

# Relations entre les propriétés des sols de rizières inondées et la toxicité ferreuse en basse Casamance (Sénégal)

## Études, revue et synthèse de travaux antérieurs

Klaus PRADE <sup>(1)</sup>, Johannes C.G. OTTOW <sup>(2)</sup>, Vincent A. JACQ <sup>(3)</sup>, Georges MALOUF <sup>(4)</sup> et Jean-Yves LOYER <sup>(5)</sup>

<sup>(1)</sup> Institut für Umwelt-Energie-und-Geotechnik GmbH (UEG), Wilhelm-Will-Strasse 7, Postfach 210147, D-6330 Wetzlar 21, Allemagne – <sup>(2)</sup> Institut für Mikrobiologie und Landeskultur, Justus-Liebig Universität, Senckenbergstraße 3, D-6300 Giessen, Allemagne – <sup>(3)</sup> Laboratoire de Microbiologie ORSTOM, Case 87, université de Provence, 3, Place Victor-Hugo, F-13331 Marseille Cedex 3, France – <sup>(4)</sup> Centre ISRA de Djibélor, Casamance, Sénégal – <sup>(5)</sup> Pédologie ORSTOM, Laboratoire des Sols Salés, Centre ORSTOM, 2051, Avenue du Val-de-Montferrand, BP 5045, F-34032 Montpellier Cedex, France

### RÉSUMÉ

Dans cette revue, les auteurs, à partir, d'une part, de données analytiques obtenues sur 51 sols de rizières de basse Casamance (établies en majorité sur des sols de mangroves) et, d'autre part, des observations simultanées des symptômes du "bronzing" (confirmés par des analyses foliaires), suggèrent que, dans cette région, la toxicité ferreuse, relativement intense, serait essentiellement due à une faible disponibilité du potassium et/ou du phosphore. Cette double carence est liée à la nature des argiles (kaolinites), à leur teneur dans les sols et à leur capacité d'échange. C'est sur ce premier point que ces sols diffèrent significativement de ceux situés plus au nord (estuaire de la Gambie ou delta du fleuve Sénégal) qui sont totalement insensibles à cette maladie du riz et dans lesquels les formes d'argile dominantes sont des smectites (en Gambie) ou des kaolinites, mais associées à des illites (basse vallée et delta du fleuve Sénégal). D'autres paramètres du sol, généralement considérés comme des conditions préalables à l'apparition des toxicités ferreuses, telles de fortes acidités, des concentrations relativement élevées en ions ferreux dans la solution du sol, et de faibles teneurs en magnésium, apparaissent de moindre importance pour provoquer cette intoxication.

MOTS-CLÉS : Rizières - Sénégal - Sols sulfatés acides - Mangroves - Toxicité ferreuse - Argiles - Engrais minéraux - Carences - Nutrition minérale du riz.

### ABSTRACT

#### CHARACTERIZATION OF FLOODED RICE SOILS SUSCEPTIBLE TO IRON TOXICITY IN LOWER CASAMANCE (SENEGAL) STUDIES, REVIEW AND SYNTHESIS OF PREVIOUS PAPERS

In this review, significant soils parameters are discussed which may be considered as main factors responsible of iron toxicity ("bronzing") in wetland rices. Based on the discussion of soil properties obtained from 51 susceptible rice soils (mostly established on mangrove soils) in Lower Casamance and in relation to the observation of bronzing symptoms (as evidenced during both fields surveys and plot experiments, and proved by soil and foliar analysis) iron toxicity is explained by a deficiency of major plant nutrients as K and/or P and sometimes Mg. The nutrient deficiencies are correlated to low clay content, with insufficient cation exchange capacity (kaolinite). Such soils have a low buffering capacity and a low concentration in available nutrients. They differ, by such properties, from the well-buffered rice soils situated either around Gambia River Estuary or in Senegal River Delta. These later soils contain smectites as the predominant clays or significant amounts of illites associated with kaolinites. Pechochemical parameters such as the very low pH (about 4.0) and/or the relatively high amount of ferrous iron in soil solution are

*not essential prerequisites for the excessive uptake of Fe. The nutritional disorder rather than either low pH or high Fe(II) content in solution is considered to be essential for iron toxicity in these wetland rice soils.*

KEY WORDS : Flooded rice - Senegal - Acid sulphate soils - Mangroves - Iron toxicity - Clay - Mineral fertilization - Deficiency - Rice mineral nutrition.

## 1. INTRODUCTION

L'assimilation excessive des ions ferreux par les racines du riz se traduit par des symptômes foliaires relativement typiques, décrits, le plus souvent, dans les pays de langue anglaise, sous les termes de "bronzing disease" (PONNAMPERUMA *et al.*, 1955) ou de "orange disease" (TANAKA & YOSHIDA, 1970 ; HOWELER, 1973). Elle a pour conséquences une forte diminution des rendements et la mort de certains plants, à différents stades végétatifs (PRADE, 1987). La toxicité ferreuse, seule ou associée à d'autres formes d'intoxications du riz inondé, a été observée dans presque tous les continents, sur des sols de rizières très différents : entisols, inceptisols, ultisols et oxisols (SAHU, 1968 ; VAN BREEMEN & MOORMANN, 1978 ; OTTOW *et al.*, 1982 ; FRENEY *et al.*, 1982). Les sols sensibles représentent déjà plus de 100 millions d'hectares pour la seule Asie (PONNAMPERUMA, 1983).

Un certain nombre de pédologues, de physiologistes du riz et de microbiologistes du sol avaient conclu, jusqu'à une date relativement récente, que *tous ces sols de rizière à toxicité ferreuse se caractérisaient par une grande disponibilité en fer ferreux dans la solution du sol*. Il a été constaté, au 2<sup>e</sup> Symposium sur les sols sulfatés acides (Dakar, janvier 1986 ; proceedings édités par DOST, 1988), qu'il reste, encore actuellement, impossible de définir une quelconque limite supérieure en concentration d'ions ferreux dans la solution du sol à partir de laquelle apparaît systématiquement cette toxicité. L'existence d'une telle limite semblait pourtant suggérée, dix années plus tôt, par TADANO & YOSHIDA (1978) et par VAN BREEMEN & MOORMANN (1978). Aussi, il a pu apparaître nécessaire de faire appel à d'autres hypothèses, dont celle basée sur les carences nutritionnelles du riz, en potassium principalement (TANAKA & YOSHIDA, 1970 ; TANAKA & TADANO, 1972). Cette nouvelle approche des causes de la toxicité ferreuse est aussi celle de TROLLDENIER (1977) et de JONES *et al.* (1982). *Des déficiences nutritionnelles multiples ont même été proposées comme la cause majeure de la toxicité ferreuse* par BENCKISER *et al.* (1982 et 1984a et b), OTTOW *et al.*, (1982 et 1983) ou par MÜNCH & OTTOW (1983), et, en ce qui concerne les rizières sénégalaises, par JACQ *et al.* (1987).

Au Sénégal, les premiers exemples de toxicité ferreuse grave survenant principalement sur des sols de mangrove aménagés depuis peu en rizières, avaient été signalés dès 1967 et étudiés à l'IRAT (1969). Mais en Casamance, il était difficile de faire la part de ce qui est attribuable à la seule toxicité ferreuse liée à l'activité bactérienne de ce qui pouvait être dû à d'autres toxicités (BEYE *et al.*, 1975). En effet, les symptômes de "toxicité ferreuse" apparaissent, le plus souvent (YOSHIDA, 1981) relativement difficiles à distinguer *in situ* de ceux de certaines carences (en K et Zn, par exemple) ou à ceux des autres toxicités (chimiques, bactériennes ou virales) qui provoquent aussi un déséquilibre dans la physiologie de la plante, et se manifestent également par des symptômes foliaires et une mauvaise floraison (ces dernières sont souvent répertoriées sous les vocables japonais "akiochi" ou "akagare"). D'autres facteurs additionnels, tels l'intoxication du riz par les sulfures (BABA, 1958) ou par des acides gras volatils (A.G.V.) qui s'accumulent lors des processus microbiens anaérobies et/ou fermentaires (TAKIJIMA, 1965) ont été mis en cause.

La participation systématique de ces processus à toute forme de toxicité ferreuse n'a jamais été formellement prouvée (YOSHIDA & TADANO, 1978 ; WILLIAMS, 1980), même si, en Haute-Casamance et dans quelques rizières de Basse-Casamance, les sulfures, également produits par la microflore associée au système racinaire, peuvent contribuer, dans certaines parcelles, au dépérissement total du riz (JACQ, 1973 et 1989). Cette "double intoxication", déjà supposée pour l'"akiochi" au Japon et en Corée (TANAKA & YOSHIDA, 1970 ; YOSHIDA, 1981), a récemment été exposée par JACQ *et al.* (1990).

Un suivi précis de parcelles choisies, et des expérimentations en microparcelles (PRADE, 1987), ont montré que les dégâts les plus marqués apparaissaient à deux stades très précis du cycle végétatif, et simultanément à l'accroissement significatif des populations bactériennes réductrices dans la rhizosphère ou sur le rhizoplan : la toxicité ferreuse "primaire" (c'est-à-dire la plus précoce) se manifeste au repiquage, puis la toxicité "secondaire" survient pendant l'épiaison et la floraison (JACQ *et al.*, 1987 ; PRADE *et al.*, 1987 et 1988).

De plus en plus de casiers ou de parcelles ont été abandonnés, en basse Casamance, du fait de l'extension récente, depuis une quinzaine d'années, des surfaces rizicoles atteintes. Ils sont devenus progressivement improductifs, pour ces raisons microbiologiques, mais aussi à cause des autres problèmes pédologiques spécifiques, répertoriés par LOYER *et al.* (1988). Ces sols "à risque" concernent à la fois les vasières de mangroves, potentiellement sulfatées acides, et les sols sulfatés acides vrais, plus ou moins évolués, et même les sols apparentés de type parasulfatés acides.

L'objet de cette revue est, à partir d'analyses faites sur le sol et la plante, de faire le point actuel des connaissances sur les facteurs édaphiques qui favorisent l'apparition de la toxicité ferreuse et expliquent la localisation des sols sensibles. Les travaux présentés ont enfin pour but de préciser la notion de toxicités d'origine microbienne (souvent improprement appelées "physiological diseases") auxquelles appartiennent les formes de toxicités ferreuses liées à l'activité bactérienne.

## 2. PRÉSENTATION DU MILIEU NATUREL

### 2.1. Les sols de rizières de basse Casamance

La riziculture traditionnelle en basse Casamance se pratique surtout, et en priorité pour bénéficier d'une bonne alimentation en eau des parcelles, sur des sols de bas-fonds ou sur les berges des marigots, primitivement colonisés par les palétuviers (*cf.* MARIUS, 1985 et schéma de la figure 1). Les sols de rizière, sauf les pépinières situées en position haute, à la bordure des plateaux (A), sont, de ce fait, dans cette partie sud-ouest du Sénégal, essentiellement des sols différenciés d'anciennes mangroves (C et D), ou dont les horizons profonds sont constitués de matériaux gardant des traces de la mangrove fossile (A et surtout B). Il s'agit, pour la plupart (E), soit de vasières profondes, potentiellement acides, soit de vrais sols sulfatés acides provenant des franges, herbeuses et plus salées, de la mangrove initiale, appelées "tannes" du nom vernaculaire désignant les étendues sursalées colonisées par des plantes halophytes (tannes herbeux) ou sans végétation (tannes nus). Ces sols se sont formés à partir des sédiments alluvionnaires du fleuve Casamance ou de ses principaux affluents (les "bolons"), nombreux et très ramifiés à l'ouest de Ziguinchor.

Ces sols de bas-fonds (C, D et surtout E), assez riches en matière organique, seraient par ailleurs les seuls disponibles, et apparemment les plus faciles à aménager par des méthodes traditionnelles pour augmenter les surfaces rizicoles. MARIUS (1985) considère que ces sols, dans leur ensemble, peuvent être

classés parmi les "sols sulfatés acides", mais avec de très nombreuses variantes, correspondant à des thio-sols et des sulfatosols (Référentiel pédologique, AFES, 1990).

Leur évolution est d'ailleurs toujours actuelle : MARIUS (1985), LE BRUSQ *et al.* (1987), BOIVIN et LOYER (1985 et 1988). La dégradation climatique, lors de la dernière décennie, jusqu'en 1988 tout au moins (LOYER *et al.*, 1988), est la cause d'une salinité accrue et d'une acidité qui continue à s'accroître, en relation avec l'abaissement des nappes et l'oxydation des sulfures (déjà signalée comme danger potentiel dans FRENEY *et al.*, 1982). Ceci avait même conduit MARIUS (1985) à suggérer la reconnaissance d'un type extrême, à pH 2, le "sulfatosol alunique", enrichi en sels sulfatés mixtes d'aluminium, de fer ou de magnésium (LE BRUSQ *et al.*, 1987).

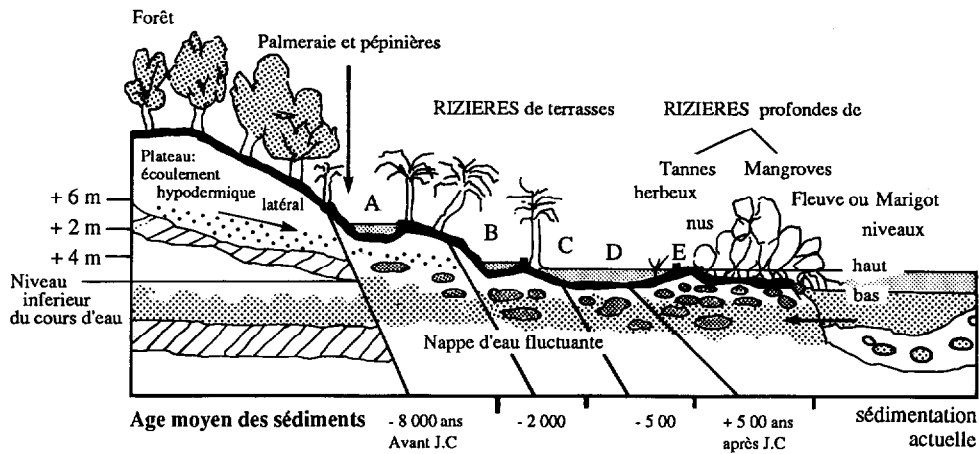
### 2.2. Sédimentation et nature des argiles

Les matériaux qui constituent les "sols sulfatés acides" au sens large, proviennent de dépôts successifs du "continental terminal", qui se sont sédimentés à la suite des modifications du niveau marin résultant de la transgression du Nouakchottien. Ils sont composés, selon FAUCK (1972), presque exclusivement de quartz, de sesquioxides de fer et/ou d'aluminium, et enfin de kaolinites.

C'est seulement dans les zones à proximité de la côte atlantique actuelle, ou encore dans celles où la sédimentation en cours ou très récente est davantage marine que fluviale, que dominent les argiles du type smectite. Ces smectites peuvent être localement majoritaires par rapport aux kaolinites (MARIUS, 1985). Les sols les plus argileux sont les plus fréquents et se situent presque systématiquement sur la rive nord du fleuve Casamance et en aval de Ziguinchor. Les pourcentages d'argile peuvent être supérieurs à 60 %. La fraction argileuse est constituée de mélanges de kaolinites et de smectites, en proportions variables selon que la sédimentation est d'origine marine ou continentale. Ces sols très lourds sont très asphyxiants et sensibles aux tassements, et, de ce fait, *a priori* les plus favorables aux microflore réductrices, toutes anaérobies strictes ou facultatives.

Il faut cependant signaler que la toxicité ferreuse sous la forme de l'attaque "primaire" (du repiquage au tallage), peut également (et surtout !) se manifester dans les sols plus sableux de certaines vallées latérales (PRADE, 1987) et que la toxicité aluminique peut se superposer à la toxicité ferreuse dans tous les sols dont le pH initial est voisin de 4 unités.

Les caractéristiques de ces sols, en fonction de leur localisation géographique et de leur situation par



**SITUATION TOPOGRAPHIQUE**

**A et B :** en terrasses hautes  
sols profonds, d'origine colluviale (A) ou alluviale (B)  
sels et sulfates en profondeur seulement (mangroves fossiles)  
eaux douces, s'écoulant des plateaux

**C et D :** en terrasses basses  
sols sulfatés acides ou parasulfatés acides  
salinités variables (sols et eaux), souvent excessives

Mangroves fossiles en profondeur

**E :** vasières ou tannes et mangroves sur la rive des marigots  
(rizières traditionnelles, en billons, ou plus récentes, en casiers)

**PARCELLES ETUDIÉES**

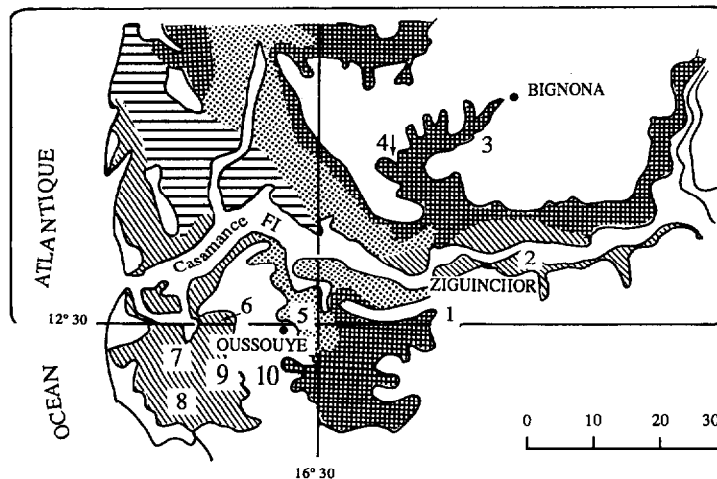
**A :** Djibélor (E 6 à 8),  
Mahamouda et Affiniam

**B :** Fanghott, Tendimane  
et Karouate (6 à 8)

**C :** Djibélor (P 4 et P 25)  
Loudia-Ouoloff (12 à 18)  
Mampalago, Karouate (6 à 8)

**D :** Loudia-Ouoloff (7 à 11)  
Niambalang

**E :** Loudia-Ouoloff (1 à 6)  
et Diakène-Diola (1 à 4)



**SITUATION GEOGRAPHIQUE**

- 1 = Djibélor
  - 2 = Fanghott
  - 3 = Tendimane
  - 4 = Affiniam
  - 5 = Mampalongo
  - 6 = Loudia-Ouoloff
  - 7 = Diakène-Diola
  - 8 = Karouate
  - 9 = Niambalang
  - 10 = Mahamouda
- d'après C.MARIUS, 1985



FIG. 1. – Situation des principales rizières de basse Casamance.  
*Localization of rice fields in Lower Casamance.*

rapport aux niveaux maximaux des marées, aux niveaux moyens des cours d'eaux et aux différentes nappes, plus ou moins salées, ont été répertoriées dans les travaux de VIEILLEFON (1977), puis de MARIUS (1985), relatifs aux sols de mangroves avant les modifications climatiques actuelles, et dans les travaux plus récents de BOIVIN (1984), VIEILLEFON et PEREIRA BARETTO (1986), BOIVIN & LOYER (1988), MOUGENOT (1988) et MONTOROI *et al.*, (1989), qui en ont suivi l'évolution en conditions de sécheresse croissante, et lors d'essais de poldérisation ou dans les vallées coupées du fleuve par divers barrages. Ces auteurs et l'article de synthèse de VAN DER KLEI (1988) donnent également des informations pratiques sur l'aménagement des sols de mangroves et sur les amendements préconisés par les critères pédologiques, agronomiques et socio-économiques.

Les principaux sites de prélèvements ont été situés de façon simplifiée sur la carte de la figure 1. Les parcelles étudiées ont été classées, suivant leur mode d'exploitation, en *casiers paysans* : Affiniam (a et b), Mampalogo, Fanghott, Niambalang, Loudia-Ouoloff (LO 1 à LO 18), Karounate (1 à 8), Mahamouda, Tendimane et Diakène-Diola (Diakène-Di. 1 à 4), et en *casiers expérimentaux* (station ISRA de Djibélor : parcelles P4, E6 à E8).

La nature des sols d'origine (avant mise en culture) ainsi que leur situation par rapport aux cours d'eau et aux plateaux peuvent être précisées sur les cartes établies par VIEILLEFON et PEREIRA BARETTO (1986).

### 2.3. Situation des sols sensibles à la toxicité ferreuse

La toxicité ferreuse apparaît très fréquemment en basse Casamance, mais elle n'a pu être mise en évidence dans les rizières des vallées et deltas ou estuaires des fleuves Sénégal et Gambie lors de prospections similaires en 1982, qui confirmaient, par contre, l'existence de toxicités dues aux sulfures. En Casamance, ces sols, bien que tous issus d'anciennes mangroves, ont eu en fait une évolution pédologique différente, qui rend certains d'entre eux très sensibles à la fois aux toxicités ferreuses et sulfureuses tandis que d'autres, pourtant géographiquement voisins et pédologiquement similaires (en première estimation) restent totalement indemnes de la première forme de toxicité (JACQ, 1989). Dans ces zones de sols de rizières sensibles aux ions ferreux, cette toxicité ferreuse, en tant que processus unique ou majoritaire, apparaît sur les parcelles situées dans deux situations topographiques différentes (fig. 1) :

1) *sur les terrasses situées à un niveau élevé, en bordure des formations du continental terminal*, (situations A et B). Ils ne sont salés et riches en

sulfates que dans leurs horizons les plus profonds, et sont formés de sols complexes, où l'horizon de surface, d'origine alluviale et/ou colluviale plus récente, recouvre un sol de mangrove fossile. Les eaux d'écoulements et celles des nappes superficielles en provenance du plateau continental sont douces et permettent la pratique de la riziculture ;

2) *sur les terrasses les plus basses, situées en bordure de marigot*, (situations C à E). Un dessalement intense du sol est nécessaire, avant tout repiquage, en mai-juin (début de la saison des pluies) et, dans ce cas, à la fois sur les vases potentiellement acides et sur les sols sulfatés acides. Les nappes des bas-fonds ont une salinité plus variable suivant la saison et en fonction de la pluviosité. En années "normales", les précipitations de l'hivernage s'avèraient généralement suffisantes, en intensité et en durée, pour permettre le dessalement, en surface du moins, et assurer une riziculture inondée. Depuis plusieurs années, ce n'était plus le cas, à tel point que les écoulements d'eau douce dans le fleuve Casamance et ses affluents avaient eux-mêmes cessé.

### 2.4. Profils types de sols sensibles

Des exemples précis de sols casamançais très sensibles à la toxicité ferreuse (à laquelle peut se superposer une toxicité aluminique) peuvent être donnés par l'étude comparée de trois profils types, représentatifs d'une séquence de rizières sensibles à cette première toxicité (fig. 2 à 4) :

– *le premier sol* (fig. 2 : parcelle LO 1 des rizières de Loudia-Ouoloff), sulfaté acide, jeune (peu évolué), encore sous l'influence des marées salées, est situé sur les vases d'une mangrove défrichée il y a environ 20 ans ;

– *le deuxième* (fig. 3 : parcelle E6 de la station de Djibélor) est bien représentatif des rizières situées à un niveau plus élevé, nettement plus éloignées du marigot. Dans ce sol, l'horizon sulfaté acide et sableux est recouvert par une couche relativement épaisse (50 à 60 cm) de matériaux alluviaux fins, plus récents, moins acides et moins salés ;

– *le troisième* (fig. 4 : parcelle P4 de cette même station de Djibélor), situé à la rupture de pente en bordure du plateau, n'apparaît pas, à première vue, comme un sol sulfaté acide vrai, car il ne présente plus que quelques rares traces visibles de la mangrove d'origine. Mais la présence de jarosite  $-\text{[K Fe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6]-$ , minéral jaune pâle, considéré comme un caractère distinctif fiable des sols sulfatés acides, et son pH, voisin de 4,5 dans les horizons profonds, le rattachent aux sols apparentés, dits parasulfatés acides. Il est fortement remanié et d'origine alluviale et colluviale.

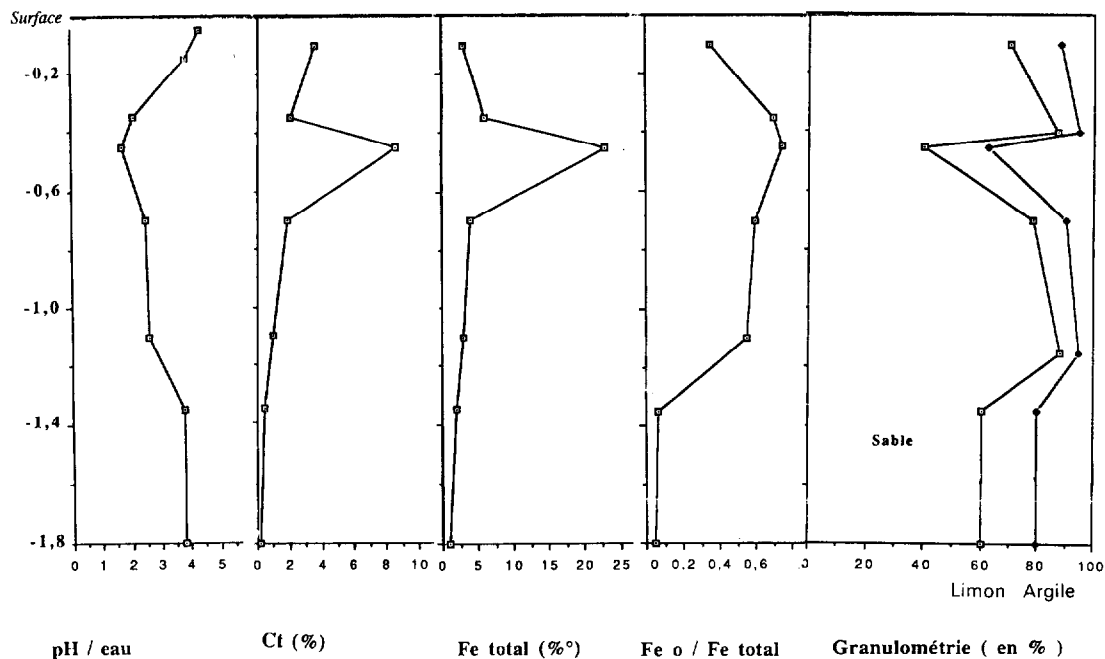


FIG. 2. – Caractéristiques du profil du sol sulfaté acide de Loudia-Ouoloff (parcelle LO1 : 0 à 1,8 m).  
Soil properties (from soil surface to 1.8 meter depth) in Loudia-Ouoloff acid sulphate soil.

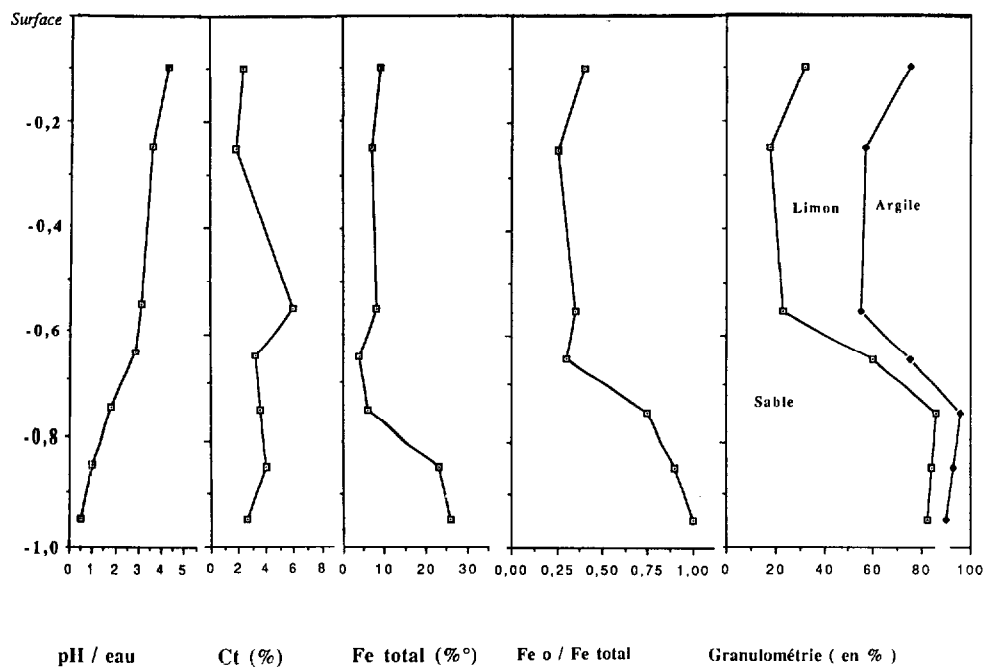


FIG. 3. – Caractéristiques du profil du sol de Djibélor (parcelle E6 : 0 à 1 m).  
Soil properties (from soil surface to 1.0 meter depth) in E6 parcel of Djibélor (ISRA experimental fields).

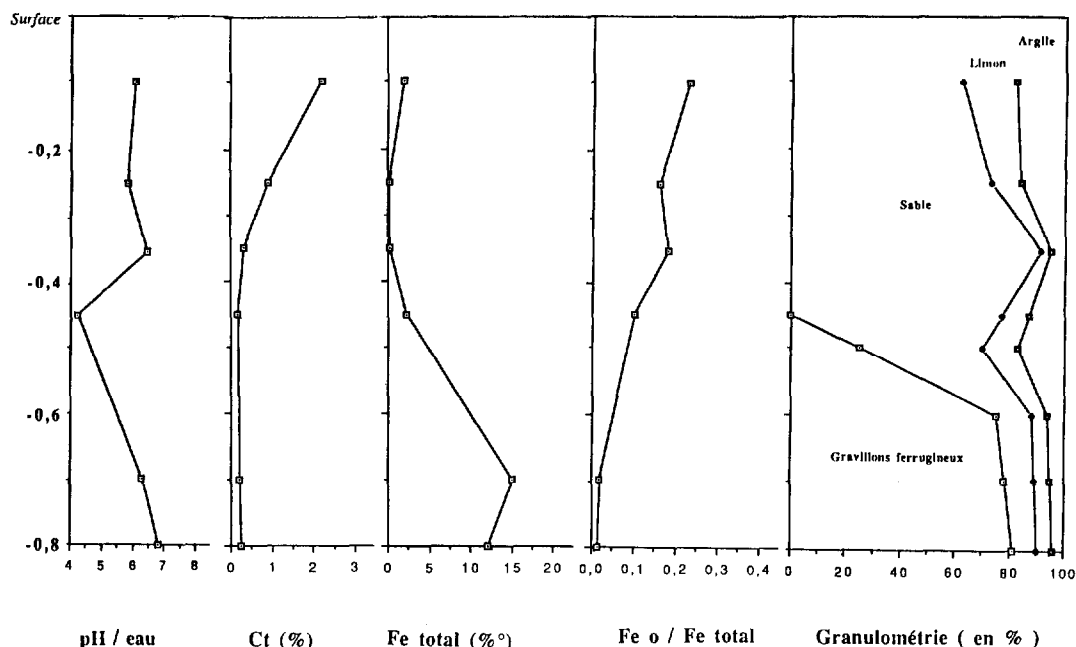


FIG. 4. – Caractéristiques du profil du sol de Djibélor (parcelle P4 : 0,1 à 0,8 m).  
Soil properties (from 0.1 to 0.8 meter depth) in P4 parcel of Djibélor (ISRA experimental fields).

## 2.5. Dégénération actuelle du milieu naturel

Ces dernières années, surtout parce que les conditions climatiques ont changé (le déficit hydrique est chronique depuis 1968, plus marqué à partir de 1974, et ses effets sur la végétation naturelle et les cultures se sont fait durement sentir depuis 1980), les agronomes et les riziculteurs ont constaté l'extension des zones atteintes par divers processus toxiques.

Dans certaines parcelles, les rendements ne couvrent plus les coûts de mise en culture. Il en est également ainsi pour les parcelles exemptes de toxicités d'origine microbienne, mais soumises, de façon plus générale, à la fois à une acidification et surtout à une hypersalinité, résultant toutes deux du déficit hydrique. Il apparaît difficile, pour les sols à rizières "à problème", de faire la distinction entre ceux dans lesquels la limite à la culture du riz est apparue récemment de nature physico-chimique, et ceux très favorables à la microflore responsable de la toxicité ferreuse. Mais l'étude microbiologique, telle qu'elle a été conçue, ne s'appliquait en théorie qu'aux sols dont le pH et la salinité restaient encore compatibles avec la pratique de la riziculture, ce qui était exclu pour certaines rizières casamançaises déjà fortement dégradées dès les années 1983-84.

Il peut apparaître paradoxal que le climat, et la

pluviométrie déficitaire en particulier (ainsi que leur influence sur la salinisation et l'acidification) soient parmi les principaux responsables de l'extension des zones touchées par les processus microbiologiques réducteurs. Mais il a été clairement établi que ces microflores, même les espèces non sporulantes, bien qu'anaérobies et relativement peu halotolérantes et plutôt neutrophiles, s'adaptent déjà bien à ces nouvelles conditions écologiques (PRADE, 1987 ; JACQ, 1989).

## 3. MÉTHODES D'ÉTUDE

### 3.1. Études microbiologiques et physico-chimiques des sols

#### 3.1.1. SUIVI DES PARCELLES, PRÉLÈVEMENTS ET MESURES *IN SITU*

L'étude des toxicités ferreuses en la basse Casamance a été faite essentiellement par des microbiologistes du sol, parallèlement à celle de la toxicité des ions sulfures, pendant les saisons des pluies 1983 et 1984. Elle est antérieure aux analyses pédologiques réalisées dans le cadre d'un contrat CEE-ORSTOM-ISRA, et destinées à suivre la mise en valeur des mangroves, ou à celles préconisant les mesures adaptées à l'évolution des sols de certaines vallées après la

création de barrages "anti-sels".

Des prélèvements de sols et de feuilles ont été effectués dans toutes les rizières dans lesquelles avaient été signalés des symptômes proches de ceux du "bronzing" (le jaunissement, le brunissement et le dessèchement progressif des feuilles et en particulier des plus âgées). Les sols, par fractions de 10 à 30 g, sont prélevés au minimum deux fois : à sec, en début de cycle, et sous eau, au(x) stade(s) de toxicité apparente. Les échantillons de feuilles, de 5 à 20 g, poids humide, ne sont prélevés que lorsque les symptômes sont apparents.

Dans les sols engorgés, ont été réalisées, aux mêmes stades, des mesures *in situ* du pH et du potentiel redox (Eh) suivant les techniques de GRONDIN (1982) et/ou celles de LOYER *et al.* (1982), permettant de ne pas oxyder l'échantillon pendant son traitement. Ces prélèvements ont permis également des mesures instantanées des concentrations en fer ferreux dans les solutions du sol, suivant la technique décrite par PRADE (1987) et exposée en 3-1-4. Les parcelles de l'ISRA à Djibélor et les casiers paysans de Loudia-Ouoloff ont été suivis pendant toute une saison rizicole.

### 3.1.2. NUMÉRATIONS DE POPULATIONS BACTÉRIENNES RÉDUCTRICES

Des *numérations simultanées* de bactéries réductrices de fer ferrique et de bactéries sulfato-réductrices ont été faites, sur les mêmes échantillons de sol rhizosphérique et de rhizoplan à des intervalles réguliers de 3 semaines sur les rizières suivies pendant tout le cycle végétatif à différents stades, du repiquage à la récolte, ou au moment des prélèvements précités sur les autres parcelles. Les échantillons de rhizosphère, prélevés dans des carottages, sont constitués par les 2 mm de sol entourant les racines et dilués à 1/40 par une solution stérile de  $MgCl_2$  à 0,1 % ; la microflore adhérente au rhizoplan en est détachée par lavage des racines extraites du sol par 100 ml de la même solution.

Il était indispensable de déterminer le niveau des populations bactériennes en activité dans la rhizosphère du riz au moment des observations de toxicité ou dans les jours précédents pour permettre d'affirmer leur participation à la mise en solution d'ions ferreux (réducteurs de fer ferrique) ou à leur piégeage sous forme de FeS (sulfato-réducteurs) suivant les mécanismes exposés dans JACQ *et al.*, (1990). Le suivi des populations sulfato-réductrices permet, en le comparant à celui des réducteurs de fer, d'exclure, dans les sols cités, toute intoxication par les sulfures, simultanée ou superposée à celle due au fer ferreux, plus

fréquente en moyenne et haute Casamance (JACQ, 1989).

La population bactérienne réductrice de fer (essentiellement des espèces de 4 genres : *Bacillus*, *Clostridium*, *Pseudomonas* et *Enterobacterium*) ne constitue pas toute la microflore réductrice de fer, dont l'inventaire a été récemment fait par GHIORSE (1988), mais en représente la fraction la plus active en rizières inondées (PRADE, 1987).

Les dénombrements ont été faits sur des dilutions maintenues en anaérobiose et immédiatement passées sur filtres Millipore 0,45  $\mu m$  suivant la technique de MOURARET et BALDENSPERGER (1979), adaptée aux études de terrain. Pour les bactéries réductrices de fer ferrique, les milieux de numérations ont été adaptés de ceux de OTTOW et GLATHE (1971) ou encore de ceux de HAMMANN et OTTOW (1974) pour les espèces réductrices de fer et fixatrices d'azote atmosphérique. Les techniques de comptage des bactéries sulfato-réductrices, sur trois milieux (au lactate, à l'acétate et au palmitate), adaptés de celui de MOURARET (1972) ont été présentées dans JACQ (1989).

Les niveaux de populations bactériennes réductrices de fer ferrique sont plus élevées dans les sols sensibles. Mais c'est surtout le fait que les maxima ( $10^8$  à  $10^9$  cellules par g de sol rhizosphérique ou, sur le rhizoplan, par g de racines) coïncident avec les stades végétatifs pendant lesquels l'intoxication est la plus spectaculaire (PRADE, 1987), qui permet d'affirmer que la toxicité constatée est bien d'origine bactérienne pour tous les sols cités dans ce travail. Au contraire, les numérations de bactéries sulfato-réductrices ont montré que dans l'ensemble des rizières citées, ces bactéries ne se multiplient de façon significative qu'après l'intoxication par le fer ferreux, constituant ce que nous avons décrit sous le vocable de sulfato-réduction *post mortem* (JACQ, 1989 ; JACQ *et al.*, 1990).

### 3.1.3. ANALYSES DE SOLS

Afin de caractériser pédologiquement tous les sols testés, on a prélevé des carottes de 50 cm de long au minimum (horizons profonds), et un nombre plus important d'échantillons de surface (horizon 0-20 cm), horizon Ap où s'implante le premier enracinement du riz.

Les échantillons de sol ont été analysés, en RFA, suivant les techniques de SCHLICHTING & BLUME (1966), à l'exception de deux dosages, réalisés par l'ORSTOM :

- le fer total a été dosé suivant la technique de PAYCHENG (1980) ;

- le phosphore assimilable (exprimé en ppm) a été dosé suivant la technique de OLSEN *et al.* (1954). Pour cette mesure, les valeurs du tableau I ont été compa-



rées au seuil minimal pour le riz : 10 ppm de P assimilable, défini par l'IRRI (1969) ;

Les autres valeurs citées aux tableaux I à III et aux figures 2 à 4 ont été obtenues comme suit :

– le pH et la conductivité électrique (C.E., en  $\text{mS.cm}^{-1}$ ) ont été déterminés sur des extraits au 1/2,5 ;

– la capacité d'échange des cations (C.E.C.) est donnée en  $\text{meq}/100 \text{ g}$ , à pH 8,1 ;

– le carbone total ( $C_t$  %) est exprimé en pourcentages ;

– le fer ferrique ( $\text{Fe[III]}$ ), ainsi que l'aluminium aluminique ( $\text{Al[III]}$ ), tous deux sous forme soluble, sont exprimés en pour mille. Le  $\text{Fe}_o$  est le fer sous forme d'oxyhydroxydes. Le rapport  $\text{Fe}_o/\text{Fe}_t$  est le rapport : Fer (oxyhydroxydes)/Fer total. Le fer ferreux ( $\text{Fe[II]}$ ) du tableau II est donné en ppm. La toxicité aluminique du riz peut apparaître pour les valeurs supérieures à 1 ppm en  $\text{Al(III)}$  soluble/100 g de solution de sol (IRRI, 1969) ;

– le potassium ( $\text{K}^+$ , dont les valeurs ont été comparées au seuil minimal de 0,2  $\text{meq}/100 \text{ g}$  défini par l'IRRI en 1969), le sodium ( $\text{Na}^+$ ), le calcium ( $\text{Ca}^{++}$ ) et le magnésium ( $\text{Mg}^{++}$ , seuil identique à celui du potassium à 0,2  $\text{meq}/100 \text{ g}$  : IRRI 1969), sont exprimés sous forme soluble.

### 3.1.4. DOSAGE *IN SITU* DU FER FERREUX EN SOLUTION

La multiplicité des techniques analytiques utilisées pour tenter de définir la concentration "dangereuse" ou "létale" en fer ferreux dans la solution de sol et leur emploi dans des conditions variées, à des stades végétatifs différents, et sur des cultivars à sensibilité relativement mal connue, permet difficilement de comparer des résultats d'origine diverse.

Il est donc utile de rappeler que cette concentration est le résultat de l'intervention simultanée de plusieurs données (VIZIER, 1987 et 1988), celles qui régissent la réduction du fer (dont les processus microbiens étudiés) et celles qui en commandent la solubilité dans la solution du sol :

1) la réduction du fer se fait avec intervention des micro-organismes. Elle dépend, à la fois, de la *saturation* du sol (et de la durée et de la continuité de l'engorgement, ce qui a aussi été établi par PRADE, 1987, dans les sols de Casamance), de la *température*, de la *nature* de la matière organique, et de sa teneur, et de la faible *crystallinité* des minéraux contenant du fer ferrique (PONNAMPERUMA, 1972 et 1977 ; VAN BREEMEN et MOORMANN, 1978). La réduction du fer ferreux est aussi facilitée, dans certains sols de Casamance, par le pH relativement acide : dans les milieux acides, cette activité réductrice ne nécessite pas un potentiel d'oxydo-réduction très bas (OTTOW ; FABIG, 1985 ; JACQ *et al.*, 1987 ; PRADE, 1987) ;

2) la solubilité est fonction des *composés ferreux* formés, qui sont liés à la nature des constituants du sol, et à la présence, ou le manque, d'anions organiques complexes, et des multiples *interactions* que l'on peut constater à l'interface sol-solution du sol, essentiellement des mécanismes d'adsorption et de désorption : VIZIER (1987) ;

3) la disponibilité en fer ferreux est sous la dépendance des *propriétés hydrodynamiques* du sol. Elle sera différente suivant que cette eau évoluera en "circuit fermé", c'est-à-dire dans un périmètre confiné, ou en "circuit ouvert" sur les formations de sols et le réseau hydrologique environnants : VIZIER (1988).

Pour prélever la solution de sol *in situ*, on enfonce dans le sol un tube de plastique transparent ( $\varnothing$  intérieur 1 cm ;  $\varnothing$  de l'embouchure 2 à 5 mm suivant la consistance du sol ; longueur 50 cm), jusqu'à une profondeur de 15 cm minimum. L'eau interstitielle est ensuite aspirée par une pompe à main (Soil Moisture Pump n° 2005 G-1) sans contact avec l'air. Cet échantillon composite (un mélange hétérogène d'eau et de matières en suspension) est *immédiatement filtré, au champ, et en anaérobie* (sous azote), sur filtres "S et S", n° 311609 ; le filtrat est récupéré dans un flacon de 10 ml contenant déjà 5 ml d'une solution chlorurée d'orthophénantroline (et concentrée de 0,1 à 1,5 % suivant la teneur en fer estimée) et 2 ml d'un tampon de citrate de sodium à 0,5 M et à pH 3,3. La coloration apparaît tout de suite et elle est mesurée plus tard en laboratoire, au spectrophotomètre à 508 nm. Elle est due à la formation instantanée d'un complexe stable ( $[\text{orthophénantroline}]_3\text{Fe}^{++}$ ). Cette technique est dérivée de celle de SANDELL (1959).

Le prélèvement au champ, par aspiration à l'aide d'une pompe manuelle, n'est guère facile dans le cas, très fréquent, d'horizons de surface très argileux et à structure trop cohérente avant le premier labour. Le risque d'oxyder une part du fer ferreux, avant son piégage, augmente avec la durée de l'aspiration. De ce fait, le nombre d'échantillons est à augmenter pour ce type de prélèvements, afin d'obtenir une information fiable concernant le premier pic de libération de fer ferreux, lorsque celui-ci suit de peu la première mise en eau (toxicité primaire).

### 3.2. Analyses foliaires

Sur les plants de taille suffisante, ont été prélevés, au même endroit, des échantillons de feuilles, de 5 à 10 g en poids frais. Ont été choisies systématiquement les deuxième et troisième feuilles (en comptant à partir du sommet du plant), si elles étaient encore vivantes, c'est-à-dire au minimum à moitié vertes. Pour un riz en maturation, la feuille la plus jeune (première

TABLEAU I  
Propriétés des sols de basse Casamance sensibles à la toxicité ferreuse (Horizon 0-20 cm)  
*Properties of some Lower Casamance rice soils susceptible to iron toxicity*

Parcelles	pH	C.E. (H <sub>2</sub> O/KCl)	C <sub>t</sub> mS/cm	P (1) %	Fe <sub>t</sub> %	Fe <sub>o</sub> %	C.E.C. (2)	K <sup>+</sup> (3)	Na <sup>+</sup> (3)	Ca <sup>++</sup> (3)	Mg <sup>++</sup> (3)	Fe(III) Al (4) >	
												meq/100g à pH 8,1	
Affiniam(a)	4,2/4,0	0,41	1,48	4,3	4,94	4,31	7,1	0,04	0,20	0,50	0,30	n.d.	n.d.
Affiniam(b)	4,1/3,1	0,23	0,97	8,6	2,50	1,32	5,9	0,02	0,38	0,38	0,10	n.d.	n.d.
Mampalago	4,1/3,7	0,74	3,70	8,0	17,89	10,93	19,2	0,16	0,94	1,63	0,83	n.d.	n.d.
Fanghott	5,2/4,1	0,16	10,10	14,7	8,85	4,00	30,6	0,07	0,09	3,50	0,48	0,62	1,81
Niambalang	5,6/5,1	4,50	1,83	n.d.	29,25	4,17	12,5	0,56	n.d.	2,74	6,48	0,03	ild
Djibclor P4	6,0/5,5	0,08	2,04	1,4	21,37	4,26	12,4	0,22	0,65	4,54	2,14	0,31	0,63
Djibclor E6	4,2/3,7	0,07	2,58	9,2	8,05	2,96	11,5	0,05	0,11	2,35	0,19	0,93	0,73
Djibclor E7	4,9/4,7	0,31	2,10	7,4	7,03	3,13	12,7	0,04	0,50	4,88	0,33	0,74	0,70
Djibclor E8	4,3/4,0	0,33	1,34	9,0	4,87	3,06	7,4	0,03	0,39	2,88	0,33	0,39	0,51
Loudia-O.1 *	3,4/3,3	1,90	2,31	83,5	2,53	1,50	8,1	0,03	0,08	0,35	0,13	0,71	0,60
Loudia-O.3	3,4/3,3	0,74	1,91	52,0	5,70	3,25	7,4	0,03	0,40	0,31	0,25	0,92	1,14
Loudia-O.4	3,7/3,6	0,50	2,79	6,1	3,53	1,01	10,1	0,01	0,05	0,20	0,30	0,51	2,25
Loudia-O.5	4,4/3,8	0,55	2,12	3,5	3,88	1,78	9,1	0,05	0,40	1,20	0,21	1,20	0,71
Loudia-O.6 *	3,2/3,2	3,60	2,35	ild	4,70	2,21	10,0	0,03	0,44	0,27	0,17	1,39	1,07
Loudia-O.7 *	4,1/3,8	1,90	5,29	1,5	5,79	3,05	19,0	0,16	1,57	2,52	2,27	1,75	1,09
Loudia-O.8 *	4,5/4,2	0,85	2,95	0,5	4,88	2,65	12,2	0,17	0,51	3,22	0,47	1,31	0,85
Loudia-O.9	5,0/4,9	0,77	6,60	ild	6,03	2,12	28,0	0,06	0,41	16,25	2,33	1,54	0,51
Loudia-O.10	3,8/3,6	0,37	2,81	5,0	3,11	1,21	10,6	0,03	0,05	0,71	0,09	0,81	1,22
Loudia-O.11	5,1/4,2	0,06	2,69	1,8	3,25	1,13	11,4	0,02	0,12	1,82	0,16	1,15	1,55
Loudia-O.12	4,4/4,0	0,18	2,35	0,9	2,58	0,79	8,5	0,04	0,05	0,50	0,27	0,79	1,30
Loudia-O.13	4,2/4,1	0,23	3,37	3,8	3,04	1,15	13,4	0,03	0,09	0,89	0,15	1,57	2,85
Loudia-O.14	3,6/3,5	0,45	3,00	7,1	3,03	1,15	11,3	0,02	0,06	0,53	0,12	1,06	2,16
Loudia-O.15	3,7/3,6	0,55	2,79	2,2	3,08	1,27	9,1	0,03	0,19	0,69	0,30	1,12	1,37
Loudia-O.17 *	4,4/3,9	0,85	0,94	8,0	12,61	2,97	6,7	0,08	1,73	0,59	0,72	0,48	0,09
Loudia-O.18 *	4,7/4,4	2,95	0,54	14,0	1,54	0,56	1,2	0,03	0,08	0,52	0,29	0,30	0,04
Karouate1 *	4,6/4,4	3,30	1,58	0,6	7,96	1,41	8,9	0,11	0,91	0,90	1,27	0,51	0,40
Karouate2	3,7/3,6	0,63	2,02	ild	8,43	1,71	9,2	0,03	0,27	0,41	0,20	0,39	1,85
Karouate3	4,2/3,8	0,25	2,30	ild	7,93	3,26	9,0	0,02	0,13	0,89	0,23	0,67	1,04
Karouate4 *	5,2/5,0	5,60	1,12	0,2	3,14	0,62	5,5	0,24	1,29	0,95	1,71	0,46	ild
Karouate5 *	4,4/3,9	1,65	1,31	2,1	14,40	2,71	11,2	0,39	0,76	1,23	0,90	0,25	ild
Karouate6	3,8/3,8	0,55	1,45	ild	4,60	2,51	5,8	0,02	0,10	0,28	0,20	0,60	0,95
Karouate 7	3,5/3,4	0,90	1,94	ild	14,66	4,27	10,8	0,03	0,16	0,56	0,42	0,30	1,71
Karouate 8	3,4/3,4	1,55	1,43	ild	8,65	4,06	5,6	0,02	0,31	0,27	0,33	0,59	1,17
Mahamouda	4,4/4,3	0,12	1,39	ild	15,35	2,35	7,0	0,03	0,02	0,39	ild	0,24	0,83
Tendimane	3,5/3,3	0,53	1,43	ild	28,90	1,59	13,9	0,03	0,05	0,39	0,23	0,26	2,33
Diakène-Di. 1	3,4/3,3	0,47	1,37	ild	8,68	3,28	5,8	0,04	0,10	0,71	0,23	0,72	0,83
Diakène-Di. 2	3,4/3,4	1,10	3,12	ild	10,12	5,11	10,6	n.d.	0,02	0,13	0,06	0,44	2,05
Diakène-Di. 3	3,4/3,4	0,90	2,25	6,5	8,20	4,67	9,7	0,03	0,08	0,83	0,18	1,23	1,67
Diakène-Di. 4	3,4/3,5	0,66	2,38	ild	6,02	3,56	7,9	n.d.	0,46	0,67	0,08	1,34	2,28

\* Echantillon prélevé en fin de saison sèche ; n.d. : non déterminé ;  
(1) Valeurs soulignées : < 10 ppm (seuil IRRI, 1969) ; ild : inférieur à la limite de détection ;  
(2) En gras : valeurs de C.E.C. < 12 meq/100g ;  
(3) et (4) Valeurs soulignées : < 0,2 meq/100g (seuil IRRI, 1969) ;  
(5) En gras : valeurs > 1 meq/100g d'Al(III) soluble (toxicité possible) ; ild : non détectable.

feuille à partir du sommet) était incluse à l'échantillon. Cette façon de procéder est différente de celle le plus souvent utilisée, car elle n'incorpore pas les feuilles les plus anciennes, qui sont pourtant celles qui présentent les premiers symptômes et qui accumulent le plus de fer (TANAKA *et al.*, 1966 ; VAN DER VORM & VAN DIEST, 1979). Le fait de ne prélever que les jeunes feuilles permet cependant de mieux savoir ce qui s'est passé juste avant le prélèvement (ce qui est aussi le but des numérations effectuées au même moment) : ces feuilles en formation ont obligatoirement accumulé le fer réduit pendant les quelques jours précédents, sous l'effet de la microflore dénombrée en parallèle. Elles ont été traitées et analysées selon les techniques décrites par FASSBENDER et AHRENS (1977).

Aux tableaux II et III, l'intensité des symptômes de "bronzing" a été appréciée comme suit : + : 25 % des feuilles présentant des symptômes ; ++ : 50 % ; +++ : 75 % ; ++++ : 100 %. La notation est la même pour les croix entre parenthèses, mais ne concerne que les feuilles plus âgées, non prélevées, car desséchées. La mortalité est exprimée en pourcentages de plants morts depuis peu au moment de l'observation et de l'échantillonnage ; les chiffres entre parenthèses ne concernent que les plantes manifestement mortes bien avant les observations. Les données ont été comparées aux seuils considérés habituellement comme indicateurs de toxicité (de Fe, Al et Na) ou de carence (en P, K, Mg et Zn) selon les valeurs définies respectivement par TANAKA & YOSHIDA (1970) ou par JONES *et al.*,

(1982), et qui sont les suivantes : - *toxicités* : Fe > 300 ppm ; Al > 300 ppm ; Na > 1 500 ppm ; - *carences* : P < 0,1 ou 0,2 % (chiffres variables suivant le stade végétatif) ; K < 1 à 2 % (suivant stade) ; Mg < 0,1 % ; Zn < 10-20 ppm (suivant stade).

Pour les parcelles d’Affiniam, Mahamouda et Tendimane, une précision sur l’état des plantes est apportée : a = plantes de taille normale, mais atteintes ; b = plantes inférieures à la taille habituelle car atteintes ; c = plantes exemptes de “bronzing”.

#### 4. RÉSULTATS

Les analyses effectuées sur les horizons de surface (0-20 cm) des sols labourés montrent que les sols des rizières sensibles à la toxicité ferreuse présentent, sur l’ensemble de la basse Casamance, une variabilité relativement grande de propriétés physico-chimiques (tabl. I). Deux caractéristiques importantes sont cependant systématiques : *un pH très bas* en début de phase de submersion, voisin de 3 ou 3,5 unités, et *une très faible disponibilité en P et K*.

##### 4.1. Acidification

Les causes principales de l’acidification, qui a encore évolué depuis nos propres mesures, sont expliquées partiellement dans l’inventaire de LE BRUSQ *et al.* (1987). Ces auteurs, (*qui ont aussi noté la très faible disponibilité en P et K de ces sols*), mettent en cause une oxydation bactérienne des sulfures, accentuée par la sécheresse et une production importante de sulfates, avec, dans les cas extrêmes, une attaque acide des réseaux cristallins et une précipitation de sulfates d’aluminium et de fer, qui, localement, peuvent faire chuter ces valeurs de pH au voisinage de 1,5. Cette acidification fait intervenir, pendant l’aménagement initial des parcelles, les bactéries du genre thiobacilles (*T. thiooxidans* et *T. ferroxidans*) actives en aérobiose et à des pH de l’ordre de 2,5 à 4, comme l’a montré BALDENSPERGER (1969 et 1973). Elles oxydent le FeS ou les polysulfures accumulés, pendant les phases d’engorgement précédentes, sous l’action des bactéries sulfato-réductrices (JACQ, 1989), dont une souche supporte l’acidité et des teneurs en NaCl de 25 à 30 grammes par litre. C’est de l’un de ces sols qu’a été isolé (JACQ, 1989) ce *Desulfovibrio* encore actif aux pH acides (de la neutralité à 4,4) et relativement halotolérant : il est le premier de ceux extraits de sols de rizières, qui possède cette double particularité d’adaptation, et il est retrouvé dans toute la Casamance.

La nouvelle pédogenèse acidifiante semblait, jusqu’à l’hivernage 1988, s’accélérer dans les périmètres en cours d’aménagement et de dessalement (LOYER *et*

*al.*, 1988). Une telle chute du pH (sensible surtout en début de cycle végétatif) et, encore plus, quand elle est simultanée à une forte progression de la salinité (également plus sévèrement ressentie par les jeunes plants stressés mécaniquement à la transplantation), exclut totalement tout repiquage du riz, car elle crée, de ce fait, des conditions immédiatement favorables à la toxicité ferreuse primaire (PRADE, 1987). En outre, une acidification trop forte peut favoriser la toxicité aluminique : elle augmente les teneurs en aluminium soluble et échangeable.

Mais la remontée systématique du pH des sols de rizières modérément acides, survenant dès la mise en eau, est bien connue, et a déjà été signalée dans les sols alluviaux sénégalais par GARCIA *et al.* (1974), LOYER *et al.* (1982 et 1988) ou encore PRADE (1987). La valeur relative de cette remontée de pH sous eau (de l’ordre de 1,5 à 2 unités, en 3 à 4 semaines, pour la majorité des sols testés) est due en partie seulement aux processus microbiens réducteurs. L’activité sulfato-réductrice y contribue pour 0,4 à 0,6 unité (JACQ, 1989). Elle est bien difficile à pronostiquer pour un sol donné, ce qui a pour conséquence que la seule mesure du pH *sur sol séché* n’apparaît plus que d’une faible utilité pour expliquer la sensibilité particulière du riz à la toxicité ferreuse dans les sols définis par ce critère comme “très acides”.

*A contrario*, l’acidification peut à nouveau se manifester lors de chaque phase de dessèchement (au cours du cycle cultural, mais surtout pendant les 7 à 8 mois entre deux cycles) sous l’effet, cette fois encore, de l’activité sulfo-oxydante des thiobacilles (FRENEY *et al.*, 1982). De même, sous culture, dans une solution du sol à pH proche de la neutralité (et surtout dans la rhizosphère), une certaine acidification peut apparaître pendant des phases d’anaérobiose modérée, par l’action de *Thiobacillus denitrificans*, anaérobie facultatif et relativement neutrophile (BALDENSPERGER et GARCIA, 1975) quand les populations de cette bactérie sont supérieures en nombre à celles des sulfato-réducteurs asporulés (JACQ, 1989).

Dans les conditions très particulières des sols sulfatés très acides de Casamance, les essais qui ont suivi les nôtres (LE BRUSQ, 1986) ont montré qu’il coexiste plusieurs formes d’acidité liées à la présence dans la solution du sol, non seulement des ions H<sup>+</sup>, Fe<sup>+++</sup> et Fe<sup>++</sup>, mais aussi des ions Al<sup>+++</sup>, ce que nous avons déjà supposé (PRADE *et al.*, 1988), comme cela se passe dans les podzols et les sols bruns sous forêt des zones tempérées. Il faut aussi ajouter que la forme d’acidité liée au cycle du fer s’exprime d’autant plus que le pH tend vers les valeurs les plus basses, celles qui constituent, de toute manière, une limite absolue à la survie du riz.

## 4.2. Capacité d'échange et types d'argiles

Les rizières propices à la toxicité ferreuse *sont toutes caractérisées par des sols à faible capacité d'échange* (de l'ordre de 10 à 12 meq/100 g de sol). Celle-ci, rapportée à un taux moyen d'argiles, en surface, de 25 % et corrigée pour une valeur moyenne de 3 à 4 % de matière organique, (cf. tableau I) correspond en effet à une capacité d'échange des argiles inférieure à 10 meq/100 g, c'est-à-dire représentative de minéraux argileux de type kaolinite.

L'importance de la capacité d'échange de cations (C.E.C.) a été mise en évidence par un calcul de régression multiple au cours duquel a été établie, à partir des données analytiques obtenues sur 51 sols, *une relation entre, d'une part, les capacités d'échange, (en meq/100 g), et d'autre part, les teneurs en argiles et en carbone organique (en %)*. On obtient ainsi une corrélation, dont l'équation (1) est significative ( $r^2$ , coefficient de corrélation = 0,95).

$$\text{C.E.C. (meq/100 g)} = 0,12 \text{ Argiles (\%)} + 2,7 \text{ C}_{\text{org}} (\%) + 1,5 \quad (1).$$

Cette formule est à rapprocher de l'équation (2) de MARIUS (1985) appliquée aux sols ferrallitiques de Casamance :

$$\text{C.E.C. (meq/100 g)} = 0,124 \text{ Argiles (\%)} + 2,07 \text{ C}_{\text{org}} (\%) + 22,03 \quad (2).$$

L'équation montrait que la capacité d'échange de la matière organique était plus forte que celles des argiles, mais également que celles-ci, dans ce cas, semblaient aussi se rapporter à des kaolinites. Ce résultat nouveau montre que la fraction "argile" des rizières atteintes présente, sans aucune exception, une trop faible capacité d'échange.

Le seuil critique que permet de calculer cette équation se situe vers 12 meq/100 g : ceci est cohérent avec nos mesures de terrain. Il semble donc que l'une des conditions préalables, et des plus importantes, au déclenchement de la toxicité ferreuse, soit la faible C.E.C., due essentiellement à l'absence ou à la faible teneur en types d'argiles à haute capacité d'échange.

Cette conclusion est en accord avec l'observation que la toxicité ferreuse ne se manifeste jamais dans les rizières établies plus au nord, également sur des sols alluviaux fluvio-marins des fleuves Gambie, Saloum et Sénégal. Sur ces milieux climatiquement plus secs (surtout au nord du Sénégal et à l'intérieur des terres), et pédologiquement moins évolués, la sédimentation a favorisé la prédominance, dans la fraction argileuse, des smectites caractéristiques des apports océaniques (KALCK, 1978). D'autre part, les argiles issues des "plateaux" continentaux plus septentrionaux ne sont pas aussi riches en kaolinites que celles des sols ferrallitiques de Casamance : elles sont plutôt de type illite, comme dans les sols ferrugineux tropicaux et les

sols bruns subarides. En basse Gambie, l'argile dominante dans les alluvions est une smectite (MARIUS, 1985) tout comme dans le Sine-Saloum, où les apports marins sont nettement les plus importants (MARIUS, 1977 ; SADIO, 1989). Les kaolinites sont associées à de fortes proportions d'illites et de smectites dans la basse vallée et le delta du fleuve Sénégal (LOYER, 1989).

Il faut également noter que ces sols diffèrent de ceux de basse Casamance par d'autres caractéristiques essentielles. Les différents matériaux fluvio-marins qui les constituent ne sont cependant pas tous affectés par la même pédogenèse "sulfatée acide", par des teneurs en matière organique équivalentes et, à un degré moindre, par une acidité comparable. Les sols du delta du fleuve apparaissent aussi comme nettement moins acides, chimiquement plus tamponnés, et moins riches en matière organique et en composés soufrés (LOYER, 1989 ; JACQ, 1989). Il semble aussi raisonnable de penser que, pour un sol donné, les teneurs élevées en argiles à faible capacité d'échange et (ou ?) à taux de saturation insuffisant ont pour conséquences un manque de disponibilité du potassium, ce qui rend le riz plus sensible aux ions ferreux.

## 4.3. Carences en potassium, en phosphore et en magnésium

Les trop faibles teneurs en potassium échangeable précitées, même dans le cas des sols d'une certaine salinité générale, laissent supposer l'absence, sur les argiles majoritaires, de sites favorables à une adsorption spécifique de cet élément, qui serait alors, le plus souvent, perdu lors de l'évacuation des eaux pendant les fréquentes vidanges de ces rizières. Dans ces mêmes sols, le phosphore, par contre, peut être, en majeure partie, fixé par des oxyhydroxydes de fer (DENT, 1986 ; PRADE, 1987), ce qui en diminue d'autant la disponibilité. LE BRUSQ *et al.* (1987) ont par ailleurs montré que l'acidification est parfois liée à une forte libération d'aluminium, en soi toxique pour le riz, mais qui peut également avoir pour conséquence une carence en phosphore pour la plante, car il existe dans ce cas une compétition entre l'aluminium et les autres éléments.

Les sols les plus anciens, les plus évolués et parfois situés sur les plus hautes terrasses, sont aussi les plus carencés en magnésium. Certaines valeurs du tableau I le montrent : sols Affiniam b et Mahamouda (en position A sur la figure 1), Loudia-Ouoloff (LO 11 et suivantes, en position C), ou encore Diakène-Diola 2 et 4 (en position E, mais cultivés depuis très longtemps). Il semble, en définitive, que ces teneurs en Mg varient tellement dans l'ensemble des échantillons de sols prélevés en surface, qu'elles ne sont plus d'au-

TABLEAU II

pH, Eh et teneurs en fer ferreux des solutions de sols à toxicité ferreuse de basse Casamance (horizon 0-20 cm) en relation avec l'intensité des symptômes au moment des observations et des prélèvements  
*In situ pH, Eh and Fe(II) contents of soil solution of some rice soils susceptible to iron toxicity (soil surface layer : 0-20 cm) in relation to both damage and iron toxicity symptoms observed during the field survey*

Parcelle	pH (1)	Variation de pH (2)	Eh (3) (en mV)	Fe (II)(4) (en ppm)	Durée de la culture, en semaines (5)	Intensité des symptômes observés (6)	Forme de Toxicité Ferreuse
Mampalago	6,2	+2,1	-23	343	8	+++	Secondaire
Djibélor E7	6,7	+1,9	-81	108	"	++	"
Djibélor E8	6,8	+2,7	+53	355	7	++	"
LO1	4,3	+0,8	+468	1164	Inconnue : culture abandonnée		Primaire
LO2	5,7	+2,0	-31	376	13	++++	Secondaire
LO3	5,3	+1,9	+148	1660	2	++++	Primaire
LO4	4,1	+0,4	+319	885	4	++++	"
LO5	5,9	+2,8	+93	125	2	++	"
LO6	5,4	+2,6	+63	1012	4	+++	"
LO7	5,4	+2,7	-1	136	"	(++)	"
LO8	6,4	+1,8	-30	170	"	(+++)	"
LO9	6,0	+0,9	+105	124	1	++	"
LO10	4,8	+0,8	+44	86	2	+++	"
LO11	4,1	-0,2	+495	n.d. (à sec)	10	(++)	Secondaire
LO12	4,1	0	+169	n.d. (à sec)	9	(++)	Primaire
LO13	4,7	+0,4	+166	73	"	++	Secondaire
LO14	4,6	+0,8	+58	32	"	++ à ++++	"
LO15	4,9	+0,8	-9	57	10	++ à ++++	"
Karouate 1	5,5	+1,0	+60	n.d. (à sec)	Inconnue : culture abandonnée		Primaire
Karouate 2	4,0	0	+122	n.d. (à sec)	11	(+++)	"
Karouate 4	6,6	+1,5	+132	135	Inconnue : culture abandonnée		"
Karouate 5	6,1	+1,9	+50	641	4	+	"

(1) pH / KCl ; moyenne de 6 mesures effectuées au cours des prélèvements ;

(2) moyenne des pH (KCl) mesurés au cours du prélèvement - moyenne des pH (KCl) mesurés au repiquage ;

(3) Eh corrigé ; moyenne de 6 mesures faites *in situ* avant les prélèvements ;

(4) moyenne de 3 mesures faites avant les prélèvements ;

(5) voir le stade végétatif correspondant au Tableau III ;

(6) notations : + : 25% de feuilles à symptômes ; ++ : 50% ; +++ : 75% ; ++++ : 100% ... sur jeunes feuilles ; (croix entre parenthèses) : mêmes notations, sur feuilles âgées.

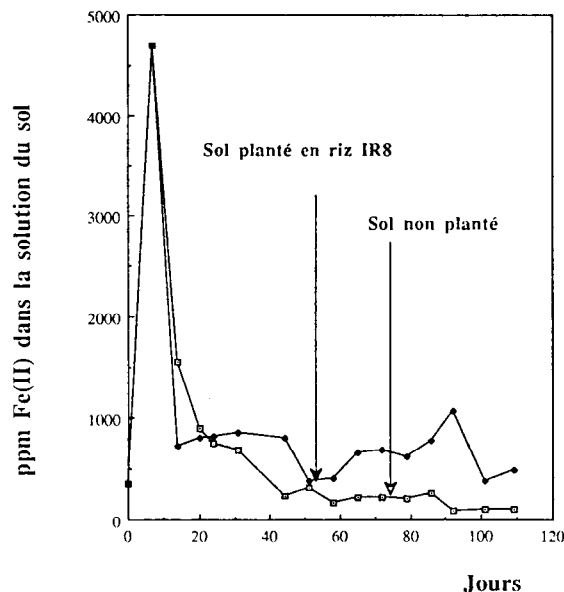


FIG. 5. – Influence de la présence des plants de riz (variété IR8) sur les concentrations en Fe(II) dans les solutions du sol de l'essai de Loudia-Ouoloff (sol sulfaté acide) : moyennes de 10 mesures.

*Influence of cultivation (IR8 cultivar) on Fe(II) levels ; means of 10 soil solution samplings in Loudia-Ouoloff acid sulphate soil.*

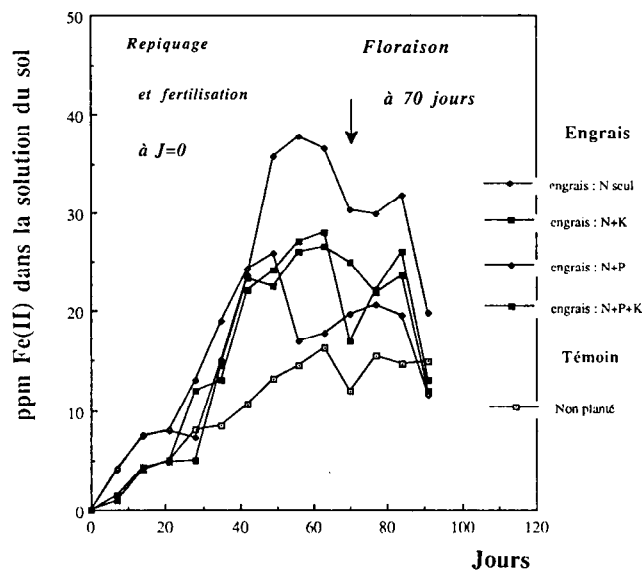


FIG. 6. – Évolutions des concentrations en Fe(II) dans les solutions du sol ; moyennes de 6 mesures déterminées lors d'essais de fertilisation (N ; NK ; NP ; NPK) sur la parcelle P4 de la Station ISRA de Djibélor, plantée en riz IR8, sensible à la toxicité ferreuse.

*Fe(II) levels in soil solutions ; means of 6 samplings during a fertilizer assay (N ; NK ; NP ; NPK) on IR8 cultivar, very sensitive to iron toxicity, in P4 parcel of Djibélor (ISRA, experimental fields).*

cune utilité pratique pour caractériser, à elles seules, la sensibilité de ces sols à la toxicité ferreuse... même si on tient compte du fait, établi par ailleurs (BENCKISER *et al.*, 1984 ; PRADE, 1987) qu'une carence généralisée en magnésium reste l'un des facteurs aggravants de la toxicité ferreuse secondaire.

#### 4.4. Teneurs en fer ferreux

##### 4.4.1. PRÉSENCE DE FER FERREUX DANS LA SOLUTION DE SOL

Les résultats du tableau II montrent qu'il n'existe pas de relation directe entre les teneurs en fer ferreux (Fe(II)), telles qu'elles ont été mesurées dans la solution du sol au moment de la prospection au champ, et l'intensité, appréciée au même moment, de la toxicité ferreuse. Aucune corrélation significative n'a été trouvée. Ceci était prévisible : cette teneur "instantanée" ne peut donner d'indications sur les quantités d'ions ferreux ayant déjà pénétré, pendant les jours et les semaines précédentes, dans le système racinaire (et dont on retrouvera les traces dans les feuilles). Il est, de ce fait, plus utile de se référer à une cinétique des teneurs mesurées dans la solution du sol, à intervalles relativement courts, surtout aux stades de sensibilité maximale.

Ces variations des concentrations en fer ferreux, pendant tout un cycle cultural, dans les solutions du sol de deux sites (ceux de Loudia-Ouoloff et de la station ISRA de Djibélor) choisis pour leur représentativité, sont exposées aux figures 5 et 6.

Bien que ces deux sols se différencient par une concentration et, sans doute par une mobilité bien différente du fer, ils constituent chacun un site propice à l'apparition des symptômes de la toxicité ferreuse. Mais la toxicité ferreuse apparaît, à Loudia-Ouoloff, quand les teneurs en Fe(II) de la solution du sol décroissent, alors que l'inverse se produit à Djibélor (augmentations simultanées des teneurs en fer ferreux et de la sévérité des symptômes). D'après ce résultat, la mesure des concentrations en fer ferreux dans la solution du sol ne constitue pas davantage une indication suffisante, par elle seule, pour définir, avec quelque certitude, un seuil de risque de toxicité ferreuse. La présente étude a montré, en outre, qu'elle est très variable : de 4 à quelques milliers de ppm.

Les quelques valeurs supérieures à 4 000 ppm, citées par PRADE (1987) et dont l'exemple reporté à la figure 5 n'est pas isolé, ont toutes été mesurées en début de cycle, et ne concernent donc que la toxicité primaire. Elles n'ont cependant jamais été signalées en dehors de notre zone d'étude. Elles pourraient s'expliquer par l'existence de microagrégats, tels qu'ils ont été récemment décrits dans des rizières asiatiques, par FURUSAKA *et al.*, (1990). Ces microagrégats sont

constitués, en fin de cycle et pendant la saison sèche, par les bactéries sulfato-réductrices et réductrices de fer à partir des débris organiques de la culture précédente. Ils contiennent une part importante de composés ferriques, liés à cette matière organique en décomposition. Les fractions de 3 à 10 mm, rapidement désagrégées et réduites en deux à trois semaines de submersion, participent ainsi à une brutale remise en solution de composés ferreux.

##### 4.4.2. PRÉSENCE DE FER DANS LES FEUILLES

L'analyse des échantillons foliaires (tabl. III) confirme que, dans pratiquement tous les cas de symptômes très nets qui justifiaient d'effectuer le prélèvement des feuilles atteintes, il s'agissait bien d'une intoxication par les ions ferreux. Les plantes sévèrement intoxiquées se caractérisent toutes par une teneur élevée en fer des organes aériens du riz : les ions ferreux qui ont traversé le cortex racinaire depuis peu de temps sont à l'origine de l'accumulation des oxydes ferriques retrouvés dans les feuilles les plus récentes (ceux dosés dans les feuilles plus âgées représentent davantage les effets cumulatifs sur une longue période). Les teneurs mesurées en basse Casamance sont en accord avec le seuil de 300 ppm défini par TANAKA & YOSHIDA (1970). L'intoxication ferreuse a aussi été confirmée, *a posteriori*, par le niveau élevé des populations bactériennes réductrices de fer ferrique (et surtout par leur augmentation simultanée, car le niveau de population ne peut être en soi une preuve certaine de toxicité). Elles sont de l'ordre de  $10^8$  à  $10^9$  bactéries par gramme de rhizoplan et par gramme de sol rhizosphérique des plants en cours d'intoxication. Ces chiffres sont très élevés si on les compare aux populations de l'ordre de  $10^5$  à  $10^7$  que l'on rencontre dans les mêmes microsites des riz indemnes aux mêmes stades (PRADE, 1987).

Ces analyses foliaires donnent par ailleurs des résultats qui concordent bien avec les analyses effectuées sur le sol correspondant, prélevé au même moment, et qui mettaient en évidence une carence *simultanée* en P et K (tabl. I). Cette fois encore, les limites significatives de carences définies par JONES *et al.* (1982) paraissent s'appliquer aux échantillons prélevés.

Une étude plus fine des résultats obtenus sur les parcelles d'Affiniam, de Mahamouda et de Tendimane (voir détails au tableau III) permet aussi de montrer que, dans une même parcelle, mais à quelques mètres ou dizaines de mètres de distance, les plantes prélevées dans les zones considérées comme "saines" ou peu touchées (Affiniam a, Mahamouda c ou Tendimane c) sont significativement différentes de celles les plus gravement intoxiquées (respectivement Affiniam b, Mahamouda a et b et Tendimane b). Ces différences

TABLEAU III  
Analyses foliaires (2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> feuilles) dans les rizières de basse Casamance sensibles à la toxicité ferreuse.

Foliar analysis (2nd and 3rd leaves from top ; expressed on dry matter) of iron intoxicated rice plants sampled in Lower Casamance rice soils.

Parcelle	Fe	Al	P	K	Ca	Mg	Na	Zn	Mn	Stade végétatif	Intensité des symptômes	Mortalité en %
	Δ <-ppm->	Δ <.....%>	□	□	□	□	‡ <-ppm->	□	□			
										(1)	(2)	(3)
Affiniam a *	490	n.d.	0.12	1.20	0,57	0,22	759	n.d.	n.d.	début maturation	(+)	0
Affiniam b *	1820	n.d.	0,19	0.44	0,44	0,16	959	n.d.	n.d.	début maturation	+++	20
Mampalago	2100	n.d.	0,19	0.57	0,22	0,11	1477	n.d.	n.d.	début épiaison	+++	30
Djibélor E7	1540	n.d.	0,23	1.20	0,42	0,10	488	n.d.	n.d.	floraison	+	0(50)
Djibélor E8	1050	n.d.	0,16	0.47	0,62	0.05	1189	n.d.	n.d.	floraison	++	20
LO2	7207	969	0,29	1.68	0,22	0,20	4209	22,9	278	épiaison	++++(†)	100
LO3	5716	690	0.15	2,02	0,27	0,12	2045	20,3	176	2 semaines	++++	50
LO4	2008	414	0.10	1,90	0,18	0,70	395	15,2	40	4 semaines	++++	10 à 50
LO5	2010	3060	0.11	1.34	0,62	0,26	188	23,4	288	2 semaines	++	0
LO6	1273	145	0.20	0.77	0,27	0,18	6464	16,8	18	4 semaines	+++ (†)	30 à 90
LO7	322	60	0,25	1,82	0,27	0,10	1453	15,6	18	4 semaines	(++)	0
LO8	687	676	0,17	2,07	0,29	0,17	391	25,4	107	4 semaines	(+++)	0(50)
LO9	816	260	0,33	1.84	0,31	0,21	119	18,2	91	1 semaine	++	0
LO10	1542	275	0,29	1.84	0,18	0,13	271	24,1	97	2 semaines	+++	10
LO11	141	62	0.11	1.23	1,03	0,22	479	23,4	685	début épiaison	(++)	0
LO12	181	112	0.06	1.69	0,29	0,10	442	19,3	182	fin tallage	(++)	0(20)
LO13	497	103	0.10	2,29	0,18	0.05	273	14,6	53	fin tallage	++	10
LO14	831	121	0.11	2,07	0,12	0.05	222	15,5	16	fin tallage	++ à ++++	0 à 100
LO15	482	205	0.12	2,13	0,10	0,12	345	15,8	10	début épiaison	++ à +++	10 à 20
LO16	239	177	0,18	0.50	0,33	0,13	298	17,4	156	épiaison	(++)	0
LO17	459	238	0.11	0.52	0,42	0,31	2843	7,3	219	épiaison	+++ (†)	0
LO18	266	240	0,24	1.12	0,50	0,48	5000	9,8	114	maturation	(+)(†)	0
Karouate.2	386	201	0,28	2,12	0,16	0.04	149	14,4	10	début épiaison	(+++)	0(80)
Karouate 3	339	261	0,21	1,93	0,44	0,13	140	16,7	290	épiaison	(++)	0(20)
Karouate 5	353	249	0.11	0.98	0,74	0,19	1509	14,4	23	4 semaines	+	0
Karouate 6	1074	200	0,14	1,21	0,12	0.06	198	19,1	92	maturation	(+++)	(10)
Maha. a *	501	797	0.10	1,94	0,20	0,11	168	9,6	122	4 semaines	++	0
Maha. b *	515	1320	0.08	1.18	0,12	0.05	120	7,6	67	4 semaines	++	0
Maha. c *	162	127	0,15	2.15	0,13	0,10	84	17,4	191	4 semaines	0	0
Tendiman b *	732	1350	0.04	1.28	0.08	0.08	319	14,7	82	début floraison	+++	30 à 80
Tendiman c *	198	256	0,13	1,74	0,15	0.60	116	13,9	168	début floraison	0	0
DiDi 1	687	326	0.10	1,84	0,62	0.05	235	12,4	28	maturation	++	0
DiDi 2	469	225	0.10	1,58	0,24	0.02	140	16,8	25	épiaison	++	0(50)
DiDi 3	635	152	0,15	1.14	0,32	0.05	181	15,2	276	maturation	+++	0
DiDi 4	519	145	0,18	1.26	0,41	0.04	277	22,7	70	maturation	++	0

Δ Seuils de Toxicités (TANAKA & YOSHIDA, 1970) : Fe > 300ppm ; Al > 300 ppm ; en gras : valeurs supérieures à ces seuils

□ Seuils de Carences (JONES, 1982) : en P (< 0,1 à 2%, suivant le stade végétatif) ; en K (< 1 à 2%) ; en Ca (< 0,1%) ; en Mg (< 0,1%) ; en Zn (< 10-20ppm) et en Mn (< 20 ppm) ;

soulignées : valeurs inférieures à ces seuils ;

\* a, b, c : état de santé des plants : voir texte ;

(†) : possibilité d'intoxication supplémentaire par NaCl ;

‡ pour Na, en gras : valeurs supérieures à 1.500 ppm ;

(1) à compter du repiquage ; (2) même notation qu'au Tableau II ; (3) % de plants morts récemment (< 1 semaine) ; (%) : plants morts bien avant les observations.

les plus significatives portent sur les teneurs plus élevées en phosphore et en potassium. Les analyses foliaires confirment aussi, et toujours en accord avec les teneurs mesurées au même moment dans les sols correspondants, que le riz, dans ces quelques rizières, souffre également de carences en magnésium, peut-être rendu moins disponible à la suite de l'augmentation simultanée des teneurs en aluminium.

## 5. DISCUSSION : INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS ET SOLUTIONS PRÉCONISÉES

A ce stade de l'étude, il apparaît (PRADE, 1987 ; JACQ, 1989) que, dans les rizières de basse Casamance, les facteurs édaphiques à l'origine des toxicités ferreuses primaires et secondaires ne sont pas identiques, ou tout au moins, qu'ils n'interviennent

pas dans le même ordre. Certains de ces facteurs interviennent de façon constante, la relative anaérobiose par exemple, encore que la toxicité secondaire soit plus favorisée par des alternances de phases d'inondation et d'humectation (PRADE, 1987). *L'importance relative des autres conditions est plus ou moins marquée suivant le stade végétatif*, et la prévention devra en tenir compte. La toxicité ferreuse primaire est plus directement liée à la forte disponibilité en fer ferreux dans les jours qui précèdent ou suivent le repiquage, mais en partie aussi, à ce stade critique, à l'acidité du sol et à la salinité. L'effet des déficiences multiples en éléments fertilisants (lié à la nature des argiles) se fait sentir plus fortement sur les plants plus âgés : il est maintenant confirmé que ces carences à mi-cycle doivent être considérées comme la cause principale de la toxicité ferreuse secondaire.

Il devient évident que certains facteurs ont une importance marquée : les déficiences nutritionnelles pour les sols que nous avons étudiés, et peut-être la toxicité aluminique surajoutée, qui deviendrait primordiale dans certains sols plus acides encore. Il existe donc, en comparaison, des facteurs "secondaires", qui ne peuvent plus être considérés comme "causes" : le pH et les teneurs instantanées en fer ferreux dans la solution du sol. Ce travail peut contribuer à hiérarchiser ces paramètres, mais il ne permet pas d'affirmer que l'ordre d'importance défini pour les seules rizières de basse Casamance, dans une zone géographique qui présente une certaine originalité sur le plan pédologique, sera identique dans d'autres zones rizicoles. La multiplicité des techniques de lutte contre la toxicité ferreuse le confirme. En ce qui concerne deux facteurs, d'une part, les carences et d'autre part, le pH, des essais de terrain ont été faits pour tenter d'y remédier.

### 5.1. Carences

Les données analytiques présentées au tableau III ont mis en évidence qu'en basse Casamance la toxicité ferreuse s'accompagne inévitablement de *carences simultanées en potassium et en phosphore*. Ces résultats confirment ceux d'essais précédents, réalisés en microparcelles (1 m<sup>2</sup>) et sur les casiers expérimentaux de l'ISRA, qui avaient montré *que la toxicité ferreuse secondaire, pour le moins, était due pour l'essentiel à une carence en potassium* (PRADE, 1987 et PRADE *et al.*, 1987). Mais ils sont insuffisants pour établir avec autant de certitude qu'il existe aussi une déficience en magnésium, et encore moins, pour définir les effets probables de l'excès d'aluminium dans les sols les plus acides.

Lors de ces essais, il avait déjà été observé que l'application d'engrais phosphatés ou celle d'engrais

plus équilibrés (apportant également du magnésium) augmentait la résistance du plant du riz aux ions ferreux, car elle permettait aussi une plus grande assimilation du potassium. Il en avait été conclu que l'apparition de la toxicité ferreuse secondaire (pouvant être suivie d'une sulfato-réduction : JACQ, 1989 ; JACQ *et al.*, 1990) constitue, tout d'abord, le symptôme significatif d'une carence en potassium du sol de la rizière. D'autres chercheurs, comme DAS GUPTA (1971) et DENT (1986), avaient déjà signalé, mais sans en donner d'explication autre que physiologique ou agronomique, la réponse favorable du riz, dans d'autres sols sulfatés acides, à l'application d'engrais phosphatés. Cet apport minéral ne diminue en rien l'activité des bactéries sulfato-réductrices, qui, dans certains de ces sols, contribuent à l'intoxication du riz par production de quantités importantes de sulfures, ou à l'apparition *post mortem* de sulfure ferreux insoluble (JACQ, 1989 ; JACQ *et al.*, 1990).

Des essais de dessalement de sols sulfatés plus acides et poldérisés (BOIVIN & LOYER, 1985) ont montré que des apports d'engrais N P K dans les parcelles n'ont pas les effets favorables espérés. En effet, les formes solubles du phosphore sont bloquées, à des pH bas, sous forme de phosphates insolubles, en présence des excédents d'aluminium en solution. Dans un sol moins acide (exemple de la parcelle P4 de Djibélor, fig. 6), les apports de N et P, ou de N et K, apparaissent aussi efficaces que le traitement complet N P K pour limiter le fer ferreux dans la solution du sol avant la floraison, au moment où se déclenche la toxicité secondaire.

Lors d'essais similaires, mais cette fois réalisés en cases lysimétriques, mis en œuvre pour réhabiliter des *sols sulfatés acides dessalés*, BOIVIN & ZANTE (1987) ont constaté une bonne réponse du riz à un apport de phosphates tricalciques de Taïba. Ils ont signalé le raccourcissement de la durée du cycle végétatif et une meilleure croissance, et obtenu ainsi des rendements satisfaisants. Ils ont aussi montré une efficacité moindre du phosphogypse, présent dans les déchets d'exploitation des industries chimiques sénégalaises. Celui-ci permettait cependant d'éliminer une partie de l'aluminium échangeable, remplacé par du calcium. Un tel apport de gypse, bien que ce soit un sulfate, avait également été conseillé par JACQ (1989) pour diminuer l'intensité de la sulfato-réduction : son action est surtout sensible à moyen et long terme, et elle est à relier essentiellement à l'amélioration du drainage.

Si les amendements gypseux ou phosphatés ne peuvent avoir qu'un effet limité sur le pH, ils peuvent, par contre, favoriser le remplacement du fer et de l'aluminium échangeables par le calcium, et leur



TABLEAU IV  
 Maladies physiologiques du riz inondé dans lesquelles peuvent être impliquées  
 les intoxications par les sulfures et par le fer ferreux  
*Review of physiological diseases and nutritional disorders of rice attributable  
 to sulfides and ferrous iron toxicities*

Nom courant de la maladie	Rôle des sulfures	Rôle du fer ferreux	Autres principaux facteurs associés	Zones géographiques
S.R. spermosphérique	+++	?	néant	riz sur mangroves et
S.R. rhizosphérique I (1)	+++	(+)	) toxicité	sols sulfatés acides
S.R. rhizosphérique II (2)	+++	(+)	) ferreuse	Afrique Occidentale, Vietnam et Ceylan
Toxicité ferreuse I	(1) (+)	+++	stress au repiquage	Asie du Sud-Est,
Toxicité ferreuse II et formes typiques du "Bronzing disease"	(2) (+)	+++	et déficiences minérales et/ou toxicité aluminique sulfures <i>post mortem</i>	Indes, Philippines et Afrique Occidentale
autres "Bronzing" ou "Browning" et "Oranging disease"	(3) +	+++	sensibilité du cultivar	Afrique et Ceylan, Hongrie, Asie
"Akiochi" "Bruzone" ou "Root Rot"	+++	+++	acides organiques et moisissures	Corée, Japon, USA, Hongrie
"Straighthead" I et "Mildsulfide disease"	+++	+	moisissures	Hongrie et Japon
"Straighthead" II et "Akagare" (type II)	+++	(+)	composés comportant des thiols, acides organiques et carences en Zinc	USA (Louisiane), Japon
"Branca"	+	?	?	Japon et Corée
"Kuttipachal"	+	?	?	Portugal, Indes

Notations : +++ : rôle certain ;  
 + : facteur associé, mais secondaire par rapport au facteur repéré par +++ ;  
 (+) : intervention du facteur possible, ou facultative ;  
 ? : réponse inconnue (description incomplète).

Remarques :

S.R. = Sulfato-Réduction et Toxicité Ferreuse :  
 (1) I : primaire ; (2) II : secondaire ;

- (3) : le "Bronzing", décrit en Asie du Sud-Est, est une forme de toxicité ferreuse I, terme souvent utilisé pour toutes les toxicités ferreuses.  
 (4) : il y a convergence entre le "Root rot" (ou pourrissement des racines) et certaines formes de "Bruzone" ou d'"Akiochi";  
 (5) : pour l'"Akagare" type II, la déficience en zinc est le facteur majeur.

lixiviation, en fonction des formes ioniques existantes et du pH initial. Ils peuvent également faire précipiter des ions hydroxylés de fer et d'aluminium par l'effet des ions phosphates et sulfates, ce processus devant favoriser indirectement l'absorption du potassium, rendu de ce fait disponible pour les plants de riz (LE BRUSQ, 1986).

## 5.2. Effets du pH et de la matière organique

Il a été établi lors de ce travail que la forte acidité du milieu (pH de 3,0 à 3,5) ne constitue pas un critère de l'apparition probable des symptômes de toxicité ferreuse. A notre connaissance, aucune expérimentation spécifique n'a été faite récemment en basse Casamance pour remédier aux toxicités ferreuse et alumi-

nique par le biais d'un amendement destiné à remonter le pH. BOIVIN & ZANTE (1987), lors des essais précités sur sols sulfatés acides dessalés, ont cependant confirmé l'intérêt des amendements calciques (chaulage) pour une meilleure récupération à long terme de tous les sols dont l'acidité est à la limite du supportable par le riz.

Il reste possible d'interpréter ce qui se passe dans cette zone par les données obtenues sur d'autres sols rizicoles du Sénégal ou en Asie. Pour reprendre l'exemple des sols sulfatés acides du delta du fleuve Sénégal, qui, à l'exception des sols recouvrant des mangroves fossiles, sont moins acides que ceux de basse Casamance, car plus évolués et surtout mieux tamponnés par les cations, le seul pH n'explique pas qu'ils soient protégés. L'insensibilité du riz au fer ferreux dans ces sols serait à relier en priorité au pouvoir tampon des cations et à la bonne disponibilité de ceux-ci, bien plus qu'au niveau relatif du pH. Cette sensibilité très faible du riz aux ions ferreux, en liaison avec la forte acidité (constatée au Sénégal, mais aussi dans quelques pays d'Asie) semble contredire les observations de PONNAMPERUMA (1973, 1977), celles de HOWELER (1973), de TADANO (1976) ou encore celles, plus récentes, de SMALING *et al.* (1985), mais confirme les travaux de TANAKA & YOSHIDA (1970) ou encore ceux de OTTOW *et al.* (1982) dans d'autres sols, asiatiques cette fois.

Nos travaux n'ont pas permis d'établir de relation entre les teneurs en matière organique et le degré de toxicité. La teneur en matière organique est, dans ces sols, toujours très élevée, et doit être attribuée à la décomposition des résidus foliaires et racinaires de *Rhizophora mangle* ou *R. racemosa* (FELLER *et al.*, 1989), qui augmente à la fois les quantités de carbone, d'azote et de soufre. L'hypothèse que la richesse organique du sol ne jouerait qu'un rôle indirect (voire accessoire) dans le déclenchement de la toxicité ferreuse, avait déjà été émise par VAN BREEMEN & MOORMANN (1978).

### 5.3. Sélection des variétés et choix des engrais

L'ensemble des contraintes multiples à la riziculture en basse Casamance rend indispensable, plus que jamais, une coopération entre agronomes, pédologues et microbiologistes. Dans la mesure où la sélection variétale s'avérera rapidement indispensable, il faudra prévoir, dans cette zone sensible, l'intervention de physiologistes végétaux et de généticiens. En effet, à l'exception de deux mécanismes physiologiques bien connus pour être sous le contrôle de la plante, d'une part, la libération d'oxygène au niveau racinaire, par transfert à travers l'aérenchyme (et dont les effets bénéfiques ont été discutés dans JACQ *et al.*, 1990) et,

d'autre part, l'influence de la fertilisation sur l'exsudation (BENCKISER *et al.*, 1984a), peu de résultats ont été publiés sur les capacités de défense du riz. Bien des chercheurs estiment actuellement que le système racinaire possède, quand il est intact, des mécanismes d'autorégulation de l'entrée des ions ferreux, mais ceux-ci n'ont pas été décrits.

De ce fait, la prévention actuelle contre la toxicité ferreuse se base plus sur l'adaptation des techniques culturales et le rétablissement de la fertilité par des apports d'engrais que sur l'adaptation du riz à ce biotope ou sur la modification des caractéristiques du sol, cette dernière pratique se révélant souvent décevante. Bien qu'il ait été montré que des pratiques culturales inadaptées puissent favoriser les toxicités ferreuses en basse Casamance (PRADE *et al.*, 1987) et, parfois, la sulfato-réduction rhizosphérique qui les suit (JACQ, 1989 ; JACQ *et al.*, 1990), ce travail a confirmé que le manque de disponibilité du potassium ou du phosphore des sols inondés, constitue la caractéristique pédologique majeure des sols de rizière dans lesquels apparaissent et peuvent s'intensifier les maladies "physiologiques" du riz directement induites par les ions ferreux. Mais le fait que la plante, dans des conditions d'acidité moyenne, soit protégée de la toxicité ferreuse tant que les principaux cations (autres que  $\text{Na}^+$ ) sont disponibles, est très encourageant. Il laisse espérer que des apports d'engrais ou d'amendements (P et K surtout, mais aussi Ca et Mg), choisis en fonction des différents types de sols, et en quantités suffisantes, permettent de retrouver sur ces parcelles sensibles, un niveau de fertilité satisfaisant, et tel qu'il puisse justifier cette dépense supplémentaire.

## CONCLUSION

Ce travail a permis de confirmer certains résultats connus concernant la toxicité ferreuse. En particulier, il donne un nouvel exemple de l'importance capitale de l'état nutritionnel du riz. Mais il suggère également qu'il faut disjoindre deux notions trop souvent confondues : la teneur en fer ferreux, mesurée ponctuellement dans la solution du sol, n'en représente pas la disponibilité et ne peut, de ce fait, être reliée à l'apparition des symptômes foliaires. Ces derniers, et la gravité de l'intoxication, sont le résultat d'une accumulation progressive de fer dans les parties aériennes, qui ne peut être mesurée qu'*a posteriori*. Le passage d'ions ferreux dans les racines est cependant prévisible si on suit des cinétiques permettant de vérifier que le fer ferreux est disponible aux stades de sensibilité maximale du riz, et surtout de connaître la durée probable de la pénétration. Deux cinétiques sont faciles à établir : celle de la libération des ions ferreux,

ou, ce que nous avons fait, celle des populations bactériennes. Le résultat essentiel de ce travail est qu'il restera toujours difficile, en basse Casamance peut-être encore plus qu'ailleurs, de définir un seuil de Fe(II) dans la solution de sol à partir duquel se produira obligatoirement l'une ou l'autre forme de toxicité ferreuse.

Les travaux effectués dans cette région permettent d'affiner le pronostic : les carences multiples constatées (en potassium, en phosphore et parfois en magnésium) sont à relier à la forme des argiles, et à leur faible capacité d'échange. Elles se manifestent le plus nettement à mi-cycle et sont plus prononcées dans les sols où les formes d'argiles dominantes sont des kaolinites. Dans cette zone rizicole, la sédimentation et la nature des sols sont manifestement à l'origine de la gravité de la toxicité ferreuse. Celle-ci peut également être associée à d'autres toxicités microbiennes, dont la sulfato-réduction, favorisée par la richesse des sols en composés soufrés et en matière organique. Elle interfère aussi avec les problèmes que posent l'acidification et la salinisation des sols, auxquels, dans les cas

limites, se superpose la toxicité aluminique. L'analyse de la complexité des interactions entre les carences minérales, les diverses toxicités et les maladies "physiologiques" du riz nous ont permis de présenter la synthèse du tableau IV (JACQ, 1989).

#### REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été effectués dans le cadre d'une convention de recherche passée entre l'université de Stuttgart-Hohenheim (RFA), l'ORSTOM (laboratoire de Microbiologie des sols de Dakar-Bel-Air, en liaison avec les pédologues et chimistes du centre de Dakar-Hann) et l'Institut sénégalais de recherches agricoles (ISRA, station de Djibélor), sur un financement conjoint de deux organismes d'État de la République fédérale d'Allemagne, la GTZ (Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, Eschborn) et la DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft, Bonn).

Les auteurs remercient les docteurs Jacques BERTHELIN (C.p.b./CNRS, Nancy) et Jean-François VIZIER (ORSTOM-Cadarache) pour leurs judicieux conseils lors de la rédaction finale du manuscrit.

#### BIBLIOGRAPHIE

- A.F.E.S., 1990. – Référentiel Pédologique. INRA Congrès Int. de Science du Sol, Kyoto, Japon (août 1990).
- BABA (I.), 1958. – Methods of diagnosing Akiuchi, iron and hydrogen sulphide toxicity in the wet zone rice fields of Ceylon. *Tropic. Agriculturist*, 114 : 231-236.
- BALDENSPERGER (J.), 1969. – Étude de la sulfo-oxydation dans les sols formés sur alluvions fluvio-marines en milieu tropical. ORSTOM-Dakar. *multigr.*
- BALDENSPERGER (J.), 1973. – The use of respirometric method for the evaluation of sulfur oxidation in soils. Proc. Int. Symp. Acid Sulphate Soils, H. Dost (ed.), ILRI (pub.), Wageningen, The Netherlands, n° 18 (II) : 141-148.
- BALDENSPERGER (J.F.) et GARCIA (J.-L.), 1975. – Reduction of oxidized inorganic nitrogen compounds by a new strain of *Thiobacillus denitrificans*. *Archiv. Microbiol.*, 103 : 31-36.
- BENCKISER (G.), OTTOW (J.C.G.), SANTIAGO (S.) et WATANABE (I.), 1982. – Physico-chemical characterization of iron toxic levels in some Asian countries. *IRRI Res. Pap. Ser.*, 85 : 1-11.
- BENCKISER (G.), OTTOW (J.C.G.), WATANABE (I.) et SANTIAGO (S.), 1984a. – The mechanism of excessive iron uptake (iron toxicity) of wetland rice. *J. Plant Nutr.*, (Japan), 7 : 177-185.
- BENCKISER (G.), SANTIAGO (S.), NEUE (H.U.), WATANABE (I.) et OTTOW (J.C.G.), 1984b. – Effet of fertilization on exudation, dehydrogenase activity, iron-reducing populations and Fe(II) formation in the rhizosphere of rice (*Oriza sativa L.*) in relation to iron toxicity. *Plant Soil*, 79 : 305-316.
- BEYE (G.), TOURÉ (M.) et ARIAL (G.), 1975. – Acid sulphate soils of West Africa : problems of their management for agricultural use. IIRI Conference, Los Baños, The Philippines.
- BOIVIN (P.), 1984. – Étude pédologique de la vallée de Koubalan (Kalounayes, Casamance) : étude de la variabilité spatiale du pH et de la conductivité d'un sol de tannes. *Doc. ronéo. ORSTOM-Dakar.*
- BOIVIN (P.), et LOYER (J.-Y.), 1985. – Évolution des sols salés de mangroves du périmètre réaménagé de Soukouta II au cours de la saison des pluies 1984. (Vallée de Guidel-Casamance). *Doc. ronéo. ORSTOM-Dakar.*
- BOIVIN (P.) et LOYER (J.-Y.), 1988. – Mise en valeur des mangroves au Sénégal. Rapport final Contrat CEE : TSD-A-104 (M.R.), ISRA Dakar-ORSTOM Paris, *multigr.*
- BOIVIN (P.) et ZANTE (P.), 1987. – Essai de récupération d'un sol sulfaté acide en cases lysimétriques (Rapport de Campagne). *Doc. ronéo. ORSTOM-Dakar.*

- DAS GUPTA (D.K.), 1971. – Effects of levels and time of nitrogen application and interaction between phosphorus and nitrogen on grain yield of rice varieties under tidal mangrove swamp cultivation in Sierra Leone. *Sols Africains*, 16 : 59-67.
- DENT (D.), 1986. – Acid sulfate soils: A baseline for research and development. ILRI, Wageningen, The Netherlands, n° 39.
- FASSBENDER (H.W.) et AHRENS (E.), 1977. – Laborvorschriften und Praktikumsanleitung. *Göttinger Bodenkundliche Berichte*, 47 : 1-88.
- FAUCK (R.), 1972. – Les sols rouges sur sables et sur grès d'Afrique occidentale. *Mém. ORSTOM*, n° 61.
- FELLER (C.) TRICHET (J.), FONTES (J.C.) et MARIUS (C.), 1989. – Sur le rôle de la végétation dans le stockage du soufre dans les sols de mangroves (Sénégal). Résultats préliminaires. *Soil Biol. Biochem.*, 21 : 947-952.
- FRENEY (J.R.), JACQ (V.A.) et BALDENSPERGER (J.F.), 1982. – The significance of the biological sulfur cycle in rice production. Microbiology of tropical soils and plant productivity, Y.R. Dommergues and H.C. Diem, (ed.), Nijhoff/Junk (pub.), The Hague, The Netherlands, Chapter 10 : 271-317.
- FURUSAKA (C.), NAGATSUKA (Y.) and ISHIKURI (H.), 1990. – Survival of sulphate-reducing bacteria in oxic layers of paddy soils. Diversity of Environmental Biogeochemistry, J. Berthelin (ed.), Elsevier Science Publishers (pub.), Amsterdam, The Netherlands, Chapter V. (Sulfur and nitrogen oxido-reduction processes), paper 5.1. (sous presse).
- GARCIA (J.-L.), RAIMBAULT (M.), JACQ (V.), RINAUDO (G.) et ROGER (P.), 1974. – Activités microbiennes dans les sols de rizière du Sénégal : relations avec les propriétés physico-chimiques et influence de la rhizosphère. *Rev. Écol. Biol. Sol*, 11(2) : 169-185.
- GHIORSE (W.C.), 1988. – Microbial reduction of manganese and iron. Biology of Anaerobic Microorganisms. A.J.B. ZEHNDER, (ed.), Wiley-Interscience (pub.), New York, Chapter 6 : 305-331.
- GRONDIN (J.-L.), 1982. – Paramètres physico-chimiques des eaux. Mesures *in situ*. Note technique n° 4 (avril 1982) ORSTOM, Centre de Dakar-Hann, *multigr.*
- HAMMANN (R.) and OTTOW (J.C.G.), 1974. – Reductive dissolution of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> by saccharolytic clostridia and *Bacillus polymyxa* under anaerobic conditions. *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.*, 137 : 108-115.
- HOWELER (R.H.), 1973. – Iron induced orange diseases of rice in relation to physico-chemical changes in flooded oxisol. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 37 : 898-903.
- IRAT, 1969. – Recherches rizicoles en Casamance. Rapport annuel 1968. Institut de recherches agronomiques tropicales et des cultures vivrières. Sénégal.
- IRRI, 1969. – Annual report for 1969. IRRI, Los Baños, The Philippines.
- JACQ (V.A.), 1973. – Biological sulphate reduction in the spermosphere and the rhizosphere of rice in some acid sulphate soils of Senegal. Proc. Int. Symp. Acid Sulphate Soils, H. Dost (ed.), ILRI (pub.), Wageningen, The Netherlands, n° 18 (II) : 82-98.
- JACQ (V.A.), 1989. – Participation des bactéries sulfato-réductrices aux processus microbiens de certaines maladies physiologiques du riz inondé (exemple du Sénégal). Thèse Biologie cellulaire et Microbiologie, université de Provence (Aix-Marseille I).
- JACQ (V.A.), PRADE (K.) and OTTOW (J.C.G.), 1987. – Significance of iron-and-sulphate redox processes in flooded soils for the nutrition of rice. Trans. XIII Cong. Intern. Soc. Soil. Sci., Vol. 6 : 706-714.
- JACQ (V.A.), PRADE (K.) and OTTOW (J.C.G.), 1990. – Iron sulphide accumulation in the rhizosphere of wetland rice (*Oryza sativa* L.) as the result of microbial activities. Diversity of Environmental Biogeochemistry, J. Berthelin (ed.), Elsevier Science Publishers (pub.), Amsterdam, The Netherlands, Chapter VII (Soil functioning processes), paper 7.9. (sous presse).
- JONES (V.S.), KATYAL (J.C.), MAMARIL (C.P.), and PARK (C.S.), 1982. – Wetland rice nutrient deficiencies other than nitrogen. Rice research strategies for the future. IRRI (pub.), Los Baños, The Philippines : 327-378.
- KALCK (Y.), 1978. – Evolution des zones à mangroves du Sénégal au Quaternaire récent. Études pédologiques et géochimiques. Thèse 3<sup>e</sup> Cycle, université ULP Strasbourg, *multigr.*
- LE BRUSQ (J.-Y.), 1986. – Interests and limits of acidimetric titrations in the study of acid complex solutions. Fifth Int. Symp. on water-rocks interactions (Reykjavik, august 1986) : 353-356, *multigr.*
- LE BRUSQ (J.-Y.), LOYER (J.-Y.), MOUGENOT (B.) et CARN (M.), 1987. – Nouvelles paragenèses à sulfates d'aluminium, de fer et de magnésium, et leur distribution dans les sols sulfatés acides du Sénégal. *Science du Sol*, 25 : 173-184.
- LOYER (J.-Y.), 1989. – Les sols salés de la basse vallée du fleuve Sénégal. Caractérisation, distribution et évolution sous cultures. *Études et Thèses*, ORSTOM, Paris.
- LOYER (J.-Y.), BOIVIN (P.), LE BRUSQ (J.-Y.) et ZANTE (P.), 1988. – Les sols du domaine fluvio-marin de Casamance (Sénégal) : Évolution récente et réévaluation des contraintes majeures pour leur mise en valeur. Selected Papers of the Dakar Symposium on Acid Sulphate Soils (january 1986), H. Dost (ed.), ILRI, (pub.), Wageningen, The Netherlands, n° 44 : 16-23.
- LOYER (J.-Y.), JACQ (V.A.) et REYNAUD (P.A.), 1982. – Variations physico-chimiques dans un sol de rizière inondée et évolution de la biomasse algale et des populations microbiennes du cycle du soufre. *Cah. ORSTOM, sér. Biol.*, Vol. 45 : 53-72.
- MARIUS (C.), 1977. – Carte pédologique à 1/50 000 du Saloum. 1 carte, 1 notice et annexes. ORSTOM-Dakar.

- MARIUS (C.), 1985. – Mangroves du Sénégal et de la Gambie. *Trav. et Doc. ORSTOM Paris*, n° 183.
- MONTOROI (J.-P.), TOUMA (J.) et ZANTE (P.), 1989. – Caractérisation hydrodynamique *in situ* des sols alluviaux de la vallée de Kouturé (Basse-Casamance). *Doc. ronéo. ORSTOM-Dakar*.
- MOUGENOT (B.), 1988. – Étude des états de surface des sols de mangroves par télédétection en Basse-Casamance. *Doc. ronéo. ORSTOM-Dakar*.
- MOURARET (M.), 1972. – Étude biologique des eaux dans quelques cours d'eau du Cameroun et du Gabon. *ORSTOM-Dakar, multigr.*
- MOURARET (M.) et BALDENSPERGER (J.), 1979. – Use of membrane filters for the enumeration of autotrophic *Thiobacillii*. *Microb. Ecol.*, 3 : 345-357.
- MÜNCH (J.C.) and OTTOW (J.C.G.), 1983. – Reductive transformations mechanisms of ferric oxides in hydromorphic soils. *Ecol. Bull. (Stockholm)*, 35 : 383-394.
- OLSEN (S.R.), COLE (C.V.), WATANABE (W.S.) and DEAN (L.A.), 1954. – Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. *USDA Circ. Nr. 939*.
- OTTOW (J.C.G.), BENCKISER (G.) and WATANABE (I.), 1982. – Iron toxicity of rice as multiple nutritional soil stress. *Trop. Agric. Res. Ser. (Japan)*, 15 : 167-179.
- OTTOW (J.C.G.), BENCKISER (S.) and WATANABE (I.), 1983. – Multiple nutritional stress as a prerequisite for iron toxicity of wetland rice (*Oryza sativa* L.). *Trop. Agric. (Trinidad)*, 60 : 102-106.
- OTTOW (J.C.G.) et GLATHE (H.), 1971. – Isolation and identification of iron-reducing bacteria from gley soils. *Soil Biol. Biochem.*, 3 : 43-55.
- OTTOW (J.C.G.) and FABIG (W.), 1985. – Influence of oxygen aeration on denitrification and redox level in different bacterial batch cultures. *Planetary Ecology*, J.A. Brierly and C.L. Brierly (ed.), Van Nostrand Reinhold Comp. (pub.), New York : 427-440.
- PAYCHENG (C.), 1980. – Méthodes d'analyses utilisées au laboratoire commun de Dakar. *Doc. ronéo. ORSTOM-Dakar*.
- PONNAMPERUMA (F.N.), 1973. – The chemistry of submerged soils. *Adv. Agron.*, 24 : 29-96.
- PONNAMPERUMA (F.N.), 1977. – Physico-chemical properties of submerged soils in relation to fertility. *IRRI Res. Paper, Ser. 5, Los Baños, The Philippines*.
- PONNAMPERUMA (F.N.), 1983. – Improving the productivity of problem rice lands. *Chemistry and world food supplies : the new frontiers*. Pergamon Press, Oxford, U.K. : 47-55.
- PONNAMPERUMA (F.N.), BRADFIELD (R.), and PEECH (M.), 1955. – Physiological diseases of rice attributable to iron toxicity. *Nature* : 175-180.
- PRADE (K.), 1987. – Einfluß der Nährstoffversorgung auf die Eisentoxizität bei Naßreis (*O. sativa* L.) in der Basse Casamance (Senegal). *Dissertation Sc. Agr. Universität Stuttgart-Hohenheim, BRD*.
- PRADE (K.), OTTOW (J.C.G.) und JACQ (V.A.), 1987. – Die Ursachen der Eisentoxizität bei Naßreis (*O. sativa* L.) auf Alluvialen Böden in der Republik Senegal. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.*, 55/II : 645-650.
- PRADE (K.), OTTOW (J.C.G.) and JACQ (V.A.), 1988. – Excessive iron uptake (iron toxicity) by wetland rice (*Oryza sativa* L.) on an acid sulphate soil in the Casamance/Senegal. *Selected Papers of the Dakar Symposium on Acid Sulphate Soils (january 1986)*, H. Dost (ed.), ILRI, (pub.), Wageningen, The Netherlands, n° 44 : 150-162.
- SADIO (S.), 1989. – Pédogenèse et potentialités forestières des sols sulfatés acides salés des tannes du Sine Saloum (Sénégal). *Thèse, université de Wageningen (Pays-Bas), multigr.*
- SAHU (B.N.), 1968. – Bronzing disease of rice in Orissa as influenced by soil types and manuring and its control. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, 16 : 41-54.
- SANDELL (E.B.), 1959. – Iron. *Colorimetric determination of trace metals*. 3rd edition. Interscience Publishers Inc., New York : 522-554.
- SCHLICHTING (E.) und BLUME (H.P.), 1966. – *Bodenkundliches Praktikum*. Verlag Paul Parey, Hamburg-Berlin, BRD.
- SMALING (E.M.A.), KESTRA (E.) and ANDRIESSE (W.), 1985. – Detailed soil survey and qualitative land evaluation of the Echin Woye and the Kunko benchmark sites, Bida area, Niger state, Nigeria. Vol. 1 (Main report), ILRI Wageningen, The Netherlands.
- TADANO (T.), 1976. – Methods of preventing iron toxicity in lowland rice. *Memoirs of the Faculty of Agriculture, Hokkaido University (Japan)*, 10 : 22-68.
- TADANO (T.) and YOSHIDA (S.), 1978. – Chemical changes in submerged soils and their effect on rice growth. *Soils and Rice*, IRRI, Los Baños, The Philippines : 399-420.
- TAKIJIMA (Y.), 1965. – Studies on the mechanism of root damage of rice plants in peat paddy fields. II. Status of the roots in the rhizosphere and the occurrence of root damage. *Soil. Sci. Plant Nutr.*, (Japan), 11 : 204-211.
- TANAKA (A.), LOE (R.) and NAVASERO (S.A.), 1966. – Some mechanisms involved in the development of iron toxicity symptoms in the rice plant. *Soil Sci. Plant Nutr.*, (Japan), 12, (4) : 32-38.
- TANAKA (A.) et TADANO (T.), 1972. – Potassium in relation to iron toxicity of the rice plant, *Potassium Rev.*, 21 : 1-12.
- TANAKA (A.) and YOSHIDA (S.), 1970. – Nutritional disorders of the rice plant in Asia. *IRRI. Technical Bulletin n° 10* : 1-51.

- TROLLDENIER (G.), 1977. – Mineral nutrition and reduction processes in the rhizosphere of rice. *Plant Soil*, 47 : 193-202.
- VAN BREEMEN (N.) and MOORMANN (F.R.), 1978. – Iron toxic soils. *Soils and Rice*. IRRI, Los Baños, The Philippines : 781-799.
- VAN DER KLEI (J.), 1988. – Soil reclamation : a technical or a social-economic problem ? Reclaiming the acid sulphate soils in the tidal swamps of Basse-Casamance, Senegal. *Selecter Papers of the Dakar Symposium on Acid Sulphate Soils* (january 1986), H. Dost (ed.), ILRI, (pub.), Wageningen, The Netherlands, n° 44 : 229-237.
- VAN DER VORM (P.D.J.) and VAN DIEST (A.), 1979. – Aspects of the Fe and Mn nutrition of rice plant. I. Iron and Manganese uptake by rice plants, grown under aerobic and anaerobic conditions. *Plant Soil*, 51 : 233-246.
- VIEILLEFON (J.), 1977. – Les sols de mangroves et de tannes de basse Casamance (Sénégal). *Mém. ORSTOM* n° 83, Paris.
- VIEILLEFON (J.) et PEREIRA BARETTO (S.), 1986. – Carte Pédologique du Sénégal à 1/100 000 ; Basse-Casamance : 1a-2a, 2b. ORSTOM, Paris, *multigr.*
- VIZIER (J.-F.), 1987. – Analyse des mécanismes d'adsorption et de désorption du fer ferreux dans les milieux saturés. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, XXIII, (3) : 157-167.
- VIZIER (J.-F.), 1988. – La toxicité ferreuse dans les sols de rizières : importance du problème, causes et mécanismes mis en jeu, conséquences pour l'utilisation des sols. ORSTOM-Cadarache, *multigr.*
- WILLIAMS (C.N.), 1980. – Effects of lime, drainage, manganese dioxide and seedling condition on rice in acid sulphur soil. *Brunei Expl. Agric.*, 19 : 313-320.
- YOSHIDA (S.), 1981. – Fundamentals of rice crop science. IRRI (ed.), Los Baños, The Philippines. Chapter 4 (Nutritional disorders) : 177-183.
- YOSHIDA (S.) and TADANO (T.), 1978. – Adaption of plants to submerged soils. Crop tolerance to suboptimal land conditions. Jung G.A. (ed.), ASA (American Society of Agronomy) (pub.), Special Publication Nr. 32 : 233-256.