

Evolution des sols irrigués de la vallée du Niger (Mali)

Sodisation et alcalinisation sous riziculture

M. K. N'Diaye et D. Guindo

Office du Niger, LER/PRI, BP 07, Niono, Mali

RÉSUMÉ

Comme dans tout le Sahel, la riziculture au Mali prend aujourd'hui une place très importante. Il en est ainsi dans la plaine alluviale du delta central du Niger où la culture du riz remonte à plus de 50 ans. La production traditionnelle basée sur le semis et peu intensive a progressivement été remplacée par une production intensive en grande partie liée à la réhabilitation des périmètres irrigués anciens. Outre les aménagements des réseaux d'irrigation et de drainage, un changement dans les pratiques culturales basé sur le repiquage du riz et l'amélioration des techniques de fertilisation a été entrepris. Globalement une augmentation des rendements s'est produite. Cette progression s'est cependant faite sans que l'impact à long terme sur les sols ait été bien évalué.

La dégradation des sols irrigués gérés par l'Office du Niger est moins due à leur salinisation sensu stricto qu'aux phénomènes de sodisation et d'alcalinisation. En effet, bien que faiblement minéralisées et de SAR faible, les eaux d'irrigation ont une alcalinité résiduelle positive de sorte que leur évaporation au champ conduit à la sodisation et à l'alcalinisation des sols. La dynamique est difficile à évaluer en raison de sa variabilité spatio-temporelle élevée et de sa lenteur. Sa réversibilité est mal connue. Parfois les pH peuvent atteindre une valeur de l'ordre de 10. Des changements des propriétés physiques (tassement, stabilité structurale) sont également constatés. Ceci s'accompagne d'une remontée de la nappe phréatique qui était au départ très basse et peut aujourd'hui affleurer, surtout là où deux cultures successives sont réalisées dans l'année.

Ces différents constats sont au centre des débats actuels sur la dégradation des sols et l'avenir à long terme pour la riziculture à l'Office du Niger.

Mots clés

Fertilité, irrigation, sodisation, alcalinisation

SUMMARY

EVOLUTION OF THE IRRIGATED SOILS OF THE NIGER VALLEY (MALI) : Sodisation and alkalisation under rice growing

Rice is a very important crop in Mali, as it is in all Sahel regions. In the central delta of Niger, rice has been grown since more than 50 years. The traditional agricultural system based on sowing was gradually replaced by an intensive production which required the rehabilitation of old irrigated systems. In addition to the layouts of the systems of irrigation and drainage, a change in the cultivation methods based on re-planting of rice and the improvement of the fertilization techniques was driven. A progressive increase in the yields was followed from there. However, the long-term impact of irrigated rice cultivation on the soil properties has not been evaluated.

Recent studies show that soils are degrading, mainly due to the phenomenon of sodisation and alkalisation rather than salinisation.

Indeed, although apparently of very good quality with very low contents salts, irrigation water is very low in chlorides and sulphates anions compared to carbonates, so that its evaporation in the field drives to the alkalisation of the soils. The phenomenon is difficult to perceive because of its great spatial and temporal variability. We get few knowledge about its reversibility. Today, the pH can sometimes reach values of about 10. By the same time, changes in soil physical properties, such as compaction and decrease of stability are recorded. Another important phenomenon is the water table level increase. Very deep at the beginning of irrigation, the water table rises the topsoil level today, especially when two crops are carried out in the same year.

These various reports are in the center of the current debates about irrigated land degradation, and the sustainability of a long-term rice cultivation in the « Office du Niger » irrigation system.

Key-words

Rice, fertility, irrigation, sodisation, alkalisation

RESUMEN

EVOLUCIÓN DE LOS SUELOS IRRIGADOS DEL VALLE DEL NÍGER (MALÍ) : sodización y alcalinización bajo cultivo de arroz

Como en todo el Sahel, el cultivo del arroz en Malí toma actualmente un lugar muy importante. Es así en la planicie aluvial del delta central del Níger donde el cultivo del arroz se realiza desde hace más de 50 años. La producción tradicional basada sobre la siembra fue progresivamente remplazada por una producción intensiva en grande parte ligada a la rehabilitación de los perímetros antiguamente irrigados. Además de las instalaciones de redes de irrigación y de drenaje, se inició un cambio de las prácticas culturales basado sobre el trasplante del arroz y el mejoramiento de las técnicas de fertilización. Globalmente hubo un aumento en los rendimientos. Sin embargo esta progresión se hizo sin que el impacto a largo plazo sobre el cultivo del arroz fuera bien evaluado.

La degradación de los suelos irrigados manejados por la oficina del Níger es debida en menor grado a la salinización que al fenómeno de sodización y de alcalinización. Aunque aparentemente de muy buena calidad con muy bajos contenidos en sales, las aguas de riego son muy pobres en aniones cloruros y sulfatos de manera que su evaporación da origen a la sodización y alcalinización de los suelos. El fenómeno es difícil de prever debido a que parece variable en el tiempo y su reversibilidad es todavía mal conocida. En determinados casos los pH pueden llegar a un valor del orden de 10. Al mismo tiempo que esta evolución geoquímica, cambios de propiedades físicas (compactación, estabilidad estructural) se están registrados. Otro fenómeno importante es la subida del manto freático que inicialmente era muy bajo y que ahora puede aflorar, sobre todo donde dos cultivos sucesivos se realizan al año.

Estas diferentes constataciones se encuentran en el centro de los debates actuales sobre la degradación de los suelos. Se plantea la pregunta siguiente : cual es el porvenir a largo plazo para el cultivo del arroz de la Oficina del Níger frente a la degradación de los suelos y de su medio ?

Palabras claves

Arroz, fertilidad, irrigación, sodización, alcalinización

Dans les régions sahéliennes, la riziculture irriguée assure actuellement une grande partie de la production céréalière et constitue pour cette raison une production stratégique dans la lutte pour l'autosuffisance et la sécurité alimentaire. Ceci explique l'orientation de nombreux périmètres irrigués vers la production du riz. Il en est ainsi des périmètres de la vallée du fleuve Niger et plus particulièrement de ceux gérés par l'Office du Niger au Mali. Dans ces périmètres, la diversification des cultures ne progresse que très lentement. Aujourd'hui le riz irrigué représente 70 à 100 % de la production rizicole des pays du Sahel d'Afrique de l'Ouest (ADRAO, 1992). Au Mali il ne représente cependant que 40 % de la production nationale.

Pour accroître la production de riz des efforts considérables ont été déployés au Mali, en particulier pour aménager et réhabiliter les périmètres rizicoles. Sur les 50 000 ha aménagés de l'Office du Niger, près de 20 000 ha ont déjà été réhabilités. La réhabilitation consiste, en règle générale, à améliorer les réseaux d'irrigation et de drainage, à réaliser le compartimentage du territoire et à effectuer un planage (nivellement) des parcelles irriguées. Les investissements en ce sens se poursuivent encore aujourd'hui.

Au-delà de l'amélioration des infrastructures, des progrès ont été réalisés pour accroître la productivité. Deux techniques principales prévalent. Au départ basé sur le semis direct du riz, le système de culture est de plus en plus dominé par le repiquage. En même temps que cette évolution, les techniques de fertilisation se sont améliorées, de sorte qu'elles autorisent de forts rendements, à la condition cependant que toutes les conditions soient par ailleurs réunies. Les rendements obtenus sont en moyenne, pour l'Office du Niger, de 4,5 à 5 t/ha avec des pointes de 7 à 8 t/ha. Cette situation, qui est très encourageante, ne doit pas toutefois faire perdre de vue les faibles productions en certains endroits, par exemple de 2 t à 3 t/ha dans les parcelles dégradées et ce, même avec des conditions techniques améliorées. La dégradation physique et physico-chimique des sols est une des raisons avancées pour expliquer ces baisses de rendement (Jamin, 1994)

Ce sont les études pédologiques de Toujan (1980), Diepen (1984), Bertrand (1986) et N'Diaye (1987) qui ont montré que les sols du delta central du fleuve Niger se sont dégradés à des degrés divers. Il s'agit, comme dans les autres grands périmètres des zones arides, d'une dégradation liée essentiellement à l'évolution des sols sous irrigation. L'évolution du système de culture vers des apports d'eau croissants (passage du coton au riz irrigué par submersion) et vers une intensification (double culture annuelle) pose la question de la durabilité des systèmes actuels.

Sans pouvoir apporter une réponse précise, nous tenterons par une analyse de l'état actuel de la riziculture et de la dynamique de l'évolution des sols, de donner un point de vue jetant les bases d'une réflexion.

SITUATION DE LA RIZICULTURE AU MALI

La riziculture irriguée est pratiquée sur 48 300 ha sur l'ensemble du pays (revue du secteur agricole, 1984). Pour l'essentiel ces surfaces (43 000 ha) se situent dans les périmètres d'intervention de l'Office du Niger. Deux périmètres moyens, Baguinéda et Sélingué (respectivement 1 000 et 4 000 ha), et d'autres petits périmètres tels que celui de San (~ 450 ha) existent à travers le pays. La riziculture irriguée à l'Office du Niger est caractérisée par un système d'irrigation gravitaire : l'eau provient de canaux surélevés, de sorte que la submersion des parcelles se fait par un écoulement gravitaire depuis les canaux, sans coût de pompage. L'eau n'étant pas facturée, cette situation favorise les surconsommations.

On distingue différents systèmes de culture en fonction du mode d'implantation des cultures, des pratiques de fertilisation, du niveau d'équipement et de l'intensité culturale (nombre de cultures par hectare aménagé et par an). Deux grands systèmes correspondant à deux grandes zones prévalent :

- Une zone dite non réaménagée. Dans ce cas, on utilise peu ou pas d'engrais et le niveau d'équipement est faible. Ce système concerne les premiers aménagements réalisés sans planage, avec un compartimentage sommaire du territoire réalisé par les paysans eux-mêmes.

- Une zone dite réaménagée. Pour ces parcelles, les besoins en eaux des cultures sont satisfaits au mieux et la maîtrise de l'eau est assurée dans des conditions considérées comme optimales. L'implantation de la culture est réalisée par repiquage et les quantités d'engrais utilisées sont suffisantes pour répondre de manière correcte aux besoins de cultures. Le niveau d'équipement des agriculteurs permet une bonne préparation du sol.

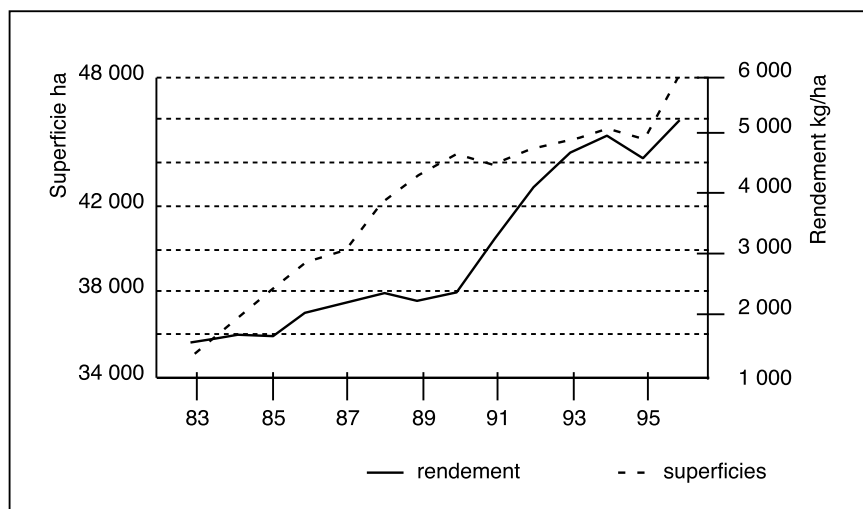
Suivant les zones et suivant les situations à l'intérieur de chaque zone, les rendements varient de 2,5 t/ha dans le premier système de culture à 6 t/ha en moyenne en zone réaménagée. On notera que depuis 1985, date à partir de laquelle les rendements moyens étaient de l'ordre de 2,20 t/ha, une montée constante des rendements s'est produite pour atteindre 4 t/ha à partir de 1990-1991 et 5 tonnes en moyenne en 1995 (figure 1).

On doit noter que la double culture du riz est aussi pratiquée. Ce système à deux cultures par an a été introduit sur le tiers de surface de certaines parcelles. A noter que la mise en eau permanente des canaux a des conséquences sur la recharge des nappes, d'autant plus que les parcelles en double riziculture sont dispersées dans l'espace.

Ce qui précède donne la mesure des investissements effectués par l'Office afin d'améliorer la production du pays. On doit cependant regretter que les rendements restent encore parfois beaucoup trop modestes. Il apparaît donc que la réhabilitation

Figure 1 - Evolution des superficies et des rendements à l'O.N. de 1983 à 1996

Figure 1 - Surface and yield evolution at O. N. from 1983 to 1996



des périmètres irrigués n'a été que partielle si on se réfère aux efforts des producteurs pour améliorer leur technicité. En effet, avec des techniques et dans un contexte similaire, un niveau de rendement plus élevé et surtout plus constant aurait pu être atteint si des contraintes édaphiques, telles que la salinisation/alcalinisation, n'avaient pas été rencontrées.

LA DÉGRADATION DES SOLS GÉRÉS PAR L'OFFICE DU NIGER

Cette dégradation est liée à la qualité des eaux d'irrigation, et sa dynamique est dépendante de la remontée de la nappe phréatique.

Présentation

Dans les périmètres irrigués avec l'eau du fleuve Niger, la dégradation des sols se manifeste sous deux formes essentielles : la sodisation et l'alcalinisation. La salinisation sensu stricto, en tant qu'accumulation de sels solubles, reste moindre.

Depuis leur mise en culture, les sols de la zone d'intervention de l'Office du Niger, ont été relativement peu étudiés. La plus importante étude pédologique effectuée sur le delta est sans doute celle de Dabin (1946, 1952). Cette étude à l'échelle 1/50 000 et souvent à l'échelle 1/20 000, a couvert l'ensemble du périmètre actuellement aménagé. Dabin (1951) avait pu établir un lien entre la structure dégradée de certains sols et un rapport Na/Ca élevé. Il a aussi observé que la faible structuration des sols de type « danga » était due à leur caractère sodique croissant avec la profondeur. En 1952, des sols à « salant noir » ont été identifiés dans le Macina et à Niono.

En 1980, Toujan a étudié les sols irrigués concernés par la réhabilitation des périmètres de l'Office du Niger. Il est parti de 17 points anciennement étudiés par Dabin et a repris les analyses en utilisant les mêmes méthodes. Ces résultats posaient clairement les bases de changements des propriétés physiques et chimiques des sols, à savoir :

- une perte importante de la stabilité structurale qui se traduit par une diminution d'environ 50 % du taux d'agrégats stables dans l'eau,

- un tassement systématique du sol,

- une chute considérable de la perméabilité,

- une augmentation du pH d'environ une unité avec localement une valeur du pH supérieure à 9,

- la présence de sodium en très forte quantité sur le complexe d'échange.

En 1984 et dans le cadre de l'intervention des programmes néerlandais, van Diepen a poursuivi des études sur les sols gérés par l'Office du Niger. Cet auteur a abouti à des conclusions très similaires à celles de Toujan (1980), à savoir que la salinisation et l'alcalinisation sont des contraintes édaphiques importantes dans les périmètres irrigués.

En 1985, Bertrand a observé les signes d'alcalinisation et de sodisation des terres dans le Kouroumari, zone occidentale du delta mort. Il a émis deux hypothèses sur les origines probables de la salinisation. Il a montré l'importance de la qualité de l'eau du fleuve Niger, mais il a aussi souligné l'importance de remontées capillaires à partir d'une nappe profonde d'origine géologique fortement salée. Ces hypothèses ont été vérifiées par N'Diaye en 1987.

En utilisant des méthodes géochimiques, ce dernier auteur a pu montrer que la qualité de l'eau du fleuve Niger est la cause première de la dégradation des sols vers la voie de sodisation-alcalinisation. Cette eau, qui possède une alcalinité résiduelle positive, conduit, en se concentrant sur place, à la précipitation de la calcite avec les conséquences sur les équilibres chimiques que l'on connaît, à savoir une tendance vers la sodisation du milieu.

Par la suite van Driel (1989) a repris les études en examinant trois

grands thèmes (i) évaluation de la situation agronomique des périmètres, (ii) compréhension des phénomènes géochimiques mis en jeu lors de l'irrigation et (iii) recherche de solutions permettant de remédier à la dégradation. Dans ce cadre, N'Diave et al. (1991) ont montré que 7 % des parcelles rizicoles et 34 % des parcelles maraîchères étaient dégradées et que la dégradation devait prendre en compte trois grands groupes de facteurs à savoir, le type de sol, le type d'aménagement et le système de culture.

En 1992, Bertrand a complété cette analyse en montrant que sur 25000 ha, 50 % des sols sont alcalinisés ou en cours d'alcalinisation. Les mesures de pH, de taux de sodium et les conductivités électriques indiquent que le problème est plus grave en profondeur qu'en surface.

Importance de la qualité des eaux d'irrigation

De façon générale, les eaux d'irrigation des grands fleuves sahéliens sont très peu minéralisées. Pour cette raison, elles ont longtemps été considérées comme peu dangereuses pour l'irrigation.

Les connaissances géochimiques actuelles ont permis de montrer que ces eaux, malgré leur faible minéralisation, sont avant tout carbonatées de sorte que leur concentration par évaporation concourt à rendre le milieu sodique et alcalin. La composition des eaux de quelques fleuves est donnée dans le tableau 1. On peut noter que ces eaux présentent une certaine quantité de carbonate et de bicarbonate, relativement au chlore et au sulfate, ce qui confère une alcalinité résiduelle calcique positive (Droubi, 1976).

Par évaporation, les solutions atteignent rapidement leur saturation par rapport à la calcite. Dans ce cas, l'activité du calcium dans le milieu diminue considérablement. Il en résulte que les teneurs relatives en carbonates de sodium et le taux d'adsorption du sodium croissent (SAR, Sodium Absorption Ratio) et que la teneur en sodium du complexe d'échange des argiles et le pH augmentent simultanément : une instabilité des argiles et une dégradation physico-chimique du sol en résultent.

Par exemple sur des sols pauvres en calcium comme les sols hydromorphes à Gley oxydé (« Danga »), la forte saturation du complexe d'échange des argiles avec du sodium est un élément très défavorable à de nombreuses propriétés. Au plan physique, on constate généralement une forte compacité (forte densité apparente) et une faible perméabilité avec une évolution du sol vers la voie alcaline que dénote l'augmentation du pH, proche de 10 par endroit.

Remontée de la nappe phréatique

Au début des aménagements, le niveau de la nappe phréatique se situait entre 40 et 60 m de profondeur. Aujourd'hui, elle est affleurante à certaines périodes de l'année alors qu'en période d'étiage le niveau piézométrique se situe entre 1,50 à 2,50 m en moyenne.

Les causes de la remontée de la nappe phréatique dans les périmètres rizicoles, sont multiples (N'Diave et al., 1990 ; Tangara, 1995). On notera, entre autres, la consommation trop importante d'eau par rapport aux besoins, le fonctionnement déficient du réseau d'assainissement et la forme particulière de cuvette du delta mort du fleuve Niger qui ne permet pas l'évacuation correcte des eaux de drainage. A l'office du Niger, le

Tableau 1 - Composition chimique des eaux de quelques grands fleuves sud-sahariens en meq/l.

Table 1 - Chemical composition of water of some large south-Saharan rivers in meq/l.

	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻ CO ₃ ²⁻	Alcalinité
Fleuve Niger Mali	0,13	0,12	0,03	0,13	0,01	0,005	0,00	-	0,42
- Niono	0,97	0,55	0,99	2,95	0,96	2,13	0,04	16,08	3,37
- Diabaly nappe									
Fleuve Niger au Niger Lossa (étiage)	0,37	0,21	0,20	0,59	0,00	0,03	0,00	1,47	1,35
Fleuve Sénégal à :									
- Kaédi	0,27	0,46	0,03	0,08	0,24	0,00	-	0,90	0,58
- Bodj	0,23	0,31	0,03	0,14	0,38	0,15	-	0,55	0,18
- Bakao	0,28	0,24	0,02	0,08	0,05	0,19	-	0,08	0,36
- Akibé	0,24	0,39	0,04	0,09	0,32	0,00	-	0,80	0,44
Fleuve Logone à Lai	0,17	0,13	0,04	0,14	0,01	0,01	0,00	0,45	0,47
Fleuve Chari à Shar	0,23	0,19	0,05	0,10	0,01	0,01	0,00	0,54	0,54

transport de l'eau jusqu'à la parcelle repose sur l'existence de canaux d'irrigation où l'eau circule par gravité. La technique d'irrigation est celle de la submersion classique utilisée en riziculture. L'eau arrive à la parcelle par des canaux, qui sont situés sur des levées alluviales du fleuve, actuelles ou anciennes, souvent très sableuses et perméables, aussi bien en surface qu'en profondeur.

Dans les années 80, l'utilisation de l'eau se faisait de manière très désordonnée, voire anarchique. Le fait de maintenir les canaux en eau toute l'année a contribué, avec l'augmentation des surfaces irriguées, à alimenter continuellement la nappe phréatique et donc à faire progressivement remonter la nappe. Si l'affleurement de la nappe phréatique ne gêne pas, outre mesure, la culture du riz, la chimie des sols dépend en grande partie de ses mouvements. En effet, les mouvements de la nappe phréatique modulent la dynamique des sels en créant une dynamique verticale ascendante qui, en l'absence de lessivage, est principalement le fait de l'évapotranspiration. Il s'agit en particulier de la remontée des sels par capillarité jusqu'au niveau de la zone racinaire. On comprend dès lors son impact sur l'évolution des sols vers les faciès salins, voire sodiques et/ou alcalins suivant la qualité de l'eau de nappe. Il est à noter que la présence d'une nappe affleurante, réduit de plus en plus les choix des cultures de diversification.

CONSÉQUENCES POUR LA PLANTE ET IMPACTS SUR LA PRODUCTION

Alcalinisation-sodisation

L'alcalinisation par voie carbonatée sodique conduit à la dispersion des argiles sodiques, qui s'accompagne d'une dissociation du complexe organo-minéral. Il y a donc perte de nutriments, diminution de la réserve en eau, et chute de perméabilité. On note alors que le travail du sol devient difficile avec des problèmes de levée des semis et un mauvais enracinement du riz. En outre, on note une baisse de la disponibilité de certains éléments dont le phosphore et le zinc. La matière organique peut aussi être solubilisée et se déposer à la surface du sol du fait des remontées capillaires. Apparaissent alors des salants noirs. Cette situation est observée sur les sols du delta en formes d'efflorescences noires dans les parcelles et surtout sur les bordures (diguettes) des canaux d'irrigation.

Les conséquences de cette dégradation peuvent être dramatiques. On peut distinguer différents aspects :

- une augmentation du potentiel osmotique de la solution qui est à l'origine d'un stress hydrique et qui empêche la plante de s'alimenter correctement en eau,
- une toxicité de certains ions spécifiques lorsqu'ils sont absorbés par la plante à une concentration préjudiciable,

- du fait de l'évolution du pH, un blocage de certains éléments entraînant une carence induite en zinc et en phosphore pour la plante,

- un changement de la dynamique de l'azote (volatilisation) et de la matière organique, conduisant à des problèmes nutritionnels pour la plante.

Ces conséquences chimiques sont préjudiciables au riz et leur importance est largement fonction de son stade de développement et de son mode d'implantation au champ (semis direct ou repiquage). Le stade juvénile est le plus sensible à la salinité. Une CE (conductivité électrique de l'eau) de moins de 4 mmhos/cm peut être suffisante pour affecter la survie des plantules lorsqu'elles restent longtemps exposées aux sels.

Naturellement, c'est au niveau du parcellaire que l'impact de la dégradation est le plus perceptible. Ainsi, Dicko et al. (1994) ont pu trouver, après deux années de mesures sur 200 placettes dégradées, des relations entre les paramètres physico-chimiques du sol et le rendement obtenu. De même Jamin (1994) a observé à Niono, une réduction de la productivité de plus de 50 % en comparant des parcelles dégradées et non dégradées (tableau 2). Le rendement moyen des zones non dégradées est de 6900 kg/ha contre 2600 kg/ha dans les parcelles dégradées. Cet auteur a toutefois noté qu'une bonne maîtrise de la lame d'eau, permet d'obtenir de bons rendements, même en situation fortement dégradée.

En 1996, Dicko a pu montrer une relation plus précise entre le pH et le niveau de rendement des cultures. Les pH élevés correspondent aux rendements les plus faibles. Cet auteur note cependant que seuls les pH mesurés après 5 à 6 semaines du repiquage peuvent être mis en relation avec la production.

Importance des techniques culturales

On distingue trois périodes importantes dans la culture du riz :

- Une première période qui va du semis au tallage. Le sol est alors seulement humecté mais non inondé au moment où les besoins hydriques de la plante restent encore faibles. Les flux d'eau et de solutés dans le sol sont alors essentiellement dus à l'évapotranspiration. Avec un faible apport d'eau, les remontées capillaires rendent possibles la remontée de sels depuis la nappe phréatique jusqu'à la surface du sol. On peut alors assister à une concentration des solutions dans les premiers cm du sol avec possibilité de dépôt salin en surface. En l'absence d'excès d'eau, la diffusion des gaz se fait correctement : le sol se trouve en conditions aérobies et il tend à être en équilibre avec la pression de CO₂ de l'atmosphère. Cependant, les plantes qui sont encore en stade juvénile peuvent souffrir de la salinité et mourir ou encore rester très faibles.

- Une deuxième période correspond à l'irrigation par submersion avec maintien d'une lame d'eau en surface. Cette

Tableau 2 - Rendements du riz et principales caractéristiques des cultures en fonction du caractère plus ou moins sodique du sol en fonction de la zone de prélèvement.

Table 2 - Rice yields and main crop characteristics obtained according to the more or less sodic character of the soil according to

Mesures effectuées zones	Zone très touchée		Zone touchée		Zone moins touchée		Moyenne de l'ensemble de	
	saine	dégradée	saine	dégradée	saine	dégradée	saine	dégradée
Hauteur (cm)	325	139	416	121	398	172	380	144
Panicules/m ²	23 800	7 500	24 900	8 200	24 700	14 300	24 600	10 100
Grains/m ²	28,2	23,9	28,1	25,7	27,9	27,3	28,1	25,6
Poids 103 grains (g)	6,7	1,8	7,0	2,1	6,9	3,9	6,9	2,6

phase est dominée par l'infiltration (flux per descencum) avec une évaporation importante de la lame d'eau superficielle. Dans cette deuxième phase, la remontée d'eau par capillarité est nulle. Comme la diffusion du CO₂ est limitée, on assiste à une remontée du pH. Les sels qui étaient en surface sont dissous. Le riz se développe, sauf là où subsistent des plages non submergées, ce qui nous ramène au cas précédent. Le tallage peut toutefois être réduit mais les brûlures et la mort de plants sont rares.

- La troisième période est plus ou moins longue suivant que l'on est en simple ou double culture, c'est à dire que le sol se trouve non irrigué pendant une période plus ou moins longue. Elle se caractérise par une évaporation intense du sol entraînant un dessèchement du profil, avec fissuration et remontées capillaires des solutions qui se concentrent en surface. Dans cette situation, la variation de pH dépend du caractère acide ou alcalin du sol.

On comprend que le semis direct des graines au champ soit le système de riziculture le plus sensible à la dégradation.

Nous voyons donc que le système cultural et la gestion de l'eau au cours de la culture déterminent largement la réussite de la culture du riz et que ces deux facteurs permettent de limiter l'apparition de conditions défavorables, notamment un risque de salinité. En effet, dès lors que les opérations de labour ont commencé, une lame d'eau reste maintenue au-dessus du sol du semis au repiquage, c'est à dire pendant une période de 21 jours environ. Les flux d'eau sont alors seulement descendants et l'évaporation ne porte que sur la lame d'eau superficielle. L'hypothèse qui prévaut est que l'eau qui est au contact du sol à l'intérieur de la couche labourée possède les propriétés de l'eau d'irrigation. Sous cette lame d'eau, la pression de CO₂ dans le sol diminue et favorise l'augmentation du pH. Les conditions anaérobies sont d'ailleurs associées à des formes réduites du fer (Fe²⁺) et de la matière organique

avec une forte consommation de protons par le milieu (Ponnenweruma et al., 1966 et 1967). A contrario, en conditions aérobies, après la récolte du riz, la remontée du pH est liée au rejet de protons dans le milieu, en relation avec les phénomènes de minéralisation ou/et d'oxydation qui affectent de nombreux constituants des sols (N, C, Fe, S notamment).

Au total, l'avantage de la technique de repiquage et des pratiques qui lui sont associées est donc d'éviter, contrairement au semis direct, la phase de stress hydrique (osmotique) de départ. La gestion de l'eau, au cours du cycle végétatif, est donc déterminante pour diminuer l'effet de la salinisation liée à la remontée de sels par capillarité et elle oriente le processus de sodisation-alcalinisation; mais beaucoup reste à faire pour comprendre dans le détail ce mécanisme.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les sols rizicoles gérés par l'Office du Niger au Mali sont sujets à la dégradation par la salinisation mais aussi et de façon plus importante à l'alcalinisation/sodisation. C'est ce second processus qui subsiste et sans doute reste dominant lorsque les techniques d'irrigation sont bien maîtrisées, c'est à dire que l'évacuation des sels en profondeur est effectuée.

Le maintien de bons rendements ne signifie pas que les phénomènes de dégradation liés à la sodisation/alcalinisation soient inexistantes : ils risquent seulement d'être masqués par la riziculture, comme l'attestent de très faibles rendements en conditions fortement alcalines, là où la structure du sol est fortement dégradée. En effet, malgré la qualité de la réhabilitation des périmètres rizicoles gérés par l'Office du Niger, avec en particulier une maîtrise de l'eau très satisfaisante et la généralisation du repiquage, certains rendements restent anormalement bas. Nous pensons que le problème de l'alcalinisation/sodisation est toujours latent.

Aussi plus que la salinité sensu stricto, ce phénomène joue un rôle important, même si les avis divergent sur l'importance à lui accorder.

L'alcalinisation apparaît ainsi être un phénomène potentiellement dangereux, susceptible de se mettre en place de façon insidieuse, sans que l'attention des acteurs soit réellement attirée puisque dans un premier temps le rendement des cultures est semble-t-il faiblement affecté.

Le constat actuel est que la riziculture, lorsqu'elle est effectuée avec une bonne maîtrise de l'eau, permet généralement d'assurer un niveau de production rizicole satisfaisant. Beaucoup de questions subsistent néanmoins avec notamment la question de la diversification des cultures dans ces périmètres. La gestion des cultures doit tenir compte de l'état de dégradation, surtout de l'alcalinisation qui influe de façon significative sur la dynamique des éléments nutritifs dont l'azote, le phosphore et la matière organique. Seule une gestion correcte de l'eau au niveau parcellaire est susceptible de maîtriser l'effet des sels, ainsi qu'une gestion au niveau du périmètre afin d'abaisser la nappe phréatique. Il reste encore beaucoup à faire et à comprendre pour mieux gérer l'alcalinisation de ces sols, avec peut être, la possibilité de mieux utiliser les ressources en matières organiques, en profitant notamment de la charge croissance en bétail dans la région.

sation alcalinisation à l'Office du Niger. IER/ARPON.

- N'Diaye M.K., 1987 - Evaluation de la fertilité des sols. Contribution à l'étude des causes et origines de la salinisation des sols à l'Office du Niger. Thèse de Docteur Ingénieur INP. Toulouse. 138 p.
- Ponnaweruma F.N., Estrella M., Tianco and Térésitaloy, 1966 - Ionic strength of the solutions of flooded soils and others natural aqueous solutions from specific conductance. *Soil Sci.* vol. 102, 6 : 408-413.
- Ponnaweruma F.N., 1972 - The chemistry of submerged soils. *Adv. in Agr.* 24 :29-95.
- Richards, 1954 - Diagnosis and improvement of saline and alkali-soils U.S. Hand Book n° 60, USDA 160 p.
- Tangara B, et Dicko M.K.S., 1995 - Suivi hydrodynamique de la nappe phréatique à l'Office du Niger. Niono 26 pages.
- Toujan M., 1980 - Evolution des sols irrigués. Rapport de l'Office du Niger 16 p.
- Valles V., Bertrand R., Bourgeat F., N'Diaye M.K., 1989 - 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 Medjardah (Tunisie), 44, 3.
- van Driel W.F., 1989 - Salinisation alcalinisation et sodisation des terres de l'Office du Niger (Mali). 49 p.
- van Diepen, 1984 - Etude des casiers rizicoles de l'Office du Niger au Mali. Rapport de mission.

BIBLIOGRAPHIE

- Bertrand R., Keitab., N'Diaye M.K., 1993 - La dégradation des sols des périmètres irrigués des grandes vallées Sud-Sahariennes (cas de l'Office du Niger). *Cahiers d'Agricultures* 1993-2-318-3-29.
- Bertrand R., 1986 - Sodisation et alcalinisation des sols de l'Office du Niger. Rapport de mission IRAT/C@ 25 pages.
- Chevery Cl., 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 Naturelles. Université Strasbourg 262 pages + annexes.
- Dabin B., 1951 - Contribution à l'étude des sols du delta central Nigérien *Agronomie tropicale* 6 (11-12).
- Dicko M.K. et N'Diaye M.K., 1994 - Caractérisation des sols irrigués. Rapport volet salinisation/projet laboratoire des sols - Mali.
- Droubi (Al-), A. 1976 - Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermodynamique de simulation. Application aux sols salés du Tchad. Thèse Université Louis Pasteur Strasbourg, Ed. CNRS, 175 p.
- F.A.O. 1988 - Salt affected soils and their management. F.A.O. soil bulletin N° 39. 129 pages.
- Jamin J.Y., 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 de doctorat INA-PG. 256 p.
- N'Diaye M.K., Risselada D., Traore A., Slobe E.V., Dogia Y. et Collaborateurs 1990 - Identification des problèmes de dégradation des sols par salini-