualitatifs, montrent que les sols de cuvette sont fréquemment cités par les paysans comme présentant des efflorescences. Toutefois, les surfaces situées sur des levées (KL, KO, Molodo sud) sont en moyenne plus affectées que celles où les cuvettes prédominent (Grüber), ce qui laisse supposer que ce sont les sols de levée les plus affectés.

Les résultats de l'enquête, doublés de reconnaissance sur le terrain, serviront de base aux choix de sites expérimentaux. On peut déjà dire que les sols de double culture au N9 et de simple culture au N10 sont un exemple de cuvettes dégradées sur une grande surface qui mérite d'être approfondi.

- Méthodes de lutte préconisées.

On remarque que les paysans du Kouroumari sont plus souvent sans solutions face au ségué que les paysans de la zone de Niono ou de la zone de Molodo. Cela s'explique par l'absence de projet de réhabilitation dans le Kouroumari (ARPON et Retail dans la zone de Niono) qui permettent la vulgarisation de pratiques agronomiques. Souvent les solutions proposées se ressemblent au sein d'un même village.

Les méthodes les plus souvent citées sont:

- Une meilleure maîtrise de l'eau pour assurer une submersion des zones affectées citée quasiment systématiquement en zone non réaménagée, et par plus de la moitié des paysans en zone réaménagée. Planage (et donc le réaménagement quand il n'a pas eu lieu), diguette supplémentaires.
- Façons culturales : 1/3 cite l'apport de balles de riz, de fumure organique ou d'ordures ménagères. Certains citent le travail du sol, soit le double labour, soit un labour fin de cycle, soit un labour permettant l'enfouissement des pailles. Quelques uns citent le repiquage. En zone Retail, 10% des paysans proposent l'apport de sulfate de zinc.
- 20 % enlèvent la couche de sol affectée par le ségué

- Autres problèmes affectant la riziculture.

Cette question était annexe dans un questionnaire portant principalement sur le ségué. Il est difficile de tirer des conclusions et d'effectuer des statistiques sur les réponses des paysans. Ces éléments sont donnés à titre indicatif.

Dans une zone non réaménagée, la présence de buttes ou de bas fond est le principal problème cité. Relativement au type de sol, les paysans citent les nodules calcaires (dans les sols Moursi) et les sols très filtrants (Seno).

Les problèmes précis (le paysan dira souvent 'mauvaise fertilité') liés à la fertilité sont :

Le lieu où est cultivé la pépinière est peu fertile (en zone de Niono).

Le riz ne répond pas à l'engrais.

La double culture affaiblit la terre (notamment cité au N1, dont les sols sont cultivés depuis 9 ans en double culture).

B. Potagers.

- Superficie affectée

En superficie potagère, environ 20 % des superficies totales sont affectées, ceci dans les trois zones. Cela s'explique par le système de culture utilisé en maraichage (lessivage pratiquement absent, nappe élevée). Une partie des terres cultivées en maraichage sont souvent à proximité des villages sur des levées trop hautes pour la riziculture, et n'ont pas été aménagées par l'Office. Le drainage de ces terres n'est pas assuré par les aménagements sommaires des paysans.

Là aussi, on observe une grande disparité entre les villages, certains ayant plus de la moitié de leur potager affecté, d'autres ne connaissant pas le problème. Sur les partiteurs KL et KO, cette proportion diminue à environ 10 %. Dans la zone Retail, cela va jusqu'à 25%

Sur le Retail l'utilisation de la terre très intensive a probablement amené la mise en culture potagère de terre très sensibles par leur position et leur texture à l'alcalinisation. Cela explique le pourcentage élevé de terres affectées.

- Méthode de lutte préconisée.

L'apport de balles de riz, de fumure organique (cité par 80 % des gens).
L'apport d'autres terres à la suite du décapage de la zone affectée (15%).
Un arrosage fréquent (matin et soir) (10 %).

Les paysans ne citent pas la plus grande tolérance de la tomate au ségué, alors que sur le terrain, dans les zones maraîchères les plus affectées, c'est la tomate qu'ils cultivent. Cette meilleure adaptation de la tomate est due à une meilleure résistance à la salinité et au mode de culture (en poquet ou irrigué à la raie).

C. Conclusions.

Cette enquête a permis d'estimer qualitativement l'étendue de la dégradation et le type de culture affectée en utilisant un indicateur simple, qui est la présence d'efflorescences. Le maraîchage est la culture la plus touchée, puis les sols cultivés en double culture de riz (où se posent aussi des problèmes de fertilité). Les sols cultivés en simple culture présentent de 3 à 5% de superficies affectées suivant les zones.
Les sols de cuvette présentent aussi des signes de dégradation (présence de Natron).

Le dépouillement par village aidera à cibler les zones à priori les plus affectées, où des dispositifs de mesure seront installés, pour étudier la dynamique sur des sols de cuvette ou des sols de levée, que ce soit en riziculture ou en maraîchage.

4. Les mécanismes de la dégradation.

4.1 Qualité des eaux à l'Office du Niger.

4.1.1 Evolution de l'eau d'irrigation.

Différentes analyses existent dans la littérature pour juger de la qualité de l'eau du Niger (tableau 4.1).

Tableau 4.1 : Analyse d'eaux d'irrigation (Van Diepen, 1984; N'Diaye, 1987; Wijnja, 1993)

Source litt. Echantillon	van Diepen N12g (Niono)	van Diepen K5 (Macina)	N'Diaye K7 (Kour.)	N'Diaye K7 (Kour.)	Wijnja N41g (Niono)	Wijnja Retail (Niono)
pH lab	7.63	7.06	6.95	6.7	7.2	7.3
CE lab à 25 ° mmho/cm	0.1	0.06	0.035	0.036	0.1	0.05
Na ⁺ : meq/l	0.48	0.21	0.13	0.13	0.19	0.17
Ca ²⁺ : meq/l	0.3	0.2	0.13	0.14	0.12	0.1
Mg ²⁺ : meq/l	0.18	0.16	0.12	0.13	0.13	0.08
K ⁺ : meq/l	0.06	0.05	0.03	0.02	0.05	0.06
HCO ₃ ⁻ : meq/l	0.98	0.55	0.42	0.44	0.5	0.45
SO ₄ ²⁻ : meq/l	0.005	0.005	< 0.01	< 0.01	0.0	0.009
PO ₄ ²⁻ : meq/l	0.004	0.004	0.0	0.0	0.0	0.0
Cl ⁻ : meq/l	0.002	0.002	0.01	0.02	0.0	0.0
SAR	0.98	0.46	0.37	0.35	0.53	0.56
Alc res calc.	0.68	0.35	0.29	0.3	0.38	0.35

On constate des variations entre les différentes analyses, pouvant être dues à :

- la date de prélèvement (la concentration de l'eau du Niger varie dans l'année)
- le lieu de prélèvement (la concentration peut croître avec l'éloignement du Niger)
- la taille du canal (plus les canaux sont petits, plus les phénomènes d'évaporation sont importants)

L'eau du Niger est très peu minéralisée, et les critères classiques (Richards et al, 1954) montrent que cette eau ne présente pas de danger de salinisation ou de sodisation. Néanmoins selon la classification de la FAO (1985), l'eau du Niger peut provoquer des problèmes sérieux d'infiltration, du fait de sa très faible concentration.

Tous les échantillons d'eau d'irrigation sont déséquilibrés vers le pôle carbonaté. L'alcalinité résiduelle calcite est positive, lors d'un phénomène de concentration, après précipitation de la calcite, les eaux vont évoluer vers la voie alcaline.

Une simulation de l'évaporation de l'eau du Niger grâce au modèle GYPSOL (N'Diaye, 87; l'échantillon utilisé est dans la troisième colonne du tableau 4.1) confirme ce phénomène (figure 4.1).

Le tableau 4.2 montre l'effet d'une concentration de 10, 20, 40 et 100 fois d'un échantillon (4^e colonne du tableau 4.1), sous des pressions de CO₂ de 0.01 et 0.05 atmosphères (Van Driel, 1989).

Figure 4.1 : Simulation de l'évaporation de l'eau du Niger. Evolution des molalités et du pH en fonction du facteur de concentration (N'diaye, 1987)

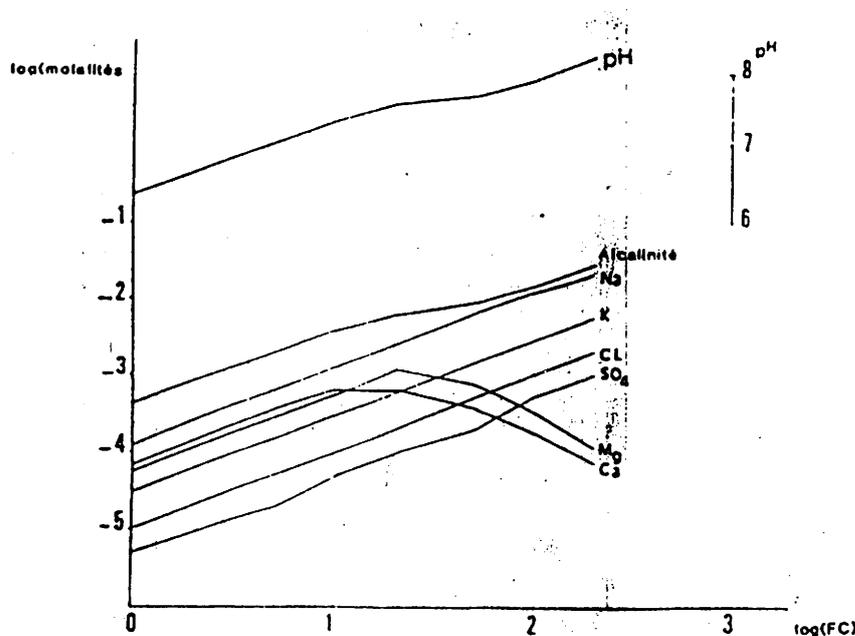


Tableau 4.2 : L'effet de la concentration sur la composition chimique de l'eau d'irrigation

	Na ⁺ meq/l	Ca ²⁺ + Mg ²⁺ meq/l	HCO ₃ ⁻ meq/l	C ^l meq/l	CE à 25° mmho/cm	SAR
Eau d'irrigation	0.13	0.27	0.44	0.44	0.036	0.35
10x concentrée						
avant précipitation	1.3	2.7	4.4			
après précipitation 0.01 atm	1.3	2.7	4.4	4.4	0.36	1.12
après précipitation 0.05 atm	1.3	2.7	4.4	4.4	0.36	1.12
20x concentrée						
avant précipitation	2.6	5.4	8.8			
après précipitation 0.01 atm.	2.6	2.1	5.5	5.5	0.45	2.54
après précipitation 0.05 atm.	2.6	4.6	8.0	8.0	0.66	1.71
40x concentrée						
avant précipitation	5.2	10.8	17.6			
après précipitation 0.01 atm.	5.2	1.3	8.1	8.1	0.68	6.45
après précipitation 0.05 atm.	5.2	3.6	10.4	10.4	0.87	3.88
100x concentrée						
avant précipitation	13	27	44			
après précipitation 0.01 atm.	13	0.4	17.4	17.4	1.45	28.7
après précipitation 0.05 atm.	13	1.7	18.7	18.7	1.55	14.1

4.1.2. Les eaux souterraines.

La teneur en sel des eaux souterraines peut être très variable, comme il est montré dans le tableau 4.3. Si l'eau souterraine dérive de l'eau d'irrigation par concentration, un échantillon présentant une concentration en sodium de 12.61 meq/l impliquerait un facteur de concentration de l'ordre de 100.

Bertrand (1985) émettait deux hypothèses quand à l'origine de la concentration élevée des eaux de nappe :

- Concentration des eaux d'irrigation sous l'effet de l'évaporation.
- Au cours de sa remontée, la nappe phréatique s'est chargée en sodium par contact avec des lentilles sodiques formées au cours des périodes arides du quaternaire récent, par piégeage et évaporation de l'eau du Niger.

En simulant un processus de concentration de l'eau d'irrigation à l'aide du modèle GYPSOL, et en comparant cette simulation aux prélèvements effectués dans la nappe et dans les sols, il apparaît que toutes ces eaux dérivent de l'eau du Niger par concentration (N'Diaye, 87).

Néanmoins, le chimisme des eaux n'ayant pas beaucoup varié au cours du Quaternaire récent, si des lentilles sodiques sont présentes dans les alluvions profondes, leur composition dériverait de l'eau du Niger par concentration. La dissolution de ces lentilles par la remontée de la nappe produirait de l'eau dérivant de la même famille que les eaux du Niger (Bertrand et al, 1993).

Tableau 4.3 : Analyse d'échantillons d'eau souterraine (Mission russe, 1964 (cité dans Toujan, 1980), Van Diepen, 1984; N'Diaye, 1987; Wijnja, 1993).

Source litt. Echantillon	Mis. soviét. moy. 8 puits	van Diepen G (km 26)	N'Diaye	N'Diaye	Wijnja KL3	Wijnja G5
pH lab		8.17	8.24	8.3	7.6	8.1
CE à 25 ° mmho/cm		0.85	1.1	0.74	0.5	1.98
Na ⁺ : meq/l	5.06	7.3	12.61	5.46	3.1	16.53
Ca ²⁺ : meq/l	3.54	0.82	0.74	3.18	1.7	1.5
Mg ²⁺ : meq/l	1.55	1.18	0.58	1	0.7	1.8
K ⁺ : meq/l		0.03	0.02	0.08	0.1	0.04
HCO ₃ ⁻ : meq/l	7.56	8.05	12.76	8.32	5.6	16.77
SO ₄ ²⁻ : meq/l	0.09	0.23	1.43	0.57	0.2	2.32
PO ₄ ²⁻ : meq/l		0.01	0.0	0.0	0.0	0.06
Cl ⁻ : meq/l	0.93	0.43	0.71	0.54	?	3.9
SAR	3.1	7.3	15.5	3.8	2.9	12.87

Les eaux souterraines sont de la même famille que les eaux d'irrigation, mais sont plus concentrées.

4.2. Dynamique de la nappe

Différentes échelles de temps et d'espace peuvent être envisagées :

- Depuis le début des aménagements, on a assisté à l'échelle des périmètres à une remontée de la nappe phréatique à un rythme rapide.
- Une dynamique saisonnière à l'échelle des parcelles cultivées provoque l'affleurement de la nappe pendant la culture d'hivernage, qui redescend au cours de la contre-saison.

4.2.1 L'évolution de la nappe phréatique sur le long terme.

Lors de la construction des aménagements, la nappe se situait à une profondeur de 30 mètres dans le Kala supérieur, 40 à 50 mètres dans le Kouroumari, 70 mètres et davantage dans le Méma. Bélime (1940) en concluait 'si le danger existe d'un relèvement des eaux souterraines, il est clair qu'il n'est pas prochain'. Pourtant, il constate déjà que les puits bordant les défluent remis en eau ont leur plan d'eau compris entre 10 et 20 mètres de profondeur.

En 1964, la jonction nappe-eau des rizières lors des irrigations est mise en évidence (mission soviétique, 1964, citée dans SOGREAH, 1982).

Les relevés de nappe phréatique effectués par le projet BEAU en 1980 (SOGREAH, 1982) montre qu'une majorité du périmètre voit l'eau se rapprocher à moins d'un mètre de la surface du sol, cependant que dans les champs de riz eux-mêmes nappe et eaux d'irrigation se rejoignent. Une carte établie en cours de saison-sèche (février-mars) montre la brusque chute du niveau de la nappe à l'extérieur des irrigations (traduisant une diffusivité hydraulique très faible). Une comparaison effectuée entre les niveaux de puits de 1957 et ceux de 1980 (SOGREAH, 1982) montre que le niveau des puits en zone exondée n'a pas varié (pour des villages distants de 10 à 25 km de la zone irriguée où la nappe se situe entre 40 et 52 m.), sauf à Kolodougou, situé à 2 km du périmètre, où le niveau est passé de 47 m à 15 m. Selon Bertrand (1993), à une vingtaine de kilomètres des aménagements, la nappe remonte d'environ 0,5 m par an.

Il est donc clair qu'une remontée rapide des nappes phréatiques a eu lieu au droit des périmètres irrigués entre 1940 et 1980, la nappe affleurant à partir de 1964. L'évolution de la nappe à proximité des périmètres irrigués est moins bien connue, Bertrand (1993) et SOGREAH (1982) se contredisant.

Depuis bientôt 30 ans, la nappe est subaffleurante au cours de la culture de riz. Le niveau de la nappe décroît rapidement jusqu'à 45 m de profondeur à mesure que l'on s'éloigne du périmètre.

4.2.2 L'évolution saisonnière de la nappe phréatique.

De nombreux suivis piézométriques ont été effectués depuis 1985.

N'Diaye (1987) a implanté un transect piézométrique dans le Kouroumari. Les piézos sont implantés en couple: un premier piézomètre à 2 m de profondeur suit les fluctuations de la nappe superficielle, un deuxième atteint une couche plus sableuse entre 3,5 m et 4,5 m. Ces deux nappes peuvent évoluer de façon indépendante, étant séparées par une couche plus argileuse, ce qui provoque des flux d'eau verticaux.

Dans les rizières, la dynamique de la nappe superficielle s'explique par le système de culture.

- Montée rapide de juillet à août correspondant aux pré-irrigations et aux irrigations de soutien.
- Stabilisation à un niveau sub-affleurant de fin août à fin octobre pendant la mise en eau des rizières.
- Descente de la nappe de novembre à juin pendant la période de drainage et la saison sèche.

A l'extérieur des rizières, à proximité du Fala, le niveau des nappes suit les fluctuations du Fala.

N'Diaye et al (1991) ont instrumenté à l'aide de transects piézométriques huit sites dans la zone de Niono représentant des situations contrastées vis à vis de la dégradation.

En général, une couche argileuse peu perméable est située entre 1,5 m et 2,5 m, une couche plus sableuse se trouvant en dessous. Les piézomètres installés en couple (à 1,5 m et à 3 m) ont mis en évidence une percolation

durant la saison des cultures, et une remontée des eaux souterraines (mis en charge par la proximité des distributeurs à travers la couche sableuse) pendant la saison sèche.

L'analyse des relevés piézométriques (pendant une année) et des conductivités électriques (pendant l'hivernage) donne les résultats suivants :

- La descente de la nappe est rapide et a lieu en décembre-janvier.
- Le battement de la nappe (hauteur maximum - hauteur minimum) dépend des conditions de drainage et du type de sol. On obtient 1,7 m pour un sol sableux en lisière d'aménagement, 1,4 m pour un sol très argileux, et 1 m pour un sol sableux non drainé à proximité d'un distributeur.
- La concentration de la nappe dépend de la qualité du drainage pendant la saison sèche, de la circulation de l'eau dans le sol (plus le sol est argileux, plus la concentration est élevée) et de l'importance du lessivage au cours de l'hivernage. Elle présente une variabilité spatiale importante, provoquée notamment par la grande hétérogénéité du sol.
- Dans les zones de simple culture et de maraîchage, la CE de la nappe superficielle est plus élevée que la CE de la nappe profonde. Dans les zones de double culture, c'est l'inverse.
- Dans les sols sableux à sablo-argileux, la dégradation par salinisation provient des remontées capillaires soit durant l'hivernage (défaut de lessivage des points hauts), soit durant la contre-saison (la nappe reste trop élevée). Aux points où le sol présente une dégradation par salinisation correspondent des points de concentration de la nappe.

Molle (1993) a effectué un relevé de 53 puits dans 34 villages pour étudier l'influence des canaux sur le niveau de la nappe. Ses conclusions sont les suivantes :

- Les puits se trouvant influencés par des drains de ceinture ont un niveau d'eau plus bas (5 à 6 m de la surface du sol) que ceux situés à proximité de canaux (1 à 4 m de la surface du sol). Cela est dû à une plus forte charge hydraulique dans les canaux que dans les drains, et aussi à la conductivité hydraulique du sol plus importante pour les canaux (levées sableuses) que pour les drains (cuvettes argileuses).
- Au delà de 200 m de distance, le niveau moyen de la nappe descend à plus de deux mètres. La dispersion des points est sans doute due principalement aux différences de conductivité hydraulique du sol.
- L'amplitude de la variation annuelle du niveau d'eau est plus faible pour les puits proches des canaux.
- Aux axes d'eau permanents sont accrochés diverses petites nappes, chacune avec sa dynamique, dépendant du type de sol, des conditions de drainage et de la gestion de l'eau.

La dynamique saisonnière de la nappe phréatique est essentiellement influencée par le régime des irrigations. L'influence des axes d'eau permanents sur la nappe a été mise en évidence, sans que leur contribution à l'alimentation de la nappe puisse être quantifiée.

4.2.3. Les mesures de conductivité hydraulique.

Selon BEAU (80), la vitesse d'infiltration varie de quelques millimètres à 80 millimètres par 24 heures. C'est surtout en profondeur que les sols sont presque imperméables et que l'eau y stagne. L'horizon argilique, épais et proche de la surface a une perméabilité faible et est peu propice à la pénétration des racines. Il provoque un engorgement temporaire. C'est une des principales contraintes à la mise en valeur agricole des terres des périmètres sucriers du Kala supérieur (Sidibé, 87).

Trea et al (1990) ont effectué des mesures de perméabilité hydraulique en utilisant la méthode de Porchet. De grandes différences sont enregistrées pour les différents types de sol : De 10^{-6} m/s à $2 \cdot 10^{-5}$ m/s pour les sols sableux et sablo-limoneux et de $5 \cdot 10^{-7}$ m/s à $6 \cdot 10^{-6}$ m/s pour des sols argileux.

Tangara (1994), trouve des ordres de grandeur équivalents avec la même méthode.

AHT (1990) insiste sur la particularité des terres de N'débougou, particulièrement argileuses et peu perméables. Les perméabilités furent mesurées par la méthode de Hooghoudt et de Porchet sur quelques sites. La perméabilité pour les argiles et les sols plus légers est inférieure à $2 \cdot 10^{-6}$ m/s, et vaut souvent 10^{-7} à $2 \cdot 10^{-7}$ m/s.

Les valeurs de perméabilité mesurées sont en général très faibles (10^{-7} m/s) sauf dans les sols très sableux (en général à proximité de la surface). Les valeurs de perméabilité à N'débougou (AHT, 1990) impliquent un système de drainage où les drains seraient distants de 10 m ou même de 5 m, ce qui est inenvisageable.

Van Hoorn (1992) estime les quantités d'eau évacuées par pendage de la nappe en supposant une transmissibilité de la nappe de 10^{-3} m²/s.

Les seules mesures disponibles sont des mesures de perméabilité de surface à l'aide d'une méthode peu fiable. Des tests de pompage et des slug test (choc hydraulique) permettant d'évaluer la conductivité hydraulique des différentes nappes doivent être menés. Ceci afin de pouvoir estimer la quantité de sels évacués par la nappe, que ce soit au niveau parcellaire ou au niveau de l'Office (bilan global analogue à la méthode de Van Hoorn).

4.3 Les sols.

Les propriétés intrinsèques du sol vont avoir une influence sur le comportement du sol vis à vis de la dégradation. On peut distinguer différents paramètres liés au type de sol qui vont modifier la dynamique de la dégradation :

1. La position topographique
2. L'importance du flux de remontée capillaires.
3. La capacité d'échange cationique.
4. La stabilité de la structure.
5. Le taux de matière organique.

4.3.1 La position topographique.

Dans la prospection morphopédologique du Kala inférieur (Keita, 1991), les sols sont divisés en trois catégories relatives à leur position topographique : cuvettes, petites levées, hautes levées. Les sols de cuvette sont très argileux à argileux (Moursi et Dian), les petites levées sont limoneuses à limono-argileuses (Danga et Danga blé), et les hautes levées sont sableuses à sablo-limoneuses (Danga blé et Seno).

Les sols de cuvette auront en général un lessivage suffisant. On observe en effet (Bertrand et al, 1993) un profil de sels lessivés, avec une augmentation du pH, de la CE avec la profondeur.

En revanche, pour les sols de levées, où l'apport d'eau d'irrigation peut être insuffisant, le profil le plus typique est un profil de remontées capillaires, avec des fortes valeurs de CE et de pH dans l'horizon superficiel (AHT, 1990). Ce phénomène est le plus marqué sur les points hauts (buttes).

Un bon planage à l'issue d'un réaménagement permet de faire disparaître ces buttes. Néanmoins, les sols de levée seront en général plus sensibles à la dégradation que les sols de cuvette.

4.3.2 L'importance du flux de remontée capillaire.

Lorsqu'un flux d'eau descendant n'est pas assuré par la percolation, il peut se produire un phénomène de remontées capillaires, qui va dépendre du type de sol, de la hauteur de la nappe, et du gradient de potentiel entre la surface du sol et la nappe.

Dans les sols limoneux, le flux de remontée capillaires sera important comparé aux autres types de sol. Dans des sols plus sableux, la grande taille des pores diminue les forces de succion. Dans les sols argileux, la faible diffusivité du milieu limite les remontées et provoque l'apparition d'un mulch en surface ayant une faible teneur en eau provoquant une rupture de la conductivité hydraulique (Van Hoorn, 1994).

Le flux de remontée capillaire diminue avec la profondeur de la nappe. Si la nappe n'est pas alimentée par des infiltrations souterraines, le niveau de la nappe baissera sous l'effet du flux de remontées capillaires jusqu'à ce que ce flux soit nul.

Dans l'Office, les sols les plus sensibles à ce phénomène sont les sols de levées limoneux à sablo-limoneux (Danga et Seno dans la classification vernaculaire). On observe alors un profil de remontée capillaire avec une augmentation de la salinité, de l'alcalinité de la profondeur vers la surface.

Ce phénomène peut avoir lieu :

- A l'issue de la saison de cultures : la nappe affleure, l'irrigation est terminée. La nappe va s'abaisser rapidement sous l'effet de remontées capillaires.
- Après les préirrigations : l'eau apportée au cours des préirrigations humidifie le profil, augmentant ainsi sa conductivité hydraulique. Un processus de remontée capillaire s'amorce.
- Au cours de la saison de culture : sur les points hauts en riziculture ou dans certaines zones maraîchères, la quantité d'eau d'irrigation apportée n'est pas suffisante pour contrebalancer le flux de remontée capillaires

4.3.3 La capacité d'échange cationique.

La sodisation se traduit par la fixation de l'ion sodium sur le complexe d'échange. Ce phénomène peut être plus ou moins rapide suivant la capacité d'échange du sol. En effet, plus la capacité d'échange est importante, plus la quantité d'ions sodium à apporter pour remplacer les ions calcium présents sur le complexe adsorbant est grande. On parle du pouvoir tampon du sol, qui détermine le temps au bout duquel l'équilibre entre l'eau présente dans le sol et la composition du complexe adsorbant sera établi. Ce pouvoir tampon est proportionnel à la capacité d'échange, et dépend donc de la quantité d'argile et de leur minéralogie présente dans le sol. Il est difficile de prévoir le temps au bout duquel cette capacité d'échange sera consommée.

Pour les sols de l'Office, les valeurs de CEC sont présentés dans le tableau 4.4

Tableau 4.4 : CEC des principales unités morphopédologiques (Keita, 1991):

Unités	C1	C2	L2	L1	S2	S1
CEC	20	15	11	6.5	6	4

L'argile dominante présente dans le sol est la kaolinite; des argiles gonflantes de type montmorillonites sont présentes dans les sols de cuvettes (Moursi et Dian).

4.3.4 La structure.

Une des conséquences de la sodisation est la dégradation de la structure du sol. Les sols peuvent être plus ou moins sensibles à ce phénomène. Cela dépendra notamment de la compacité initiale du sol (sensibilité au phénomène de battance) et de la sensibilité du sol à l'action du sodium échangeable.

Selon Dabin (1951) les sols Danga, Dian et Boi sont des sols compacts; durs en saison sèche, battants en saison des pluies sous irrigation et généralement fort peu perméables. Les sols Séno, Danga blé, Moursi sont généralement friables en surface, faciles à travailler, et relativement perméables.

L'étude de Van Diepen (1984) confirment ces observations. Les sols sablo-limoneux à limoneux (Danga) ont une structure compacte et sont sensibles à la battance. L'horizon superficiel est caractérisée par une très faible porosité (Tableau 4.5). La destruction des agrégats peut être provoquée par les pluies ou par les irrigations. Lors du dessèchement du sol, il se forme une croûte très dure en surface.

Les sols argileux sont très compacts et peu perméables à l'eau. Néanmoins, ils sont plus faciles à travailler que les sols limoneux.

Van Diepen (1984) attribue la compacité des sols à leur composition granulométrique (fine et hétérogène), à la teneur très basse en matière organique, à l'absence de calcaire libre; cette compacité est localement aggravée par l'alcalinité et la sodicité.

Tableau 4.5 : Densité et porosité des 30 premiers centimètres de sol à l'Office du Niger (BEAU, 1980)

Type de sol	Emplacement	Densité apparente (g/cm ²)	Porosité %
Danga argileux	Molodo	1.68	38
Danga-blé sableux	Molodo	1.73	35
Dian	Séribala	1.58	40
Moursi	Siengo	1.59	40
Moursi	Casier Blanc	1.51	43
Dian	Banivi	1.64	38

4.3.5. Le taux de matière organique.

Comme on l'a vu plus haut, la matière organique contribue à l'amélioration de la structure du sol en favorisant la stabilité des agrégats.

Dans les sols de l'Office, le taux de matière organique est très bas, variant de 0.2 à 1 % pour tous les sols (Van Diepen, 1984). Les sols les mieux pourvus en matière organique sont les sols de cuvette (Dian et Moursi) où le

taux de matière organique est de 1 % en moyenne. Dans les sols de levées, le taux de matière organique est plus faible, de 0.5 % à 0.7 % (N'Diaye K., 1987).

Une comparaison entre des sols Danga argileux et Danga blé, d'une part, Dian et Moursi, d'autre part montre que les sols à structure stable (Danga blé et Moursi) ont respectivement des teneurs en matière organique plus faibles que des sols à structure instable (Danga argileux et Dian). Dabin (1951) en conclut que la teneur organique des sols de l'Office étant faible, son action se trouve masquée par les autres facteurs de la structure.

Pour améliorer la structure physique des sols Danga et Dian, il faudrait accroître le taux de matière organique jusqu'à une valeur voisine de 2%. Van Diepen (1984) montre qu'il faut des grandes quantités de paille (de 10 à 50 tonnes/ha) pour améliorer le taux d'humus à court terme, mais ces quantités ne sont pas disponibles. Il est donc très difficile d'amener à court terme le taux de matière organique à des valeurs supérieures à 1% de manière à améliorer l'état physique des sols.

4.3.6. Conclusion

Les sols de levée sont à priori les plus exposés à la dégradation par alcalinisation/sodisation pour les raisons suivantes :

- submersion souvent déficiente du fait de leur position haute;
- favorise les remontées capillaires;
- faible pouvoir tampon;
- structure compacte, sensible à la battance;
- faible taux de matière organique.

Les sols de cuvette semblent donc mieux armés face à la dégradation. Néanmoins, ces sols étant très peu perméables, les sels s'accumulent dans le profil. Une dégradation de ces sols, plus tardive notamment à cause de leur important pouvoir tampon, serait quasiment irréversible, le lessivage de ces sols étant impossible.

4.4 La gestion de l'eau.

La gestion des grands ouvrages (barrage de Markala, régulation du Fala de Molodo et du Fala de Boky-Wéré), est opérée à partir de Markala. Le plan d'eau de Markala est maintenu à niveau constant. Chaque jour, les débits en tête sont ajustés aux débits à l'entrée des systèmes grâce à des mesures de niveau d'eau. A l'entrée de chaque système, les vannes sont ajustées par commande par l'aval.

Dans les périmètres non réhabilités :

Une expertise effectuée par SOGREAH en 1984 fait état des problèmes suivants :

- Volumes d'eau délivrés supérieurs aux besoins réels avec localement une alimentation en eau insuffisante
- Submersion prolongée d'une partie importante de la surface en rizière
- Pratiques d'irrigation non conformes au modèle d'exploitation rizicole.
- Lames d'eau d'épaisseur très variable dans les rizières mises en eau.

Ces différents problèmes étaient dus à une dégradation du système hydraulique, à un défaut d'aménagements des casiers, et à des méthodes de gestion de l'eau déficientes.

Une gestion optimale de l'irrigation sur le périmètre pilote de N'débougou en commande par l'amont (après l'établissement de courbes de tarages et de consignes de niveaux) conduit à de grosses inégalités (le quotient débit délivré / débit nécessaire varie de 0.5 à 5 selon les partiteurs, pour une moyenne de 1.4) principalement en raison du mauvais état du réseau hydraulique.

Il apparaît donc que la distribution d'eau est très inégale dans les périmètres non réhabilités, en général excédentaire, provoquant un engorgement du système de drainage

Dans les périmètres réhabilités.

1. Retail.

Le programme de réhabilitation Retail était le suivant :

- Planage des parcelles à plus ou moins 5 cm.
- Installation de modules à masques en tête d'arroseur.
- Rigole d'arroseur fermée par une vanette servant aussi de rigole de drainage.
- Réhabilitation et recalibrage du réseau primaire et secondaire.
- Curage du réseau de drainage.

Les normes techniques de gestion de l'eau sont les suivantes :

Distributeur : Commande par l'aval. Débit théorique : 2.25 l/s/ha

Partiteur : Commande par l'amont. Débit théorique : 1.8 l/s/ha. Ils sont ajustés au débit requis par les arroseurs, sans que soit établi un tour d'eau entre les partiteurs.

Arroseur : Commande par l'amont à débit constant. Débit théorique : 1.8 l/s/ha (réajusté pour permettre la double culture). Les arroseurs sont équipés de module à masque. Leur débit d'équipement varie de 2 l/s/ha à 4l/s/ha; ils sont donc suréquipés. Ceci oblige à une certaine discipline car cela autorise la surconsommation.

Rigole d'arroseur : Un chef d'arroseur doit faire respecter un tour d'eau entre les rigoles quaternaires. C'est lui qui règle deux fois par jour l'ouverture des modules pour répondre à la demande des agriculteurs. Dans la pratique, l'eau étant en abondance, dans 90 % des cas la gestion de l'eau se fait au coup par coup sans tour d'eau. Pour éviter les conflits entre paysans, le chef d'arroseur envoie l'eau en excès. La consommation est ainsi plus élevée que celle prévue, surtout si le nombre de non-résidents sur l'arroseur est important (Jamin, 1990).

Des suivis de consommation d'eau en zone Retail sont donnés dans le tableau 4.6.

Tableau 4.6. Evolution de la consommation d'eau d'hivernage et de contre saison (Bengaly, 1995).

Consommation d'eau (m ³ /ha)	1987	1988	1989	1990	1991	1995
Contre-saison	23 595	21 020	20 250	19 108	19 317	
Hivernage	21 860	20 400	17 340	18 500	13 900	20 500

La consommation théorique en hivernage est de 14 000 m³/ha. Pour 1995, le quotient débit délivré / débit nécessaire est de 1,4.

En 1991, quatre années après la réhabilitation, les agents d'encadrement et les exploitants arrivent à une bonne gestion du système. Les données de 1995 montrent que la consommation d'eau est revenue au niveau de 1988, sans que cela puisse être expliqué par la pluviométrie. La restructuration de l'O.N., le désengagement du projet Retail du service de la gestion de l'eau contribuent à expliquer les insuffisances dans le suivi des consommations de 1992 à 1994 (données pas disponibles) ainsi que la hausse des consommations par arroseur.

2. ARPON

La réhabilitation Arpon (secteur Kolodougou et Kouia) s'est fait initialement suivant les critères suivants :

- Réhabilitation et recalibrage du réseau primaire et secondaire.
- Arroseurs équipés de prises semi-module.
- L'aménagement des diguettes, le planage, les rigoles d'arroseur sont laissés aux paysans.

Le distributeur est commandé par l'aval.

Les partiteurs sont réglés de façon à répondre à la demande des débits des arroseurs.

Les arroseurs débitent 1.8 l/s/ha quand la cote de consigne est respecté.

Les résultats du projet GEAU à l'issue du réaménagement montre que la gestion de l'eau au niveau d'un partiteur (KL2) n'est pas efficiente. La moyenne de consommation d'eau sur une campagne est de 1600 mm. Cela peut s'expliquer par la régulation du partiteur, comportant deux biefs. La consommation du partiteur sera influencée par le nombre d'arroser ouvert dans le premier bief, et sera indépendante de la demande dans le deuxième bief. On observe une consommation d'eau dans le deuxième bief 1,4 à 2,2 fois plus importante que dans le premier bief. Cette eau supplémentaire sera notamment évacuée par le drain principal, qui débite 600 à 900 l/s pour 1250 ha.

En règle générale, le mauvais état des infrastructures hydrauliques dans les périmètres non réhabilités et les insuffisances de la gestion de l'eau dans les périmètres réhabilités provoquent une surconsommation d'eau d'irrigation. Le rapport débit délivré / débit nécessaire vaut en moyenne 1,4.

4.5. Le fonctionnement du drainage.

Il n'y a pas de réseau de drainage à proprement parler, mais seulement un réseau d'évacuation des eaux superficielles excédentaires. Cette évacuation doit se faire à partir d'un réseau de drains d'arroser, de drains de partiteur et de collecteurs, établis parallèlement aux arroseurs, partiteurs et distributeurs.

Des suivis de nappe pendant l'hivernage (GEAU, 1984) montrent que la baisse de la cote de l'eau à l'issue des préirrigations ou de la moisson est essentiellement due à l'évaporation. Le réseau de drainage évacue uniquement les eaux superficielles excédentaires

En 1984, SOGREAH estimait que le fonctionnement insuffisant, voire inexistant, du réseau d'évacuation est probablement le problème le plus aigu auquel l'Office du Niger est confronté. De nos jours, c'est encore le cas en zone non réaménagée (périmètre de Molodo, rapport BCEOM).

Néanmoins, dans les périmètres non réaménagés, l'engorgement des drains permet la mise en culture des parcelles situées à proximité (défaut de diguette, système hydraulique dégradé). De plus l'eau des drains permet la mise en culture de parcelle hors casiers, qui assurent un revenu non négligeable.

En zone réaménagée, le recalibrage des drains a permis une amélioration du fonctionnement qui reste limitée par la faible capacité du grand drain collecteur de la zone de Niono - N'débougou. Cette amélioration du fonctionnement du drainage s'accompagne par une diminution des superficies hors-casiers.

Le recalibrage des 105 km du drain de la zone Niono-N'débougou est dans les cartons de la KFW.

Le réseau de drainage permet uniquement l'évacuation des eaux superficielles excédentaires. L'importance des volumes à évacuer, le mauvais état du réseau explique le fréquent engorgement des drains au cours de l'hivernage.

4.6. Elements d'un bilan des eaux.

4.6.1. Fonctionnement hydrique des sols.

La disponibilité de l'eau pour les plantes (entre pF 2 et pF 4.2) n'est que de 10%, soit 100 mm d'eau pour 1 m de sol. Seulement 50 à 70 % de cette quantité constitue une réserve facilement utilisable pour la plante.

Tableau 4.7 : Courbes pF de la couche supérieur des périmètres expérimentaux de riz.

Type de sol	Localisation	pF sat vol %	pF=1 vol %	pF=1.7 vol %	pF= 2 vol %	pF= 2.3 vol %	pF=3 vol%	pF=4.2 vol %	Densité app. gr/cm ³
Dian	Banivi	40.5	40.0	37.1	36.8	35.1	33.2	28.4	1.60
Moursi	Siengo	40.7	41.1	36.9	36.8	32.3	30.1	26.1	1.51
Moursi	Casier Blanc	46.6	46.8	43.2	43.5	39.2	36.7	33.2	1.30
Danga Argileux	Molodo	32.5	32.9	24.9	24.8	19.0	17.1	14.8	1.70

Eaux.

En 1980, quatre périmètres pilotes ont été choisis pour établir un bilan des eaux. Ce bilan de l'arroser. Il s'agissait alors d'un système de riziculture semi-pluvial. Néanmoins, le régime phréatique observé était sensiblement le même que de nos jours. Le fonctionnement des drains est défectueux. Les résultats sont résumés dans le tableau 4.8. La quantité d'eau drainée est en général très faible, sauf pour un des quatre périmètres. En effet, à Siengo, le drain principal est inexistant.

Bilan des eaux sur quatre périmètres (BEAU, 1980).

du	ET	I	D	P	DR	Percolation (déduite)
si	-824	694	-15	263	-152	-34
si	-853	721	-36	320	-122	30
si-blé	-691	734	0	288	-302	29
	-900	783	-117	377	-133	11

ET : évapotranspiration du riz; I : irrigation; D : drainage; P : Précipitation; DR : variation de stock.

La partie des autres éléments du bilan, est en général faible. Ceci est confirmé par des mesures (lysimètre et infiltromètre). Une percolation faible existe pendant la remontée de la nappe après les préirrigations et de la mise en eau. Puis la nappe affleure, limitant ainsi toute percolation. L'écoulement nécessaire pour saturer le profil va dépendre de la profondeur de la nappe. Pour une nappe à 300 mm, elle sera de 300 mm, pour une nappe à 1.3 m (Blanc), elle sera de 152 mm.

Sur les quatre périmètres non réaménagés cultivés en semi-pluvial, la quantité d'eau drainée par rapport à la quantité d'eau apportée. Il s'agira essentiellement de l'évacuation de l'excès d'eau. La percolation ne permet pas un lessivage efficace de ces sols : on est dans une situation de salinisation de sels dans le profil.

Pratiques de culture.

Travail du sol

Le travail du sol doit se faire deux ou trois jours après la préirrigation, sur les levées limoneuses et le travail du sol doit se faire deux ou trois jours après la préirrigation, sinon une croûte de surface se forme à la surface du sol.

Le travail du sol a été expérimenté dans le secteur Retail à partir de 1986, est maintenant généralisé dans les autres périmètres.

On effectuera en moyenne un désherbage et deux apports d'engrais. Mais on observera des variations entre les itinéraires techniques (Jamin, 1994).

Plantation

Le mode de plantation va évoluer progressivement, quand la maîtrise de l'eau et le planage le permettent. Si le planage est réalisé, le mode de plantation direct en sec (la levée doit se faire sous pluie) est le mode d'implantation utilisé.

On effectuera un désherbage et un ou deux apports d'engrais. On passera à un système cultural beaucoup plus intensifié que la zone de N'débougou. Dans la zone de N'débougou, l'intensification est faible, et les rendements aussi (Mendez del Vilar, 1995).

4.6.2 Le maraîchage

La place du maraîchage au sein des exploitations a peu à peu pris de l'ampleur, économiquement et en superficie. Le maraîchage représente en moyenne 30% du revenu net agricole sur le Retail. Les surfaces exploitées, en général des zones hautes non rizicultivables à proximité des villages, varient beaucoup suivant les villages et les exploitations (Jamin, 1994). La superficie maraîchère actuelle représente moins de 4% des terres irriguées. L'extension des cultures maraîchères sur les rizières en contre-saison (observée au projet Retail) laisse penser qu'une telle pratique pourrait se développer considérablement si des opportunités commerciales étaient identifiées (Molle, 1993).

Les principales cultures sont, par ordre d'importance décroissante, l'échalote, l'ail, la patate et la tomate.

Les superficies cultivées en maraîchage sont beaucoup plus affectées par des problèmes d'alcalinisation-sodisation que les superficies cultivées en riziculture. Plusieurs raisons à cela :

- Les parcelles maraîchères sont en position haute sur des sols de levées, sensibles à la dégradation.
- L'irrigation à la calebasse ne permet pas un lessivage efficace des sels.
- Le niveau élevé de la nappe phréatique provoqué par la distribution de l'eau par des rigoles constamment remplies et un drainage inexistant.

L'étude menée par N'Diaye et al (1991) comprenant deux sites maraîchers montrent que la nappe descend rarement en dessous de un mètre de la surface du sol, alimentée par le Fala et les canaux principaux et par l'irrigation de contre-saison. Les sols présentent des profils salins caractéristiques de remontées capillaires, notamment les sols de levée. La variabilité spatiale du sol est très élevée pour ces deux sites : le passage des levées sableuses aux cuvettes argileuses se fait sur moins de 200 m. Les cuvettes argileuses, irrigables plus facilement, sont en général moins dégradées.

Des mesures effectuées sur une parcelle d'oignon (Molle, 1993) ont montré que des problèmes d'engorgement pouvaient être responsables du mauvais développement des plans. Dans certains sites, les parcelles les plus favorables au maraîchage sont celles qui sont relativement surélevées. Les problèmes d'engorgement et de salinité ne sont pas sans relation, car une irrigation excessive peut servir à diminuer la concentration saline de l'eau du sol.

Pour remédier à ces problèmes d'alcalinisation, les paysans décapent le sol en préalable à l'installation des cultures, et dans les sites les plus touchés, implantent des tomates en poquets en amenant de la bonne terre.

4.6.3 La canne à sucre.

Les contraintes pédologiques au sein du périmètre sucrier de Dougabougou (Sidibé, 1987) sont les suivantes :

- Texture de l'horizon éluvial : forte sensibilité à la battance externe et au tassement. Une semelle de labour peut se former sous irrigation.
- Un horizon argilique épais et proche de la surface à faible perméabilité. Il provoque un engorgement temporaire et il est peu propice à la pénétration des racines.
- L'hétérogénéité de la couverture pédologique : le sol varie à l'échelle du mètre. et il est impossible d'en tenir compte pour le calcul des doses d'irrigation ou le mode de travail du sol.
- Risque d'alcalinisation par remontée de la nappe phréatique et par installation de nappe perchée sur l'horizon argileux.

Des tâches stériles provoquées par l'alcalinisation-sodisation (salant-noir) sont responsables de la disparition de souches de canne. Elles sont provoquées par un engorgement qui provoque à son tour une concentration des sels (sodium essentiellement). Un labour disperse le sodium dans l'ensemble du profil et la nouvelle plantation ne souffre pas les premières années de l'alcalinité, mais du fait des remontées capillaires, le sodium remonte en surface et les tâches stériles apparaissent.

Les remèdes préconisés par Sidibé (87) sont les suivants :

1. Calcul rationnel des doses et des fréquences d'arrosage.
2. Besoins en drainage et en assainissement, rendu difficile par la faible pente et la faible perméabilité de l'horizon argilique. La technique du sous solage est à envisager.
3. Amélioration de la qualité de l'horizon travaillé: augmenter le taux de matière organique, grâce par exemple à une prairie en pacage associée à un élevage extensif.

Influence du système de culture.

Le puddlage permettrait de limiter les remontées capillaires grâce à la création d'une semelle de labour et d'abaisser l'ESP par un lessivage des ions Na⁺ (Sanogo, 1990). Ces résultats restent à confirmer.

La technique du repiquage qui nécessite une lame d'eau sur la parcelle favorise le lessivage des sels. En semis direct en sec, les semences vont être sensibles à l'alcalinité-salinité du sol, et auront une germination difficile. Il faudra attendre un certain temps avant de pouvoir installer une lame d'eau sur le bassin. Ainsi le repiquage diminue les effets de l'alcalinité des sols par le meilleur lessivage qu'il engendre (N'Diaye, communication personnelle).

Conséquences agronomiques de la dégradation

Elles sont très difficiles à quantifier, du fait du nombre importants de paramètres qui rentrent dans l'élaboration du rendement. Pas de relation statistique mise en évidence entre le rendement et le niveau d'alcalinité et de salinité du sol. Dicko (1994) en conclut que la mise en évidence d'une influence de l'alcalinité sur les rendements nécessite un suivi de la gestion de l'eau et de la fertilisation.

Une comparaison des rendements (Jamin, 1994) dans un champ réaménagé sur une zone haute entre les parties touchées par l'alcalinisation (salants noirs) et les parties saines est présenté dans le tableau 4.9

Tableau 4.9 : rendements obtenus dans une zone sodique (Jamin, 1994).

Mesure	Bassin r4-2g très touché		Bassin r4-3g+3d touché		Bassin r4-1g+1d moins touché		Moyenne des bassins	
	Zone saine	Dégats	Zone saine	Dégats	Zone saine	Dégats	Zone saine	Dégats
Hauteur	95	62	99	62	96	68	97	64
Panic/m ²	325	139	416	121	398	172	380	144
Grains/m ²	23 800	7 500	24 900	8 200	24 700	14 300	24 600	10 100
Pds 1000 g	28.2	23.9	28.1	25.7	27.9	27.3	28.1	25.6
Rendt t/ha	6.7	1.8	7	2.1	6.9	3.9	6.9	2.6

Le rendement obtenu sur les parties non atteintes frôle les 7 t/ha, ce qui est très bon pour une première campagne d'intensification après réaménagement. Sur les parties atteintes, la production n'est que de 2.5 t/ha, et de moins de 2 t/ha dans certains bassins. La baisse de rendement sur les parties atteintes s'explique par une croissance plus faible des plantes (hauteur réduite de 1 m à 0.6 m) et par un tallage limité entraînant une faible densité de panicules (140/m² au lieu de 380). Même le poids de mille grains, composante la moins variable du rendement du riz, est touchée (25.6 g au lieu de 28.1 g).

La production dans ce type de parcelle est possible à condition d'y maintenir une lame d'eau en permanence: on obtient alors de bons rendements. La production demande néanmoins plus de travail et est plus risquée : en cas de manque d'eau, le riz est brûlé dès qu'il est exondé.

La carence en zinc:

Des problèmes de carence en zinc, provoquant un dépérissement-rabougrissement du riz ont été identifiés en zone Retail. Cette carence a été observée dans tous les villages réaménagés, toujours plus souvent sur les sols mousi. En effet, les sols présentent de faibles teneurs en zinc, phénomène aggravé par le pH élevé des sols mousi qui bloque le zinc.

Des mesures de pH du sol parallèles aux analyses de plantes montrent que les 20 points où sont apparus les carences présentent systématiquement des pH plus élevés que les zones non carencées : 8 contre 7.4, soit un écart de 0.6 unité de pH (Jamin, 1994).

Le fait que le problème n'ait pas été remarqué en zone non réaménagée peut venir de la différence de niveau d'intensification, de l'effets des réaménagements et d'une sensibilité moins grande des variétés à paille longue aux carences. Les observations sur plusieurs campagnes montrent que le problème est plus fréquent là où le sol est soumis à une submersion prolongée sans assec (double culture) (Jamin, 1994).

L'utilisation du sulfate de zinc se généralise en zone réaménagée (un paysan sur cinq en 1992), en général sur la sole de double culture.

4.6.4. Autres cultures de diversification

Des essais sur les cultures fourragères, le blé et le maïs ont été effectués par le Retail (Molle, 1993).

La culture fourragère, sur un sol sableux en position haute du terroir de Ténégué, a été affecté par des problèmes de salinisation aux endroits où le micro-relief ne permettait pas une bonne submersion.

Les cultures de blé et de maïs, sur des sols plus lourds, ont été affectés notamment par des problèmes d'hydromorphie localement aggravés par un mauvais planage.

Cela illustre bien la difficulté d'une diversification à l'Office du Niger. Sur des sols légers, la riziculture reste possible car elle assure un lessivage constant de l'horizon superficiel et évite les concentrations de sel. Sur des sols plus lourds, souvent hydromorphe, il faut effectuer une gestion de l'eau très délicate pour éviter l'engorgement.

Les conclusions du projet Geau (1984) sur les cultures en contre-saison de maïs, de niébé et de blé montrent que celles-ci sont difficiles pour plusieurs raisons :

- Conditions climatiques (conjonctions du froid en décembre-janvier et des températures élevées en mars-avril nécessitant un semis très précoce, en général avant la libération des rizières)
- Les éléments fertilisants présents dans le sol
- La compacité et la macroporosité faible des sols, ce qui rend l'irrigation et le drainage difficile. Ces cultures souffrent alors d'hydromorphie temporaire.

4.6.5 Conclusion

Le riz va être relativement peu sensible à la dégradation des sols par alcalinisation/sodisation. Ceci pour des raisons liées au système de culture (maintien d'une lame d'eau assurant un lessivage permanent) et aux caractéristiques de la plante (enracinement faible).

En revanche, pour les cultures de diversification, l'alcalinisation des sols sera un facteur limitant. Elle se fera notamment sentir en secteur maraîcher et sucrier, l'engorgement restant le principal obstacle à la bonne conduite de la canne à sucre.

C'est aussi un des freins identifiés à la mise en place d'autres cultures de diversification.

5. Conclusions

Sur la base des acquis synthétisés dans ce document, on peut avancer les points suivants :

1. La dégradation des sols de l'Office du Niger provient d'un processus de concentration des eaux d'irrigation et d'accumulation de sels.
2. Cette dynamique conduit à l'apparition de déséquilibres géochimiques et à une dégradation des propriétés chimiques (alcalinisation et sodisation), physiques (baisse de la perméabilité et de la porosité), voire minéralogique des sols.
3. L'évolution du milieu est lente et pourra être difficilement appréhendée à court terme.
4. Afin de pouvoir comprendre et prévoir l'évolution des sols sous irrigation, il faudra donc s'appuyer sur la modélisation des processus.

La compréhension des processus en cours et l'estimation de l'évolution sur le long terme nécessitent des études complémentaires.

A l'échelle de l'Office, un premier bilan hydro-salin sera effectuée, qui évaluera notamment la quantité de sels évacués par pendage de la nappe. Ce bilan permettra d'estimer si, à une échelle régionale, on est dans un processus d'accumulation, ou à l'équilibre. Il ne permettra pas d'en déduire une évolution à une échelle locale.

En effet, localement, les mécanismes de la dégradation et son évolution vont se décliner suivant diverses modalités, en relation avec le milieu et la gestion du milieu. Le milieu est le sol, caractérisé par ses propriétés intrinsèques, sa situation au sein d'une toposéquence et son organisation verticale. Sur ce sol, différents systèmes de culture sont mis en place. C'est l'interaction entre ce système de culture (la gestion de l'eau qu'il nécessite) et les propriétés physico-chimiques des sols qui crée des dynamiques plus ou moins défavorables à la conservation des sols.

Nous présentons dans la suite les actions qui vont être menées en riziculture.

Programme de recherche

Objectifs

Le programme de recherche sur l'étude des causes et de la dynamique de la dégradation sera articulé suivant trois volets :

1. Hydrologie

Afin de pouvoir estimer l'évolution possible du phénomène de dégradation, il faut effectuer un bilan hydro-salin permettant de juger de l'accumulation de sels dans le profil au cours d'une saison de culture. comprenant :

- Fontionnement des nappes et évacuation de sels par ces nappes.
- Bilan hydro-salin des eaux de surface.

On complétera ce bilan hydrologique au niveau de parcelles en milieu paysan par un bilan à des niveaux d'échelle allant de la rigole d'arroseur au distributeur. Cela assurera la possibilité d'extrapoler les bilans obtenus à l'échelle d'une parcelle, et cela permettra d'estimer d'où vient et où part la surconsommation d'eau.

2. Pédologie

L'influence de l'alcalinisation/sodisation sur les sols de l'Office du Niger reste peu connue. Il faut pouvoir quantifier les seuils de dégradation, les relations entre les propriétés physiques et chimiques du sol. On procédera aux travaux suivants sur des échantillons de sol :

- Mesures des propriétés physiques par rétractométrie.
- Mesures des propriétés chimiques du sol (analyse complète).

Des colonnes de sol seront prélevés pour simuler l'évolution du sol sous irrigation en laboratoire. De plus, le conductivimètre électromagnétique sera testé sur les sites de l'Office du Niger afin de connaître sa sensibilité en milieu alcalin/sodique.

3. Agronomie

Un double objectif est recherché:

- Evaluer l'influence de la sodisation sur l'élaboration du rendement du riz (milieu contrôlé).
- Etablir la part du facteur édaphique et des pratiques culturales dans l'élaboration du rendement. La dégradation du sol est-il un facteur limitant en l'état actuel des pratiques paysannes?

Dispositif expérimental

On retiendra un arroseur sur levée sablo-limoneuse, un arroseur dans une cuvette argileuse et un arroseur présentant une transition levée-cuvette.

Caractérisation pédologique:

Elle sera effectuée sur la totalité de la surface des trois arroseurs.

Description des sols de levée et des sols de cuvette. Succession des horizons. Contact horizon sableux-horizon argileux. Transition sols de levée-sols de cuvette.

Utilisation de la géophysique pour connaître la succession des différents horizons et leur épaisseur.

Mise en oeuvre du CEM (schéma d'échantillonnage de 25x25 m).

Détermination d'un schéma d'échantillonnage le long de ces arroseurs, fonction :

- de la caractérisation pédologique
- du gradient de sodicité supposé
- des résultats du CEM (afin de permettre de calibrer les résultats obtenus)

On effectuera des prélèvements d'échantillons pour une analyse chimique et pour la rétractométrie.

Caractérisation hydrogéologique

Les piézomètres installés permettront de caractériser le fonctionnement global de la nappe à l'échelle d'un arroseur, et de mesurer l'évacuation de sels qu'elle permet. Leur densité sera plus importante à proximité des parcelles dont on effectuera le bilan hydro-salin, afin de pouvoir mettre en relation le fonctionnement des eaux de surface et des eaux souterraines.

Installation de piézomètres:

- Sols de levée : à deux profondeurs, dans l'horizon superficiel où il peut y avoir une formation de nappe perchée et dans l'horizon profond sableux.
- Sols de cuvette : dans l'horizon profond sableux.

Mesure des conductivités hydrauliques : par slug test et par essai de pompage.

Ces mesures permettront de caractériser les conductivités hydrauliques de l'horizon sableux profond et de l'horizon sablo-limoneux superficiel. La perméabilité verticale de la couche argileuse (effets de drainance) sera aussi évaluée.

Suivi piézométrique : hauteur, CE, pH, Eh, Alcalinité, P_{O2}, Cl.

Bilan hydro-salin

Au niveau d'une parcelle de 1000 m²

(On effectuera un choix conjoint de parcelles pour le suivi agronomique en milieu paysan et le bilan en eaux et en sels).

Bilan hydrique :

- Estimation du stock initial
- Mesure des débits entrant et sortant (jaugeage et bilan à partir de la topographie de la parcelle). On veillera à limiter les pertes latérales.
- Estimation de l'ETR (lysimètre, 2 à 3 par parcelles, représentatifs de la densité de riz), et dans les sols de levée, installation d'un anneau afin d'en déduire la percolation.
- Pluviométrie.

Bilan chimique :

- Composition de l'eau entrant et sortant
- Suivi de la composition lame d'eau (pH, CE, alcalinité, Cl)
- Bougies poreuses à 3 profondeurs (20-40-60 cm) pour suivre la composition de la solution du sol.

(les mesures effectuées sur la nappe phréatique ont été explicitées par ailleurs)

Au niveau d'une rigole d'arroseur, d'un arroseur, d'un partiteur et d'un distributeur.

Mesure des débits entrants et sortants, ainsi que des propriétés chimiques de ces eaux.

Impact agronomique de la dégradation

En milieu contrôlé

Des parcelles expérimentales seront menées à l'optimum technique sur plusieurs parcelles diversement affectées par la dégradation par alcalinisation/sodisation.

- Caractérisation de la couverture pédologique.
- Suivi des composantes du rendement.

En milieu paysan

- Caractérisation de la couverture pédologique.
- Suivi des pratiques paysannes à l'échelle de la maille hydraulique et de l'association villageoise.
- Suivi de l'élaboration du rendement.
- Suivi de la parcelle et des pratiques culturales.

REFERENCES

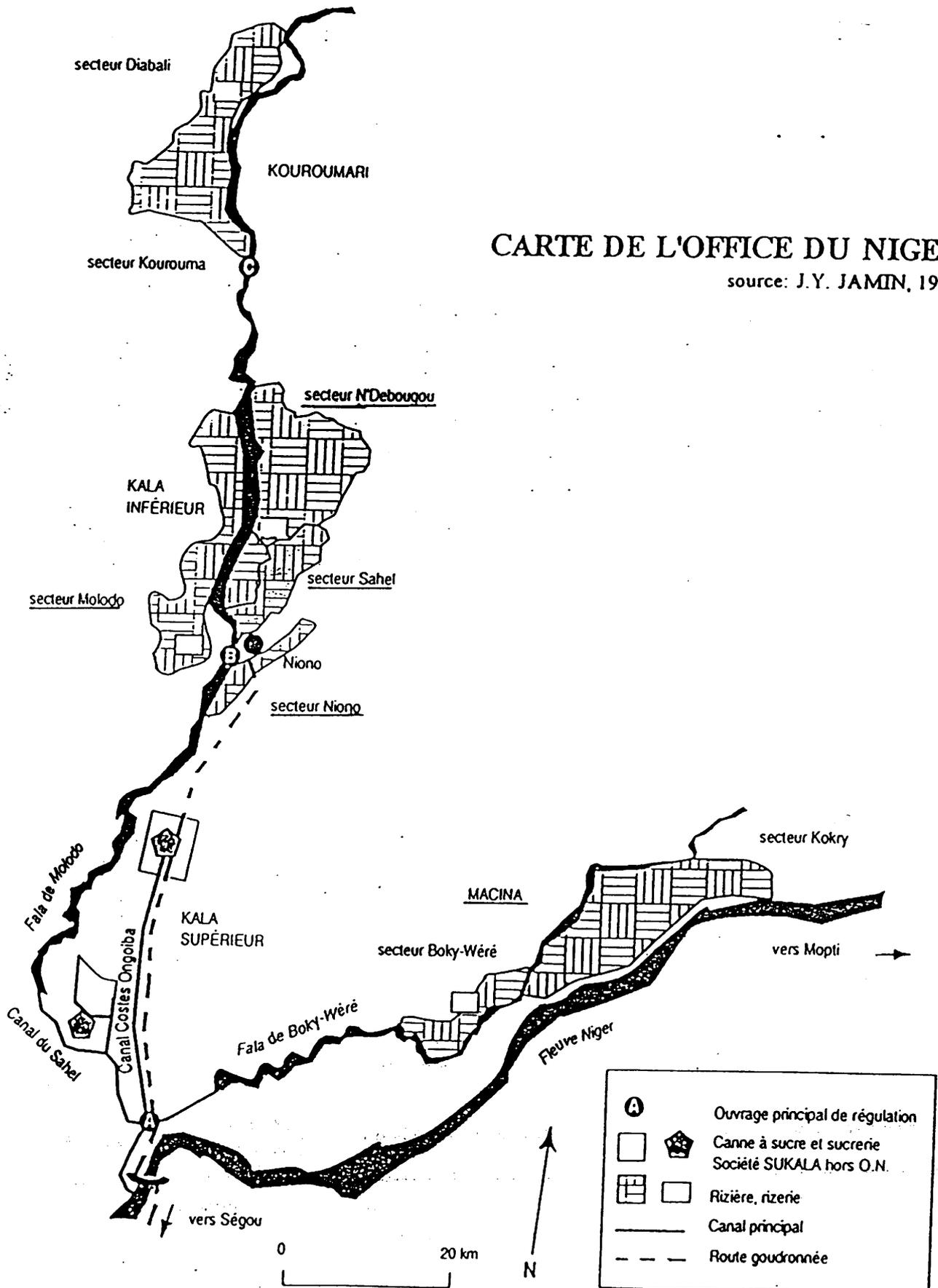
- Abrol and al ,1988. Salt affected soils and their management. Soil bulletin 39, FAO, Rome.
- AHT, 1990. APD Réhabilitation du périmètre de N'débougou.
- B.EAU, 1980. Besoins en eau au niveau arroseur. Riz - Canne à Sucre. Rapport d'études. Université Agricole Wageningen.
- Bengaly K., 1995. Contribution à l'étude de la gestion de l'eau dans les périmètres irrigués de l'Office du Niger. Cas du casier Retail. Mémoire de fin de cycle. IPR de Katibougou. 78 pages et annexes.
- Bertrand, 1981. Sols salsodiques et cultures irriguées avec des eaux salines. GERDAT-IRAT, 44pages.
- Bertrand R., 1985. Sodisation et alcalisation des sols de l'Office du Niger (Mali). Rapport de mission d'appui à la thèse de M. Kabirou Ndiaye. IRAT. 25 p.
- Bertrand R. Keita B. et M.K.Ndiaye, 1993. La dégradation des sols des périmètres irrigués des grandes vallées sub-sahariennes. (Cas de l'Office du Niger au Mali). Cahiers de l'Agriculture 1993;2:318-29
- Cheverry C., 1974. Contribution à l'étude pédologique des polders du lac Tchad. Dynamique des Sels en milieu continental subaride dans des sédiments argileux et organiques. Thèse de Docteur ès-Sciences naturelle de l'ULPS. 245 pages et annexes.
- Coulibaly M., 1988. Etude des sols du projet Retail. Mémoire de fin de cycle. ENI. 52 pages.
- Dabin, 1951. Contribution à l'étude des sols du delta central nigérien. Agronomie tropicale vol 6, n° 11-12, pp 604-635.
- Dicko, 1989. Etude agropédologique et hydrodynamique de la Salinisation et de l'Alcalinisation des terres de l'Office du Niger. Cas de la Zone de Production rizicole de Niono. Mémoire de fin de cycle. IPR de Katibougou. 34 pages
- Dicko et M.K. Ndiaye, 1994. Caractérisation des sols irrigués. Rapport volet Salinisation. 9pages et annexes
- Droubi A. Al, 1980. Generalised residual alkalinity concept: application to prediction of the chemical evolution of natural waters by evaporation. Am. J. Sci., 280, 560-572.
- G. eau, 1984
TI: Rapport principal sur la gestion de l'eau et l'expérimentation agricole dans le périmètre irrigué de l'Office du Niger.
TII: Gestion de l'eau.
TIII: Expérimentation agricole
Université de Wageningen, Pays Bas.
- Jamin, 1994. De la norme à la diversité: l'intensification rizicole face à la diversité paysanne dans les périmètres irrigués de l'Office du Niger. Thèse, CIRAD. Montpellier, 256 pages.
- Keita B., B. Koukandi, D. Diarissou et L. Dioni, 1991. Etude Morphopédologique du Kala inférieur (1/20 000). Rapports et cartes. IER.
- Le Brusq J.Y., Loyer J.Y., 1981. Relation entre les mesures de conductivité sur des extraits de sols de rapport sol-solution variables dans la vallée du fleuve Sénégal. ORSTOM, Centre de Dakar-Hann, 13 p.
- Mendez del Vilar P., Sourisseau J.M., Diakité L. 1995. Les premiers effets de la dévaluation sur les filières riz irrigués au Sahel. Le cas du Mali. IER/CIRAD. 140 p.
- Molle F., 1993. Projet retail (Mali) Volet recherche développement. CIRAD-SAR. 299pages.

- Ndiaye, 1987. Evaluation de la fertilité des sols à l'Office du Niger (Mali). Contribution à la recherche de causes de la dégradation des sols dans la Kouroumari. Thèse de Docteur Ingénieur. INPT, 134p et annexes.
- Ndiaye M.K., Van Slobe E., Y. Doumbia, A. Traoré et collaborateurs, 1990. Identification de l'alcalinisation/Salinisation des sols de l'Office du Niger. Zone de Niono. 27 pages.
- Richards L.A., 1954. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali soils. US Agric. Handbook, n° 60, USDA, Washington, VIII, 160 p.
- Sanogo, 1990. Le puddlage : un remède contre l'alcalinisation-sodisation des sols à l'Office du Niger ? Note de synthèse, Office du Niger, Ségou. 10 p.
- Servant J., 1975. Contribution à l'étude pédologique des sols halomorphes. L'exemple des sols salés du Sud et du Sud-Ouest de la France. Thèse de Docteur ès science naturelles. UST du LANGUEDOC.
- Sidibé, 1987. Contraintes pédologiques à la production de la canne à sucre dans le périmètre de Dougabougou. Thèse INA. 150 p.
- SOGREAH, 1982. Aménagement hydro-agricole dépendant du canal du Sahel. Partie I: Les sols. 20 p.
- Sumner M.E., 1993. Sodic soils : New Perspectives. Aust. J. Soil Res., 1993, 31, 693-750.
- Tangara B. et K. Dicko, 1994. Suivi hydrodynamique de la nappe phréatique à l'Office du Niger. 9 pages et annexes.
- Toujan M., 1980. Aménagement hydro-agricole dépendant du canal du Sahel. Evolution des sols irrigués. Rapport de mission. SOGREAH, 16 p.
- Tréa C. et E. Kharbotty-Rhill. 1990. Identification de Salinisation, d'Alcalinisation et de Sodisation des terres à l'Office du Niger. 46 pages et Annexes
- Vallès V., Bertrand R., Bourgeat F. et N'diaye M.K. Le concept d'alcalinité résiduelle généralisée et l'irrigation des sols sodiques. Application aux sols du Kouroumari (Mali) et de la vallée de l'oued Mejerdah (Tunisie). Agronomie tropicale 44-3, 157-163.
- Van Diepen, 1984. Etude des casiers rizicoles de l'Office du Niger au Mali. Rapport de mission.
- Van Driel W.F., 1989 Salinisation, Alcalinisation et Sodisation des terres de l'Office du Niger (Mali). Rapport de mission. 56 pages.
- Van Hoorn J.W., 1992. Evaluation de la première phase au sujet de l'identification des problèmes d'alcalinisation/Salinisation des sols à l'Office du Niger et proposition pour une deuxième phase d'études et d'essai. Université Agronomique de Wageningen.
- Van Hoorn et al, 1994. Salinity Control. In: "Drainage Principles and Application" H.P.Ritzema (Editor in chief) ILRI Publication 16.
- Wietze V, M.K. Ndiaye, M. Doumbia, A. Traoré, 1991. Fertilité des sols du Mali Sud/Office du Niger. Interprétation des données analytiques des sols et des plantes. Cellule Agro-pédologie/ Projet Laboratoire des Sols. 149 pages et annexes.
- Wijnja et Bruggenwert, 1994. Salinisation and alcalinisation of the soils in Office du Niger. Institut d'Economie Rurale/Wageningen Agricultural University.

Annexe 1: Carte de l'Office du Niger

CARTE DE L'OFFICE DU NIGER

source: J.Y. JAMIN, 1995



Annexe 2: Résultats de l'enquête par village.

SC : Superficie en simple culture enquêtée
 DC : Superficie en double culture enquêtée
 SP : Superficie potagère enquêtée
 ESC : superficie des efflorescences en simple culture
 EDC : superficie des efflorescences en double culture
 EP : superficie des efflorescences dans les potagers

Distributeur Grüber, zone de Niono

Village	SC	DC	SP	ESC	EDC	EP
KM 30	269.26		3.24	4.4		0.46
Foabougou	293		12.98	9.6		2.45
km36	304.64		18.8	17.4		2.95
km39	372.2	29.38	15.58	13.2	0.56	4.46
Total	1239.1	29.38	50.6	44.6	0.56	10.32
Pourcentage	Efflor SC	Efflor DC	Efflor Pot			
KM 30	1.6		14.2			
Foabougou	3.3		18.9			
km36	5.7		15.7			
km39	3.5	1.9	28.6			
Total	3.6	1.9	20.4			
Riz : sol aff. %	moursi	seno	danga			
KM 30	10.2	45.5	44.3			
Foabougou	5.2	0.0	94.8			
km36	53.7	21.7	25.7			
km39	25.0	22.7	56.5			
Total	30.5	19.7	51.5			
Pot : sol aff. %	moursi	seno	Danga			
KM 30	0.0	0.0	100.0			
Foabougou	8.2	0.0	91.8			
km36	32.9	19.7	47.5			
km39	19.1	0.0	80.9			
Total	19.6	5.6	74.8			

Partiteur Kouia, zone de Niono

	SC	DC	SP	ESC	EDC	EP			
KO5	66.8		3.3	2.55					
KO1	191.22	7.76	15.2	12.3	0.67	2.29			
KO4	241	5.75	25	9.7		2.95			
KO2	304.39	20.75	17.65	9.31		2.38			
Total	803.41	34.26	61.15	33.86	0.67	7.62			
% Riz	Efflor SC	Moursi	Seno	dian	danga	boi	cuvette	levée	
KO5	3.8	0.0	74.5	0.0	9.8	15.7	15.7	84.3	
KO1	6.4	15.4	74.8	8.1	0.0	1.6	25.2	74.8	
KO4	4.0	0.0	88.7	0.0	0.0	11.3	11.3	88.7	
KO2	3.1	0.0	50.6	0.0	0.0	49.4	49.4	50.6	
Total	4.2	5.6	72.1	3.0	0.7	18.6	27.2	72.8	
% Potager	Efflor Pot								
KO5	0.0								
KO1	15.1								
KO4	11.8								
KO2	13.5								
Total	12.5								

Partiteur Kolodougou, zone de Niono

Village	SC	DC	SP	ESC	EDC	EP			
KL0	89.84	1.2	0.2	1.5		0.05			
KL2	273.74	0.2	0.5	23.4		0.5			
KL3bis	205.04	12.25	1	7.25					
KL3	148.58		6.92	8.05		0.45			
KL1	89.12	0.35		3.75					
KL4	172.43	3.25	9.85	4.95		1.45			
Moussa w.	267.4	9.7	20.15	22		0.95			
Total	1246.15	26.95	38.62	70.9		3.4			
% Riz	Efflor SC	Moursi	Seno	dian	danga	boi	cuvette	levée	
KL0	1.7	0.0	13.3	33.3	0.0	53.3	86.7	13.3	
KL2	8.5	8.5	89.5	0.0	0.0	1.9	10.5	89.5	
KL3bis	3.5	0.0	69.7	6.9	0.0	23.4	30.3	69.7	
KL3	5.4	12.4	75.8	0.0	0.0	11.8	24.2	75.8	
KL1	4.2	0.0	40.0	0.0	0.0	60.0	60.0	40.0	
KL4	2.9	0.0	57.6	0.0	0.0	42.4	42.4	57.6	
Moussa w.	8.2	4.5	82.5	0.0	6.8	6.1	10.7	89.3	
Total	5.7	5.6	77.3	1.4	2.1	13.5	20.6	79.4	
%Potager	Super.Pot.	Efflor Pot							
KL0	0.2	25.0							
KL2	0.5	100.0							
KL3bis	1	0.0							
KL3	6.92	6.5							
KL1									
KL4	9.85	14.7							
Moussa w.	20.15	4.7							
Total	38.62	8.8							

Zone de Molodo.

Village	SC	SP	ESC	EP				
MOLODO 1	378.22	29.25	56.35	7.45				
MEDINA	573.55	19.2	16.83	5.48				
Bougouni	373.25	6.54	7.6	2.66				
Kiban	249.3	1.15	4.55	0.35				
quinzambougou	184.75	8.3	11.3	2.37				
niemina	202.78	10.33	8.44	2.45				
Diaky-were	230.75	5.81	9.12	1.71				
socourani	217.37	10.33	13.35	1.59				
Molodo 2	83.86	6.05	2.82	1.26				
faba coura	258.16	5.8	5.04	0.66				
tientienbougou	214.8	22.7	5.11	2.8				
kangaba	307.05	7.27	9.75	4.6				
kerouane	215.05	11.42	4.6	2.62				
siby	202.23	2.9521	7.66	1				
touba	240.34	6.9	3.49	1.56				
missira	310.43	13.61	18.69	4.1				
maniale	184.75	7.63	3.35					
bekaye were	104.8	12.78	2.85	2.2				
hamdallaye	348.51	10.31	8.16	1.286				
cocody	229.5	8.73	3.1	2.4				
Total	4879.95	198.3321	199.06	46.146				
	% riz	moursi r	seno	dian	danga	boi	cuvette	levée
MOLODO 1	14.9	5.3	63.8	20.2	10.6	0.0	25.6	74.4
MEDINA	2.9	22.9	46.5	0.0	18.5	12.2	35.1	64.9
Bougouni	2.0	8.6	61.2	0.0	18.4	10.5	19.1	79.6
Kiban	1.8	28.4	37.6	0.0	14.7	19.3	47.7	52.3
quinzambougou	6.1	30.4	40.5	24.8	4.4	0.0	55.1	45.0
niemina	4.2	10.5	51.5	37.9	0.0	0.0	48.5	51.5
Diaky-were	4.0	0.0	83.0	0.0	17.1	0.0	0.0	100.1
socourani	6.1	20.6	58.2	12.2	9.0	0.0	32.8	67.2
Molodo 2	3.4	0.0	97.5	1.8	0.0	0.0	1.8	97.5
faba coura	2.0	6.0	27.8	0.0	57.5	8.9	14.9	85.3
tientienbougou	2.4	7.8	78.3	3.9	9.8	0.0	11.7	88.1
kangaba	3.2	36.9	0.0	0.0	15.4	47.7	84.6	15.4
kerouane	2.1	52.2	16.3	0.0	0.0	31.5	83.7	16.3
siby	3.8	0.0	77.0	2.0	0.0	20.9	22.8	77.0
touba	1.5	22.6	0.0	0.0	57.3	20.1	42.7	57.3
missira	6.0	7.8	73.7	17.4	1.1	0.0	25.2	74.8
maniale	1.8	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
bekaye were	2.7	96.5	0.0	0.0	3.5	0.0	96.5	3.5
hamdallaye	2.3	30.4	17.8	18.4	26.1	7.4	56.1	43.9
cocody	1.4	0.6	32.6	0.0	29.0	35.5	36.1	61.6
Total	4.1	15.1	54.1	12.2	11.9	6.6	33.9	66.1

	%potager							
MOLODO 1	25.5							
MEDINA	28.5							
Bougouni	40.7							
Kiban	30.4							
quinzambougou	28.6							
niemina	23.7							
Diaky-were	29.4							
socourani	15.4							
Molodo 2	20.8							
faba coura	11.4							
tientienbougou	12.3							
kangaba	63.3							
kerouane	22.9							
siby	33.9							
touba	22.6							
missira	30.1							
maniale								
bekaye were	17.2							
hamdallaye	12.5							
cocody	27.5							
Total	23.3							

Annexe 3 : Schéma général d'un casier rizicole à l'Office du Niger

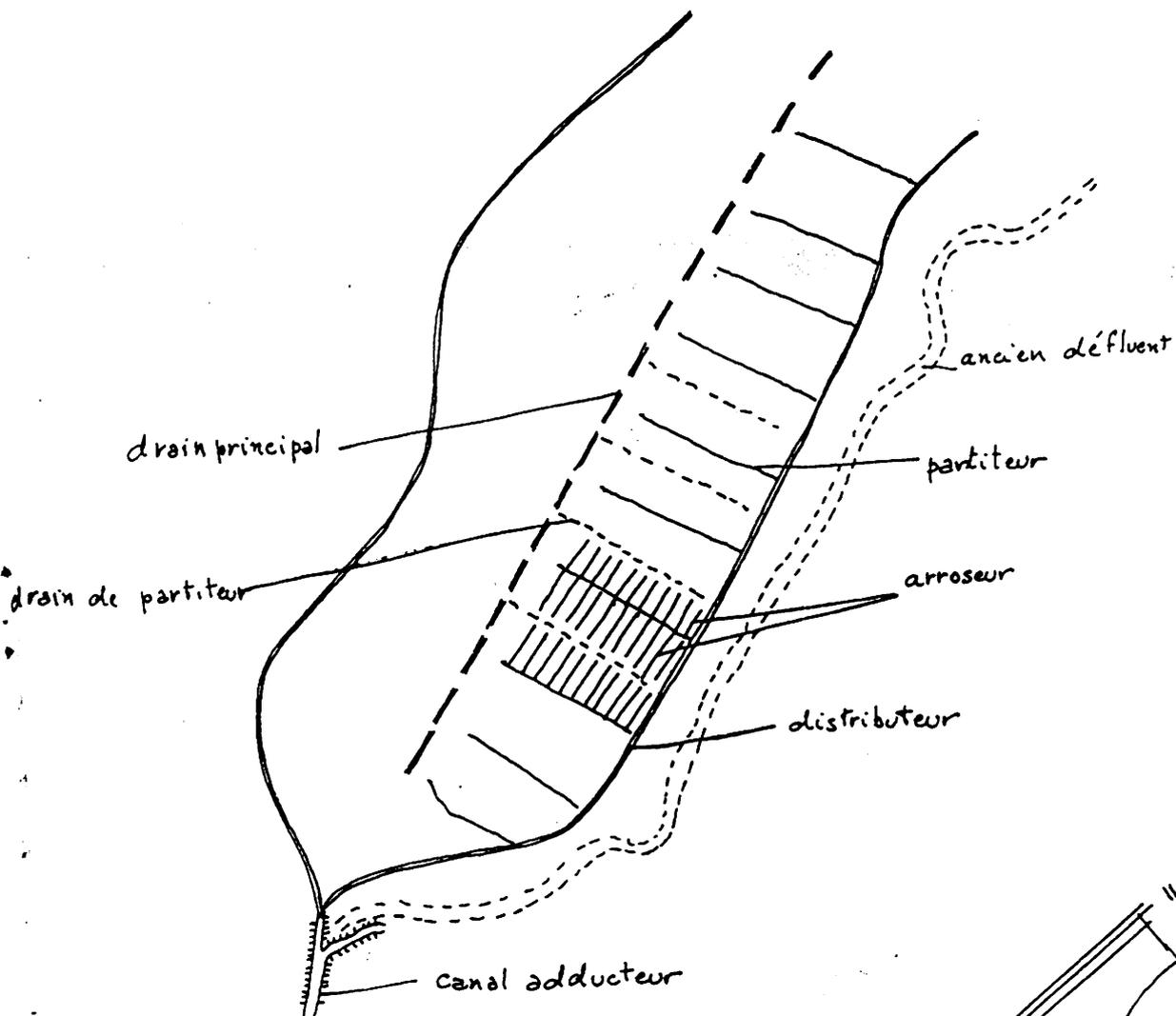


Schéma général d'un casier rizicole à l'Office du Niger

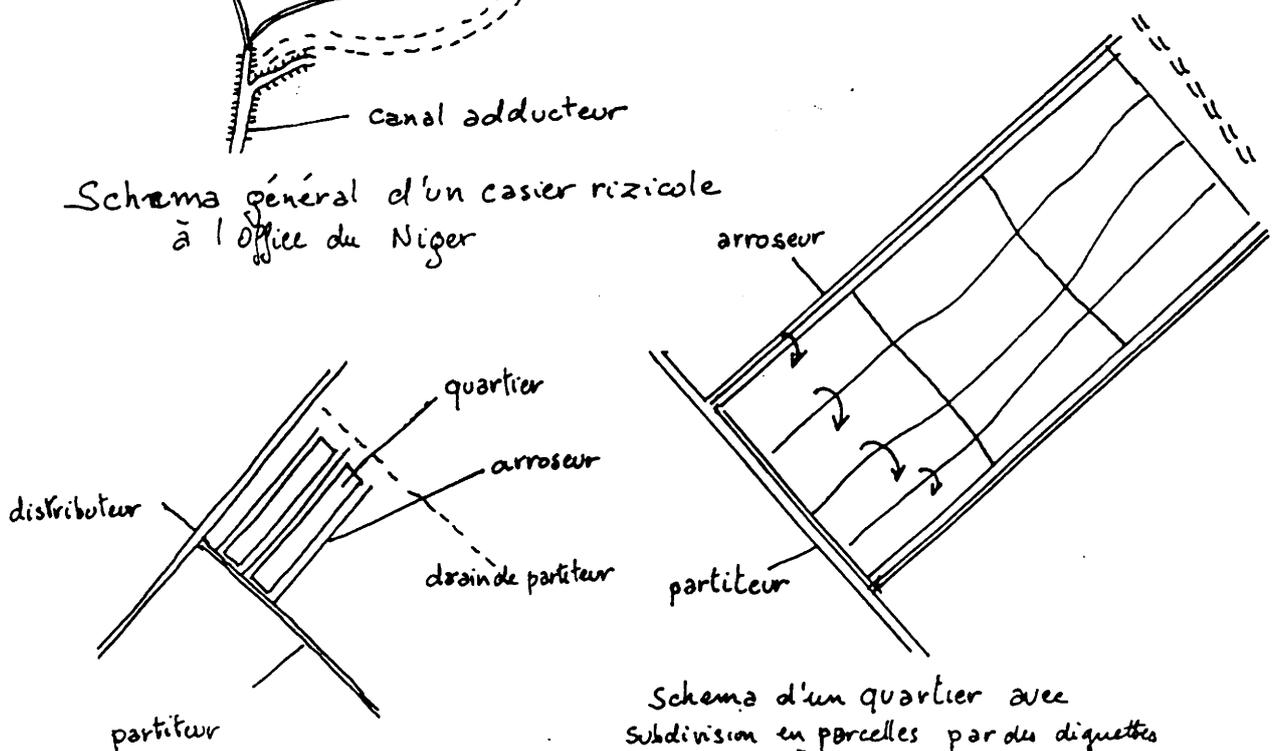


Schéma d'un quartier avec subdivision en parcelles par des diques et système d'irrigation