



DOCUMENT DE SYNTHÈSE CONCERNANT L'ÉTUDE DES EFFETS NOCIFS
DES BACTÉRIES REDUCTRICES DES CYCLES BIOLOGIQUES DU SOUFRE
ET DU FER VIS-A-VIS DU RIZ INONDE AU SÉNÉGAL

par

V.A. JACQ⁽¹⁾ et K. PRADE⁽²⁾

Résumé

Le présent rapport, destiné aux autorités sénégalaises, présente successivement: (1) les paramètres à mesurer pour connaître les processus microbiens toxiques, et les techniques d'études à mettre en oeuvre, (2) les principaux résultats connus à ce jour, (3) des méthodes de lutte contre ces maladies physiologiques du riz, (4) des propositions concrètes concernant la poursuite du programme de recherche au Sénégal et, (5) des conclusions générales.

(1) Microbiologiste du Sol, Laboratoire de Biologie des Sols de Bel-Air, Centre ORSTOM de Dakar, B.P. 1386.

(2) Ingénieur Agronome, Université de Stuttgart-Hohenheim République Fédérale d'Allemagne.



INTRODUCTION

Le présent rapport est destiné aux Autorités sénégalaises, et en particulier, au Ministère de la Recherche Scientifique et Technique (M.R.S.T.) et aux organismes de recherche et de développement qui ont participé à nos recherches: l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (I.S.R.A.) et la Société d'Aménagement et d'Etudes du Delta (S.A.E.D.).

Il ne constitue pas une publication au sens habituel de ce terme, mais est une synthèse, dont le but essentiel est de faire connaître, aux utilisateurs potentiels, des résultats pratiques et des applications possibles.

Nos travaux concernent deux types de maladies physiologiques du riz inondé, dues aux sulfures (S^{2-} , HS^-) et /ou aux ions ferreux (Fe^{++}), qui se produisent au Sénégal.

Les premières études sur une intoxication par les sulfures ont été menées essentiellement en Asie (au JAPON), aux U.S.A. (principalement en Louisiane), et, depuis 1971, au Sénégal. Nos travaux ont montré que ces sulfures sont d'origine microbienne (voir revue de FRENEY, JACQ et BALDENSPERGER, 1982) et que les attaques du riz qui en résultent constituent un important facteur limitant des rendements. Ces travaux ont consisté essentiellement à étudier les conditions écologiques et les mécanismes microbiens qui en expliquent l'intensité dans certaines rizières sénégalaises, dans le Delta du Fleuve Sénégal et en Casamance.

L'essentiel des travaux actuels sur la toxicité ferreuse est mené par le laboratoire du Professeur J.C.G. OTTOW, à l'Université de Stuttgart-Hohenheim, et en collaboration avec l'IRRI, aux Philippines. Les premières recherches en Afrique ont commencé en 1981, à l'arrivée de M. K. PRADE, et se font essentiellement en Basse-Casamance. Le principe de cette étude est similaire à celui de l'étude précédente sur le plan de l'approche écologique.

A ce stade de notre étude, qui est faite de façon conjointe depuis 3 ans, et dont les résultats finaux ne pourront être connus avant 1986, nous pouvons affirmer :

- Quand ils fonctionnent dans le sens d'une réduction excessive, ces deux cycles biologiques ont pour effet une accumulation d'ions toxiques pour le riz: ions sulfures ($S^{=}$ et H_2S), ions ferreux (Fe^{++}). L'accumulation de ces ions est significativement plus importante dans les sols engorgés, les processus microbiens réducteurs étant moyennement (ions Fe^{++}) ou fortement anaérobies (ions $S^{=}$), et les maladies physiologiques qui en découlent sont caractéristiques du riz irrigué de bas-fond, où la vie microbienne évolue sous excès d'eau (engorgement prolongé).
- Il arrive que certains sols soient sensibles aux deux toxicités simultanément (certains sols de Basse-Casamance) mais, en général, ils ne sont sensibles qu'à une seule forme de toxicité, (en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques). Si la sulfato-réduction peut survenir avec des intensités comparables dans les sols alluviaux du Delta du Fleuve Sénégal et les sols de mangroves et sulfatés acides de Casamance, la toxicité ferreuse semble limitée à certaines rizières de Basse-Casamance. La symptomologie des deux processus est maintenant bien connue et le repérage des maladies, in situ, est relativement aisé.

Les résultats déjà acquis, de façon certaine, et qui seront exposés sous une forme résumée, sont cependant suffisants pour permettre de donner un certain nombre de conseils pratiques, à l'usage des utilisateurs de la recherche. Il est également possible de définir une stratégie à appliquer pour continuer, d'une part, hors du Sénégal, la recherche fondamentale, et d'autre part, pour transférer notre technologie, et le volet appliqué de l'étude, à d'autres organismes de recherche ou à des sociétés de développement.

CHAPITRE I. LES PARAMETRES A ETUDIER ET LES METHODES A APPLIQUER
POUR CONNAITRE LES PROCESSUS MICROBIENS TOXIQUES
VIS-A-VIS DU RIZ INONDE.

1.1. La définition des paramètres

Les toxicités dues aux sulfures et aux ions ferreux sont liées à un ensemble de paramètres écologiques dont les principaux sont: le sol, l'eau, la plante elle-même et la microflore réductrice, qui produit et accumule ces ions.

1.1.1. Le sol

Il intervient essentiellement par sa matière pédologique, (liée à son origine, à sa genèse) qui conditionne ses principales propriétés physico-chimiques. Toute étude doit donc commencer par une analyse pédologique des principales caractéristiques intrinsèques du sol (pH, granulométrie, salinité, teneurs en anions et cations majeurs, etc...). L'étude des cycles biologiques du fer et du soufre exige, au minimum, une mesure des sulfates totaux et de la totalité du fer (sous forme ferrique).

Certains paramètres varient pendant le cycle végétatif. Parmi ceux à suivre en priorité, il faut signaler: le pH, le potentiel d'oxydoréduction-celui-ci a une importance capitale pour suivre instantanément le potentiel d'oxygénéation, lequel conditionne de façon précise, l'activité des bactéries réductrices, toutes anaérobies facultatives ou strictes- et les teneurs en ions $S^{=}$ et Fe^{++} .

Nous verrons que l'étude physico-chimique du sol doit être complétée par une étude de l'influence des engrais minéraux et organiques sur ces propriétés, et que certains paramètres "variables" dépendent aussi du système d'aménagement des parcelles et des régimes hydriques auxquels elles sont soumises, ce qui conditionne les solubilités et les dilutions de certains éléments.

1.1.2. L'eau.

L'eau est un élément majeur, non seulement pour la vie du riz, mais aussi car sa teneur (exprimée en humidité du sol) conditionne la vie microbienne de la microflore tellurique; tout excès

d'eau, que celle-ci provienne des pluies ou des apports faits par l'homme, favorise les bactéries anaérobies au détriment des bactéries aérobies. Ce qui paraît le plus important, c'est la teneur en oxygène de ces eaux, qui, parce que stagnantes, s'épuisent progressivement en O_2 dissous.

1.1.3. La plante

Le riz inondé résiste plus ou moins bien à l'engorgement du sol: certaines variétés (riz pluvial) tolèrent moins bien un excès prolongé en eau que les riz de bas-fonds, ou encore les riz flottants. Il y a donc à tenir compte des variations génétiques entre cultivars.

En général, un plant de riz possède la remarquable propriété de libérer, au niveau des racines, de l'oxygène, transporté par les parties aériennes dans le système racinaire. Sa résistance à des processus microbiens anaérobies est donc liée aux quantités d'oxygène qu'il peut exsuder dans les microbiotopes réducteurs.

En fait, la plante contrôle, aussi, en partie, et plus directement, la microflore qui est associée à son système racinaire, par ses exsudats (sucres, acides aminés, acides organiques, etc...) dont la nature et l'abondance varient avec les cultivars et surtout, le stade végétatif. Nous verrons qu'une part importante des cycles biologiques du soufre et du fer est conditionnée par ces exsudats.

1.1.4. La microflore, et les sites d'activités microbiennes

Tout processus microbien ne peut être bien connu que si sont définis les principaux groupes actifs: dans le cas qui nous intéresse ces groupes comportent pour le cycle du soufre les bactéries sulfato réductrices et les bactéries sulfo-réductrices, et pour le cycle du fer, un groupement de bactéries assez hétérogène que nous appellerons "réducteurs de fer ferrique". Il est nécessaire pour chacun de ces 3 groupements fonctionnels, de définir:

- sa composition "en espèces",
- ses sites d'activité préférentiels.

Notre étude a montré la complexité de chacune de ces microflores (et en particulier qu'il existe des souches typiques des sols de rizières sénégalais) et surtout, qu'elles sont activées dans un certain nombre de microsites bien "spécialisés", qui sont, dans l'ordre d'importance, la rhizosphère (voisinage immédiat des

racines), la spermosphère (microsite similaire entourant la graine en germination), le voisinage de la matière organique en décomposition et l'interface sol-eau. La localisation préférentielle de l'activité de ces bactéries à ces microsites s'explique par le fait que se trouvent "concentrées" à ces endroits les molécules organiques simples nécessaires à leur métabolisme.

Dans certains cas, et en particulier pour le cycle biologique du soufre, il faut aussi tenir compte de la microflore antagoniste, c'est à dire celle capable de réaliser des réactions chimiques qui vont dans le sens inverse; c'est le cas, par exemple des thiobacilles, dont certains réoxydent les sulfures et dont d'autres (T. ferroxidans) réoxydent le fer ferreux.

L'étude des processus toxiques d'origine microbienne comporte donc :

- l'identification des souches,
- des numérations précises de ces bactéries dans les principaux biotopes ou microsites où elles jouent un rôle majeur.

1.2. Les techniques d'étude

L'ensemble de la technologie d'étude est parfaitement au point: numérations bactériennes, dosages chimiques des ions toxiques, analyses du matériel végétal. A l'exception de ces dernières, elles sont applicables sur le terrain, et permettent à la fois des études en microparcelles (études fines de laboratoire, avec prélèvements à intervalles de temps très courts) et, lors des suivis sur le terrain, des essais en vraie grandeur. Cette technologie est relativement peu coûteuse, et transférable.

Les techniques à mettre en oeuvre comportent: des essais de terrain, des analyses physico-chimiques et des analyses microbiologiques.

1.2.1. Essais de terrain

Tous nos travaux ont été précédés par des prospections: pour le cycle du soufre: en Casamance (du Cap-Skiring à Kolda), sur le Fleuve, de St-Louis à Bakel) et particulièrement dans la zone deltaïque, les grands casiers de la SAED, pour le cycle du fer: le Delta du Fleuve et la Basse Casamance (de Ziguinchor à la mer, sur les deux rives).

Ceci a permis de "sélectionner" un certain nombre de sols "types" (pour le Delta, ceux de Tilène 3 et de Pont Gendarme ,

et N'Diaye-N'Dellé 2, pour la Casamance, un sol de la station I.S.R.A. de Djibélor).

Ces sols ont été testés, en présence de différentes variétés de riz, en pots (3 kg de sol), en microparcelles (de 1m^3) et suivis au champ (année 1981 pour les sols du Delta, 1982, 83 et 84 pour ceux de Casamance).

1.2.2. Les analyses physico-chimiques

1.2.2.2. Analyses pédologiques "classiques"

Ces analyses de sols ont été faits suivant les techniques du laboratoire d'analyse de l'ORSTOM-Hann (Paycheng 1980).

1.2.2.3. Analyses physico-chimiques complémentaires

Elles concernent essentiellement:

- des analyses d'eau, en particulier pour le cycle du fer, d'eau percolante, dans laquelle le fer ferreux (Fe^{++}) est dosé par une méthode colorimétrique (mesure à 508nm; réactif: chlorure d'orthophénantroline) classiquement utilisée par l'équipe du Prof. Ottow.

De même les sulfures sont dosés par la méthode colorimétrique de Chaudhry et Cornfield (1966). Enfin, il a été procédé à des analyses foliaires du riz (méthode ORSTOM, Paycheng 1980).

1.2.3. Les analyses microbiennes

Elles se font sur des échantillons de sol (de l'ordre de 10 g) prélevés essentiellement dans la rhizosphère et la spermosphère. Pour le cycle du soufre, il faut ajouter des échantillons de sol profond, au contact de la matière organique, et des échantillons de l'interface sol-eau. De même, pour l'étude du cycle du fer, l'essentiel des comptages s'est fait en utilisant la surface des racines, appelée rhizoplan.

Les bactéries sulfatoréductrices, divisées artificiellement en 3 groupes (1: utilisatrices de lactate, 2: utilisatrices d'acétate, 3: utilisatrices d'acides gras, dont le palmitate) suivant la source de carbone préférentielle, ont été dénombrées sur des milieux spécifiques, mis au point au Sénégal, dans ce but, et dérivée de la méthode de Mouraret (1972). Les bactéries sulforéductrices ont été étudiées sur le milieu mis au point par A. Traoré (1978).

Les thiobacilles ont été dénombrés sur le milieu de Mourarët et Baldensperger (1977).

L'ensemble de ces bactéries du cycle du soufre est obtenu à partir d'un même échantillon, suivant une technologie de filtration, adaptée aux essais sur le terrain, et applicable en dehors du laboratoire.

Les bactéries réductrices de fer ont été dénombrées suivant une méthode adaptée de Ottow (1969) puis Hamann et Ottow (1974). L'activité globale de la microflore a été appréciée par une mesure d'activité déshydrogénase (ADH).

Des numérations similaires ont été faites, quand nécessaire, sur des échantillons d'eau, soit l'eau de la rizière, soit de l'eau prélevée en profondeur après percolation.

Dans la mesure du possible, chaque espèce bactérienne (voir liste dans le chapitre résultats) a été ensuite isolée sur des milieux spécifiques, et leur identification exacte est en cours. Les résultats ne sont pas publiables cette année.

CHAPITRE 2. LE POINT SUR LES RESULTATS.

Dans ce chapitre, seront exposés brièvement les points suivants :

1. Description des maladies physiologiques,
2. Caractéristiques essentielles des sols sensibles,
3. Les microsites d'activité de la microflore réductrice,
4. La sensibilité variétale,
5. La composition de la microflore réductrice,
6. Des résultats divers,
7. Ces résultats seront ensuite interprétés, et nous donnerons nos hypothèses concernant les causes du déclenchement de chacune des formes de ces maladies, ou sur celles d'une double intoxication.

2.1. Description des maladies physiologiques (et appréciations de l'intensité des dégâts)

2.1.1. Cycle du soufre

Sur le plan de l'appareil végétatif (parties aériennes), une intoxication par les sulfures se repère par un jaunissement, suivi d'une nécrose, de l'extrémité des feuilles les plus âgées. Ce jaunissement, dans les cas graves s'étend à l'ensemble des feuilles, qui se fânent et se dessèchent; la mort du plant atteint peut suivre en quelques jours.

Ces symptômes foliaires ne sont pas suffisamment spécifiques (d'autres maladies du riz se révèlent de la même façon) pour affirmer qu'il s'agit d'une intoxication par les sulfures. Mais un deuxième critère observable permet de les confirmer: la présence, autour des racines, d'une gaine noire, composée de débris racinaires, de mucilage, de bactéries, et qui tient sa couleur (noir d'encre) à la présence de quantités très importantes de sulfures ferreux (FeS). A certains stades, et dans les sols légèrement déficients en fer, une odeur de H_2S (oeufs pourris) est sensible au prélèvement. Dans ces cas, les sulfures, non précipités sous la forme de FeS sont restés sous forme ioniques (S^{2-} et HS^-) ou gazeuse (H_2S). Ce sont ces sulfures que l'on désigne sous le terme de "sulfures solubles", l'ensemble des sulfures solubles et du FeS constituant "les sulfures totaux".

Une autre forme de toxicité des sulfures se manifeste uniquement en début de cycle, et dans le cas d'un semis direct: certaines graines ne germent pas ou meurent en cours de germination; elles s'entourent également en quelques jours (2 à 4) d'une couche noire, similaire à la précédente.

2.1.2. Cycle du fer.

La symptomologie de la "toxicité ferreuse" est mieux connue et plus évidente: elle se traduit par un jaunissement, suivi d'un rougissement des feuilles.

2.1.3. Ensemble des deux cycles

Dans les deux cas, on peut constater les faits suivants:

- le tallage est fortement diminué,
- la croissance est ralentie, parfois arrêtée,
- la formation des épis se fait mal (nombreux épis vides) et, dans chaque atteinte grave, la mort de la plante peut survenir en 2 à 15 jours.

Ces attaques sont rarement réparties de façon homogène dans une parcelle, mais se caractérisent par des tâches plus ou moins étendues (de 1 à plusieurs dizaines de m²) correspondant aux zones les plus basses et les plus longtemps engorgées.

Les dégâts sont très variables, en fonction justement de l'intensité de l'intoxication:

- Une attaque par sulfures au moment de la germination peut provoquer de 60 à 100% de pertes au semis. Les rares plants survivants sont en très mauvais état (ex: Polo et Pont-Gendarme dans le Delta).
- Une attaque, par sulfures ou par fer ferreux, au moment du repiquage, peut provoquer la mort de 50% des plants. Les plus sévèrement touchés sont les plus petits ou ceux dont le système racinaire est peu volumineux, ou gravement endommagé.
- Une attaque au tallage, par l'une ou l'autre forme d'intoxication, provoque la mort de 10 à 60% des plants, et réduit de moitié le nombre de talles des plants survivants.
- Une attaque plus tardive (montaison-floraison, épiaison,) ne provoque que rarement la mort des plants, mais peut conduire à une récolte, en grains, diminuée de 75% environ, dans les cas les plus graves, voire 100% si la toxicité se prolonge.

- une attaque en fin de cycle (au delà de 100-110 jours , c'est à dire après maturation), provoque une chute des grains.

2.2. Caractéristiques essentielles des sols "sensibles" (et localisation géographique de ces sols).

2.2.1. Cycle du soufre

Les sols les plus sensibles se rencontrent essentiellement dans deux zones géographiques: (1) le Delta du Fleuve Sénégal, de St-Louis à Richard-Toll, et particulièrement dans certains grands casiers de la SAED, que ceux-ci soient relativement anciens (Savoigne, par exemple) ou plus récents (Tilène, Pont-Gendarme, Polo, N'Diaye-N'Dellé, etc...) (2) en Casamance, de la Mer à Kolda, et essentiellement en bordure de marigots et dans les rizières de mangrove.

Tous ces sols sont en général caractérisés par :

-une origine commune fluvio-marine (alluvions du Delta, sols de mangrove), ce qui leur confère trois caractéristiques défavorables: une teneur en soufre total élevée (de 1 à 3% en S), en majeure partie sous forme de sulfates, un pH acide (de pH 4,5 à 6), une granulométrie défavorable (teneurs en argiles souvent supérieures à 60%).

Chacun des facteurs précités (teneur en S élevé, pH bas et forte teneur en argile) est un caractère aggravant. De plus, ces sols sont souvent plus au moins salés, et ont tendance à être asphyxiants: sous eau, le potentiel redox chute très rapidement.

Nous n'avons pas trouvé, lors des prospections, de sols très sensibles, ni dans la moyenne vallée du Fleuve Sénégal, ni dans le Sine-Saloum.

2.2.2. Cycle du fer.

De même, en général, les sols sensibles à la toxicité ferreuse ont souvent une origine alluviale. Mais, contrairement à ceux sensibles à l'intoxication par les sulfures, ce ne sont pas toujours les plus argileux qui sont les plus sensibles. En effet, il semble même qu'un apport, plus ou moins important de matériaux sableux lessivés augmente les risques. Deux autres facteurs ont tendance à stimuler le processus de réduction de fer: la mise en culture ancienne (épuisement progres-

sif du sol) et une teneur élevée en matière organique (la toxicité peut se manifester dès que cette teneur dépasse 0,7%, et se déclenche obligatoirement au delà de 3,5%).

Bien entendu, pour ce processus, la teneur en fer total a une grande importance: le processus est inévitable quand la teneur en fer réduit (Fe^{++}) dépasse 175 p.p.m dans la solution du sol.

Le pH des sols sensibles se situe aux environs de 4,7, mais peut varier de 3,6 à 7,6: les sols les plus sensibles à l'intoxication ferreuse sont, aussi, des sols légèrement à fortement acides.

Enfin, une teneur faible en K^+ ($\leq 0,3$ m.e.q. K^+ /100 g de sol) augmente le risque et l'intensité de ce processus.

L'ensemble de ces facteurs défavorables ne se rencontre pas dans le Delta du Fleuve, mais situe la zone à risque en Basse-Casamance. La campagne 1984 servira à préciser ces résultats.

2.2.3. Ensemble des deux cycles

Une certaine similitude entre les sols sensibles aux sulfures et ceux sensibles au fer ferreux fait qu'il existe en Casamance (à Djibélor, en fonction de la situation des parcelles sur une séquence topographique) des sols sensibles, simultanément, aux deux processus, sans pour autant qu'ils soient toujours simultanés.

2.3. Microsites d'activités de la microflore réductrice

Nous avons vu que les microsites d'activité des bactéries réductrices du cycle du soufre et du fer ne peuvent être que des microsites dans lesquels l'oxygène ne parvient pas, ou les teneurs instantanées diminuent.

2.3.1. Cycle du soufre

La réduction des sulfates (sulfato-réduction) ou du soufre élémentaire (sulfo-réduction) n'a de conséquence tragiques pour la plante que quand les sulfures qui en résultent s'accumulent au voisinage immédiat des parties souterraines: ceci est le cas pour la spermosphère (mais la germination du riz, et l'émergence de la plantule à la surface du sol, sont généralement terminés en moins de 15 jours après le semis); la rhizosphère, elle reste "sensible" du début à la fin du cycle cultural; mais elle l'est

plus particulièrement au tallage, et à la floraison-épiaison.

Les deux autres sites d'activité des bactéries productrices de sulfures sont l'interface sol-eau (mais en général, cette interface ne devient suffisamment réductrice qu'après 2 mois de culture), et le sol "profond", plus particulièrement au voisinage des débris organiques en décomposition.

Les sulfures produits dans ces deux microsites peuvent difficilement "migrier" (et uniquement s'ils restent sous une forme solubilisée), jusqu'au voisinage des racines, mais la présence de ces deux microsites réduits constitue un "réservoir" de bactéries sulfato-réductrices, dont certaines, les formes "vibrio" sont mobiles.

2.3.2. Cycle du fer.

La réduction du fer ferrique en fer ferreux peut se faire dans l'ensemble du sol, mais n'a de conséquence grave que si elle se fait au voisinage immédiat des racines (rhizosphère) et tout particulièrement à la surface même de la racine (rhizoplan).

2.3.3. Ensemble des deux cycles

En prenant l'exemple du système racinaire, nous expliquerons ultérieurement par quels mécanismes la rhizosphère, équilibrée, d'une plante saine, se transforme progressivement en une rhizosphère "anaérobie et réductrice" où les bactéries sulfato-réductrices et réductrices de fer contribuent, chacune à leur façon, à éliminer l'oxygène résiduel.

2.4. Sensibilité variétale, et doses toxiques; stades dangereux.

2.4.1. Cycle du soufre

Toutes les variétés de riz ne sont pas sensibles de la même façon aux sulfures. Nous verrons plus tard, que cela est lié à deux facteurs biotiques: d'une part la nature et l'abondance des exsudats carbonés: tous les réducteurs de sulfate ont besoin de substrats carbonés à courte chaîne; d'autre part, aux quantités, variables suivant le cultivar, d'oxygène libéré par les racines.

Parmi les moins sensibles, il faut citer le riz Morobérékan; les variétés IR, dont IR8, sont moyennement sensibles; les variétés d'origine Chinoise, comme I-Kong-Pao, sont en général les plus sensibles.

De manière générale, les variétés sélectionnées, à forts rendements, et les mieux adaptées à la culture industrielle (variétés utilisées principalement par la SAED) sont bien plus sensibles aux sulfures que les variétés "paysannes", peut être mieux adaptées, par des générations de riziculteurs locaux, aux sols particuliers de Basse-Casamance.

L'exsudation carbonée est très forte, et la libération d'oxygène par la graine, nulle, pendant la germination: ce stade est donc celui pendant lequel le riz est le plus vulnérable. Pour le riz IR8, que nous avons pris comme référence, la germination est retardée quand la teneur en sulfures totaux dépasse 1ppm (1×10^{-6} g) de $S^{=}$ et définitivement compromise à 3 ou 4 p.p.m.

Au tallage, pour cette même variété, la croissance du plant est arrêtée à 7 ou 8 ppm, et la plante meurt quand les teneurs, dans la rhizosphère proche, dépassent 12ppm.

A la floraison-épiaison, le remplissage des graines s'arrête à 20ppm environ et le plant meurt au delà de 40ppm.

Nous pouvons donc affirmer que le plant de riz est d'autant plus sensible qu'il est plus jeune.

2.4.2. Cycle du fer

Il n'existe pas de toxicité ferreuse constatée pendant la germination. Par contre, cette toxicité est également très dangereuse en début de cycle, particulièrement dans les deux semaines qui suivent le repiquage; elle se manifeste également au tallage, et à l'épiaison.

Dans les parties aériennes (feuilles) des plants de riz atteints, la teneur en fer total atteint et dépasse 300ppm de Fe^{++} . Ce fer, transporté à travers la tige, depuis les racines atteintes, se concentre dans les feuilles, provoquant les symptômes définis précédemment.

Il existe aussi une sensibilité variétale (et pour les mêmes raisons que pour la sulfatoréduction, qui fait que dans certains cas l'intoxication est grave dès que la teneur en Fe^{++} , au niveau de la rhizosphère, dépasse 55ppm, alors que pour d'autres variétés, ou dans un sol différent, la toxicité n'apparaît qu'au delà de 175ppm (ces chiffres représentent une concentration de Fe^{++} dans la solution du sol). Le riz IR8 est moyennement sensible, mais le riz de référence choisi est le riz IR26.

2.4.3. Ensemble des deux cycles.

Dans le cas d'une double intoxication, les seuils précédents sont bien entendus abaissés, les effets simultanés des ions sulfures, qui eux s'accumulent dans la rhizosphère (mais ne pénètrent dans le système racinaire que "post-mortem") et des ions Fe^{++} , qui passent progressivement dans la racine puis l'ensemble de la plante, seraient cumulatifs.

2.5. La composition de la microflore réductrice

2.5.1. Cycle du soufre

La microflore du cycle du soufre dans le biotope "rizière" est une des plus riches, tant en nombre d'espèces bactériennes, qu'en nombre total de bactéries par gramme de sol, parmi les champs cultivés dans le monde. Ceci s'explique en partie par les faits suivants: (1) milieu favorable du fait d'une température moyenne de 28-32°C (en hivernage), (2) milieu riche en matière organique et en exsudats, (3) milieu à la fois aérobie (en début de cycle) puis progressivement anaérobie, (4) milieu éclairé en surface (favorisant les bactéries photosynthétiques du cycle du soufre), (5) milieu fermé, permettant la création de "cycles: produits réduits-produits oxydés".

Cette microflore du cycle du soufre comporte à la fois des espèces réductrices et des espèces oxydantes.

Les principaux réducteurs sont au nombre de 2 groupes:

- les sulfato-réducteurs (c'est-à-dire les réducteurs de sulfates pour qui existe un "effet" rhizosphérique),
- les sulfo-réducteurs (c'est-à-dire les réducteurs de soufre élémentaire) dont le rôle est mineur, car ils n'ont pas la rhizosphère comme microbiotope préférentiel.

Les principaux oxydants sont au nombre de 3:

- les thiobacilles, parmi lesquels un groupe (Th. denitrificans) est anaérobie tolérant;
- les bactéries sulfureuses photosynthétiques, du genre Chromatium ou Chlorobium;
- une bactérie filamenteuse incolore: Beggiatoa;

L'ensemble de ces groupes a été étudié au Sénégal. Toutes ces bactéries existent, mais leur rôle relatif est très variable.

Le résultat principal est que les teneurs en sulfures, mesurées à un instant donné, sont les résultantes d'activités microbiennes antagonistes entre populations "sulfato-réductrices" (B.S.R.) et une population bien spécifique de "sulfo-oxydants", celle de Thiobacillus denitrificans (B.S.O.): nous avons mis en évidence une formule de la forme:

$$[S^-] = f \left(\log_{10} \frac{B.S.R.}{B.S.O.} \right)$$

où $[S^-]$ est la concentration en sulfures totaux, exprimée en ppm. S^- ,

B.S.R = le nombre de bactéries sulfatoréductrices exprimée en puissance de 10/gramme de sol,

B.S.O = le nombre, dans le même échantillon, de Thiobacillus denitrificans, exprimé également en puissance de 10/g.

Sur le plan pratique, ce rapport $\log_{10} \frac{BSR}{BSO}$ peut être connu en quelques jours, et on peut affirmer avec certitude que la plante souffre quand ce rapport est > 1 , et meurt quand ce rapport est > 100 . Autrement dit, la mort du riz intoxiqué par les sulfures est provoquée par un déséquilibre dans la rhizosphère qui fait que le nombre de bactéries sulfatoréductrices devient 100 fois plus élevé que celui de T. denitrificans, le seul Thiobacille capable de réoxyder les sulfures en anaérobiose.

Les autres antagonistes des sulfatoréducteurs (bactéries photosynthétiques ou filamenteuses) existent dans les rizières sénégalaises, mais leur nombre reste très bas ($\leq 10^2$ bact/g) sans doute parce que les conditions climatiques, la forte luminosité en particulier, le dessèchement de la surface du sol entre deux cultures du riz, également, ne leur sont pas favorables.

Les autres thiobacilles existent, mais leur rôle semble limité aux biotopes aérés, ce qui n'est pas le cas de la rhizosphère quand elle devient réductrice: ces bactéries, dans ce cas, ne peuvent pas réoxyder les sulfures.

Les sulfo-réducteurs, bien qu'à un niveau élevé ($\leq 10^{10}$ bact/g) ne sont pas la cause principale de l'accumulation des sulfures. Il nous restait donc à étudier en priorité l'ensemble des bactéries sulfato-réductrices.

Cette microflore est infiniment complexe, et fort mal connue. Au moment où commençait notre recherche, deux groupes étaient connus: les Desulfovibrio (formes non sporulées et mobiles) et les Desulfotomaculum (formes sporulantes, peu mobiles) et il était

classiquement accepté que toutes ces souches utilisaient, comme substrat carboné, le lactate.

En fait, au Sénégal, des formes appartenant à ces deux groupes ont été mises en évidence, mais elles n'appartiennent pas aux espèces habituellement décrites ailleurs:

il existe à la fois des vibrios (4 à 5 espèces) dont les microhabitats préférentiels sont la rhizosphère (où leur nombre et leur activité est principalement régie par les exsudats) et l'eau de submersion, et des formes sporulées très variables, à qui tous les biotopes sont favorables, et qui présentent une particularité remarquable, celle de sporuler à température ambiante, dès que les conditions de milieu leur sont défavorables.

Par ailleurs, dans ce dernier groupe, existent des formes (souche "N") capables d'utiliser les métabolites qui résultent de la décomposition de la matière organique, dont les acides gras, jusqu'en C16: palmitate! d'autres formes ("A7 et a7") qui utilisent l'acétate produit par d'autres sulfatoréducteurs et une forme "3T" qui est peut-être une BSR facultative.

Ceci a eu trois conséquences :

(1) une conséquence technique: nous avons dû adapter nos milieux en y introduisant différentes sources de carbone.

Notre choix final, expliqué au chapitre I a consisté à dénombrer les bactéries sulfato-réductrices capables d'utiliser les exsudats (milieu au lactate), l'acétate (en provenance des exsudats, mais aussi de la décomposition de la matière organique et du métabolisme du groupe précédent) ou les composés plus compliqués, qui ne peuvent provenir que de la matière organique en fin de décomposition (le palmitate);

(2) une conséquence scientifique: dans tous les cas, et quelque soit le microsite, la sulfatoréduction est possible: il y aura toujours, parmi l'ensemble des souches précédentes une, au minimum, pour initier le processus, soit à partir de la matière organique, soit à partir des exsudats, et une deuxième série de BSR qui utilisera l'acétate en provenance du métabolisme des groupes "pionniers";

(3) une conséquence pratique: si les formes "vibrio" (non sporulantes) résistent mal à la sécheresse, parce qu'elles n'ont pas de forme connue de résistance, la sulfatoréduction recommence à chaque cycle végétatif à partir des formes sporulantes, dont

la germination des spores peut se faire dès l'arrivée de l'eau dans les sols.

L'étude des relations entre ces différentes formes de bactéries sulfato-réductrices a été commencée, en suivant deux voies de recherche: (1) définir, dans chaque microsite, et en fonction de la source de carbone qui y est disponible, la (ou les) espèce(s) majoritaire(s). L'interprétation des résultats de la campagne 1983, qui nécessite un gros travail de statistique, est en cours, (2) à partir de chaque souche purifiée, comparer les relations de croissance de chacune d'elles pour expliquer comment et pourquoi elle peut devenir majoritaire; ce qui permettrait de connaître celle(s) d'entre elle(s) qui serai(en)t la (les) plus dangereuse(s) pour la plante.

2.5.2. Cycle du Fer

Comme nous l'avons déjà dit, il n'existe pas un groupe morphologique homogène de ferro-réducteurs. Par contre, d'entre elles, l'étude en cours a permis de repérer les principaux groupes, dans les sols de rizière, et surtout, là où ils sont les plus actifs, sur le rhizoplan:

1. Les Enterobactéries (anaérobies facultatives) dont on a identifié les espèces E. cloacae, et E. aerogenes. A ces deux espèces, il faut ajouter 3 types d'Entérobactéries (non décrites à ce jour) qui sont les réducteurs de fer ferrique les plus nombreux et les plus efficaces. Ce groupe des entérobactéries a également la particularité de posséder une fonction dénitrifiante.
2. Les Bacillus: 3 bacilles ont été identifiés: B. polymyxa, B. marcerans et B. subtilis. L'ensemble de ces trois populations représentent une faible part des réducteurs de fer ferrique, mais à un niveau relativement stable. Ces Bacillus sont aussi anaérobies facultatifs.
3. Un Desulfotomaculum: c'est une des "nouvelles" bactéries sulfatoréductrices dont nous avons parlé au paragraphe 2.5.1. Ce batonnet, désigné provisoirement sous le vocable "3T", qui serait un sulfato-réducteur vrai, mais inconnu en dehors du Sénégal, réduit aussi le fer ferrique. Ceci est une preuve supplémentaire que les cycles du fer et du soufre sont liés étroitement. Le rôle de la bactérie "3T" est important en début du cycle, ce qui confirme que les premiers "sulfatoréducteurs" à reprendre leur activité en début de culture, et ceci en utilisant, d'abord et

essentiellement les exsudats racinaires, sont des formes sporulées, anaérobies strictes.

4. Les Clostridies: plusieurs espèces ont été trouvées, mais leur identification présente un intérêt mineur, car leur nombre, si on le compare aux autres réducteurs de fer, est très faible, même dans des conditions très réductrices où seraient, en théorie favorisées les Clostridies (anaérobies strictes).

5. Les Pseudomonas, en particulier P. Aeruginosa, connu pour être un des réducteurs anaérobies facultatifs de fer des plus efficaces; il apparaît cependant que la plupart des souches isolées à partir des sols du SÉNÉGAL ne possèdent pas d'activité réductrice de fer notable. Ceci est très curieux.

6. Les Aeromonas, parmi lesquels on a identifié A. Hydrophila, qui serait très efficace, mais dont le rôle au SÉNÉGAL doit être mineur, car il est très rare. C'est également une bactérie anaérobie facultative.

Comme nous l'avons signalé pour les bactéries sulfato-réductrices:

- l'éventail des souches identifiées (ou nouvelles) est tellement étendu qu'il existe toujours au moins une, deux ou plusieurs espèces actives quelles que soient les conditions du milieu "rhizosphère", à partir du moment où s'installe l'anaérobiose (même facultative dans ce cas).

- un certain nombre de souches ne sont pas connues (et restent donc à décrire lors d'une recherche ultérieure, à mener en Europe) et ont des comportements différents de ceux habituellement décrits dans la littérature. Le biotope "rizière inondée" du SÉNÉGAL (et à la fois dans le Delta et en Casamance) est donc particulier, et un important travail de systématique bactérienne reste à accomplir.

M. PRADE n'a pas mis en évidence d'antagonistes naturels de ces réducteurs de fer.

2.6. Résultats divers

2.6.1. Cycle du soufre

Des essais avec des engrais soufrés, en particulier avec l'urée enrobée de soufre ("Sulfur Coated Urea") montrent que ces engrais, tout comme les sulfates, augmentent les risques de toxicité.

Une trop forte activité sulfo-oxydante, particulièrement en aérobiose (cas des sols dessalés en présence de quantités insuffisantes d'eau, douce ou saumâtre) provoque, en quelques mois, un abaissement du pH du sol, à un niveau bas ($\text{pH} \approx 3$) qui le rend définitivement impropre à la riziculture.

Les sulfures ont, à faible dose (quelques ppm de S^{2-}) des effets bénéfiques:

- d'une part parce qu'ils limitent les populations de nématodes phytoparasites du riz; une technique de lutte biologique, utilisant cette propriété, a été testée avec succès en Côte d'Ivoire. Il ne semble pas souhaitable de l'appliquer au Sénégal.
- d'autre part, parce qu'ils provoquent, toujours aux mêmes doses faibles, un accroissement du système racinaire, et, enfin, parce que certains sulfato-réducteurs sont aussi des fixateurs d'azote (mais peu efficaces).

Nous avons vérifié, en 1983, que les rizières, mêmes sensibles à la sulfatoréduction peuvent, sans risque, être amendées en engrais vert (Sesbania rostrata ou Azolla). Ces engrais verts, qui se décomposent assez loin des racines, n'augmentent pas la mortalité; tout au plus, la présence de tel ou tel engrais vert sélectionne tel ou tel type de BSR au détriment des autres.

2.6.2. Cycle du fer

Une voie de recherche originale est actuellement testée par M. PRADE: elle consiste à émettre l'hypothèse que le plant de riz est d'autant plus sensible à la toxicité ferreuse qu'il est carencé en certains éléments majeurs: P, K, Mg et Ca. Si cette hypothèse est confirmée par la campagne de terrain 1984, comme elle l'a été par la campagne (expériences en microparcelles) de 1983, une des techniques de lutte majeure contre la toxicité ferrique sera l'emploi judicieux d'engrais minéraux équilibrés.

La décomposition de la matière organique dans les sols de rizières favorise toutes les bactéries réductrices de fer. L'emploi d'engrais organiques (engrais verts et composts) est donc, à priori, à déconseiller.

L'équipe du Professeur OTTOW essaie de démontrer que le plant de riz possède un mécanisme de régulation de l'entrée des ions Fe^{++} au niveau des racines. Nos travaux permettent d'appuyer une telle hypothèse, mais n'en apporte pas de preuve.

2.6.3. Ensemble des deux cycles

Pour ces deux cycles, il faut tenir compte des facteurs agronomiques: nous avons vu des exemples (emploi de certains engrais ou amendements); le principal paramètre à maîtriser reste la conduite et la maîtrise de l'eau: il est souhaitable dans les cas graves, de procéder à l'installation d'un système de drainage suffisant, et de rectifier la topographie des parcelles. Quand un champ est particulièrement sensible à l'une ou l'autre forme de toxicité, nous conseillons également de le morceler en parcelles plus petites, mais plus homogènes.

7. Interprétation des résultats et hypothèses sur les causes du déclenchement de ces maladies physiologiques.

L'interprétation finale ne saurait être donnée avant la fin des expérimentations de terrain, et surtout, avant que ne soient mieux connues les souches bactériennes les plus actives.

Cependant, au schéma 1 (mécanisme de l'intoxication du riz par les sulfures, directe et en relation avec l'ion ferreux), nous expliquons succinctement les relations existantes entre la microflore, la plante, les engrais, la matière organique, les différents composés du cycle du soufre pour expliquer (bas de page, à gauche), les causes des effets toxiques, et au schéma 2, (théorie de la double intoxication par ions $S^{=}$ et Fe^{++}), la succession des processus physico-chimiques et microbiens conduisant à la mort de la plante. Les schémas 3 et 4 comparent ce qu'il advient dans le cas où la toxicité des ions $S^{=}$ et Fe^{++} est "autorégulée" (schéma 3), ce qui conduit à la survie de la plante ou, au contraire, ce qu'il advient quand la plante ne peut plus se défendre (schéma 4, aggravation des processus toxiques).

La compréhension de ces schémas sera facilitée par l'exposé du chapitre 3: "Les bases scientifiques de la lutte contre les toxicités des sulfures et du fer ferreux."

CHAPITRE 3. LA LUTTE CONTRE LES MALADIES PHYSIOLOGIQUES

3.1. Les bases scientifiques de la lutte contre les toxicités des sulfures et du fer ferreux.

Le déséquilibre des deux cycles dans le sens d'une réduction excessive est liée aux variations de différents facteurs écologiques: l'eau, le sol, les pratiques culturales, dont l'emploi des engrais, la plante et la microflore. Nous passerons en revue l'influence de chacun de ces facteurs sur les processus et surtout, les moyens à mettre en oeuvre pour les modifier pour protéger la plante.

3.1.1. L'eau (et l'oxygène dissous)

L'excès d'eau, et l'engorgement qui en résulte, reste la cause principale de la création d'une zone très anaérobie au contact des racines. Il faut, de ce fait, éviter, à chaque stade dangereux du cycle végétatif, une baisse importante du potentiel redox (Rh) qui favorise la multiplication des bactéries anaérobies facultatives (la plupart des réducteurs de fer) et anaérobies strictes (autres réducteurs de fer, sulfo-et sulfato-réducteurs).

Il faut donc apporter un soin extrême à l'établissement du régime hydrique de la parcelle.

Trois principes généraux sont à appliquer:

- (1) économiser l'eau, c'est dire réduire les apports extérieurs au minimum suffisant pour le riz;
- (2) éviter tout excès à la germination, au repiquage, au tallage, à la floraison, et même en fin de cycle (maturation);
- (3) utiliser au maximum une eau aérée: les eaux de pluies sont bien aérées, surtout quand la pluie est battante; les eaux brassées par une pompe contiennent plus d'oxygène que les eaux stagnantes.

3.1.2. Le sol

Le sol lui-même intervient dans l'intensité des processus réducteurs, de deux façons:

- ses caractéristiques physico-chimiques que l'on peut mesurer avant la mise en culture.

-ses caractéristiques physico-chimiques "instantanées" c'est à dire, celles qui peuvent varier, de façon plus ou moins grande, du début à la fin d'un cycle cultural (Rh, aération, pH, solubilité des ions etc...); voir l'article de LOYER JACQ et REYNAUD (1982).

L'utilisateur manque de moyens pour modifier de façon significative les caractéristiques "pédologiques" permanentes, et devra se contenter d'empêcher leur évolution dans le sens défavorable; il possède par contre, des techniques (pratiques culturales) permettant de contrôler en partie les caractéristiques variables.

3.1.2.1. Parmi les caractéristiques permanentes, il faut citer :

(1) la granulométrie: les sols les plus argileux (argile >60%) sont les plus propices à l'installation rapide de conditions très anaérobies. Ce sont toujours ceux les plus favorables à la réduction du sulfate, et, souvent, du fer ferrique.

La granulométrie d'un sol est difficilement modifiable, sans amendements minéraux (apport de coquillages par exemple) ou d'amendements organiques (matière organique "fraîche"). En fait, quand c'est possible, toute pratique culturale qui augmente la porosité du sol, donc sa structure, permet de diminuer l'intensité des processus réducteurs.

Les horizons pédologiques d'une rizière étant souvent différents, il faudra éviter au maximum l'engorgement dans les parcelles dans lesquelles existe, à faible profondeur, une couche très argileuse et imperméable.

(2) le pH: Les processus de sulfatoréduction et d'accumulation d'ions ferreux, ont généralement plus intenses dans les sols acides. Dans tous les sols où l'acidité est trop importante (pH 3,5 à 4,5), il est judicieux de remonter ce pH à des niveaux plus élevés, par l'emploi soit de chaux, qui présente aussi l'avantage d'augmenter la teneur en calcium du sol, soit de phosphates (effet tampon des phosphates) soit de gypse, bien que ce dernier augmente les teneurs en sulfates.

(3) la salinité (NaCl): une salinité élevée est toujours défavorable à la croissance du riz (surtout en début du cycle). Elle ne semble pas, dans l'état actuel de nos études, avoir d'effet direct sur les processus de réduction de fer. Par contre, des teneurs élevées en NaCl favorisent les bactéries sulfatoréductrices, généralement bien adaptées aux sols salés (sols de mangrove et certains sols sulfatés acides). Il faut donc surveiller avec plus d'attention les parcelles salées, ou susceptibles de se saliniser progressivement par l'emploi, pour l'irrigation, d'eaux saumâtres. Dans tous les cas, il doit être conseillé, dans les parcelles "sensibles", un dessalement progressif par drainage.

(4) les teneurs en sulfates (et en soufre élémentaire): les risques de sulfatoréduction augmentent, naturellement, avec les teneurs du sol en sulfates solubles: ceci explique que les sols sulfatés acides soient, potentiellement les plus sensibles. Au Sénégal, cependant, dans les zones étudiées (Delta du Fleuve, Basse-Casamance) les teneurs en sulfate sont suffisantes pour induire, (les autres conditions étant défavorables) une intense sulfato-réduction.

(5) les teneurs en fer ferrique: de même, une teneur élevée en fer ferrique (rappelons qu'en début de culture, avant la mise en eau, le fer est essentiellement sous cette forme) est un facteur a priori défavorable à la survie du riz à la toxicité ferreuse.

(6) les teneurs en ions majeurs (P, K, Ca, Mg, etc...): nous avons déjà cité l'effet favorable de ces cations sur la vigueur des plants de riz et leur résistance à la toxicité ferreuse. En principe, une plante non carencée est dans un meilleur état physiologique, ce qui lui permet de mieux résister aux ions $S^{=}$ et Fe^{++} . Cet aspect de l'étude sera explicitée quand nous exposerons les méthodes à appliquer en utilisant l'emploi des engrais minéraux.

NB. Bien entendu, les résultats exposés aux paragraphes 3,4, et 5 sous-entendent qu'il faut, non seulement tenir compte des teneurs du sol en NaCl, $SO_4^{=}$, So et Fe^{+++} , mais aussi des apports possibles de ces éléments par les eaux d'irrigation. Pour toutes les parcelles sensibles à l'une ou l'autre forme d'intoxication, il apparaît utile de vérifier si la composition chimique de l'eau ne contribue pas à augmenter progressivement les teneurs de ces éléments.

3.1.2.2. Parmi les caractéristiques "instantanées" du sol, il faut citer:

(1) l'aération du sol (dont la meilleure mesure physique est celle du Rh, potentiel d'oxydo-réduction).

Nous en avons déjà parlé dans le paragraphe sur l'excès d'eau: un sol bien aéré ne peut être propice aux processus anaérobies. Maintenir un sol de rizière relativement aéré (donc oxygéné) est difficile; cependant:

- un labour profond en début de cycle est toujours favorable;
- le potentiel redox élevé, en début de culture peut être maintenu par addition de nitrates: les processus anaérobies ne commencent qu'après disparition des nitrates du sol;
- tout "à-sec" en cours de cycle réoxygène les horizons superficiels de la rizière;
- il existe des variétés de riz qui libèrent plus d'oxygène au niveau des racines.

(2) l'évolution progressive du pH de la solution du sol; de nombreux chercheurs ont constaté (et nous-mêmes l'avons mis en évidence dans certains casiers de la SAED) que le pH de la solution d'une rizière acide a tendance à se tamponner progressivement lors de la culture; la remontée du pH pouvant atteindre 1 à 2 unités. Cette évolution, favorable à la plante, ne peut être accentuée que par l'addition, en cours de cycle, d'engrais minéraux alcalinisants (les phosphates et l'urée).

(3) enfin, il faut tenir compte, également, des teneurs en certains éléments solubles (NaCl, sulfates, fer ferrique) dans la solution du sol.

Ces éléments, présents en début de culture ou apportés par les engrais, les eaux d'irrigation, se diluent progressivement quand le volume d'eau retenu par le sol augmente. Mais leur solubilisation peut augmenter aussi! Ceci ne semble pas avoir d'effet globalement positif car, nous l'avons montré, les éléments indésirables (sulfures et ions Fe^{++}), s'accumulent au niveau des racines.

3.1.3. Les pratiques culturales

Les observations faites tant pendant les tournées que pendant les essais en microparcelles, permettent d'affirmer:

que des sols, similaires sur le plan physico-chimiques, (ou que, sur le même sol, mais dans des conditions différentes,) ne représentent pas le même risque potentiel.

Ceci vient du fait que parmi les facteurs qui aggravent ou atténuent l'intensité des processus toxiques, interviennent:

- les systèmes d'aménagement;
- les engrais minéraux
- les apports organiques.

(1) Les systèmes d'aménagement. Pour toutes les raisons exposées ci-dessus, les rizières les plus aptes à résister aux maladies physiologiques sont a priori celles où le contrôle de l'eau est le meilleur. Ce sont aussi, en général, celles qui sont les mieux entretenues. Nous pouvons en donner quelques exemples:

- une rizière bien planée (ce qui est d'autant plus facile à réaliser que la surface "d'un seul tenant" est réduite) ne présente pas de zones plus basses, dans lesquelles l'eau stagne plus longtemps, et qui sont toujours les plus sévèrement atteintes par les attaques des sulfures et du fer ferreux;
- une rizière cultivée en billons est moins attaquée que la rizière voisine planée;
- quand une rizière est bien désherbée, il s'accumule, à l'interface sol-eau, une quantité moindre de matière organique fraîche. Or, celle-ci, se décomposant en anaérobiose, constitue une mince couche favorable au développement des bactéries sulfatoréductrices à partir des substrats carbonés en résultant;
- une intense sulfatoréduction se produit, dans l'ensemble des horizons superficiels du sol, si la maturation du riz se fait dans une parcelle encore trop inondée: la mise à sec en fin de cycle doit être faite le plus tôt possible.

(2) l'emploi des engrais minéraux. Deux politiques d'utilisation des engrais sont à préconiser simultanément:

- (A): Eviter tout engrais aux effets défavorables,
- (B): Utiliser, au contraire, tout autre engrais qui favorise une croissance équilibrée de la plante.

(A) Les engrais à proscrire.

Dans les sols sensibles à la sulfato-réduction, il faut éviter tout engrais contenant des sulfates (comme le sulfate d'ammoniaque)

y compris les engrais composés qui en contiendraient plus de 10% en poids, et du soufre élémentaire (cas de l'urée enrobée de soufre = "Sulfur Coated Urea"); dans les sols sensibles à la toxicité ferreuse, de même il faut proscrire les engrais contenant du fer ferrique.

(B) Les engrais à conseiller: dans ce cas, il faut considérer deux types d'engrais minéraux:

(1) les engrais azotés. Nos essais ont montré que ces engrais (et en particulier l'urée) n'ont pas d'effet significatif sur l'une ou l'autre forme de toxicité. Il est cependant souhaitable, dans tous les sols sensibles, d'apporter des engrais azotés (mais non sulfatés) à une dose minimale de 40 à 120 kg/ha pour permettre un développement normal du riz: rappelons qu'un riz vigoureux (et en particulier, possédant un système racinaire important) résiste mieux aux maladies physiologiques.

Dans les rizières sensibles à la toxicité ferreuse, et pour des raisons que nous étudierons plus loin, l'apport d'azote doit se faire de préférence sous forme minérale que sous la forme organique (engrais vert).

Enfin, nous l'avons déjà cité, la forme "nitrate" présente, sur la forme "ammonium" l'avantage de maintenir un potentiel redox du sol plus élevé.

(2) les engrais non azotés. Leur apport dans une rizière sensible à la toxicité ferreuse est d'une importance capitale: en effet, une nutrition équilibrée en P, K, Ca et Mg, permet d'atténuer les processus d'intoxication par le fer ferreux, vraisemblablement en modifiant les exsudats (résultat à confirmer). Ces engrais, par contre, n'ont aucun effet direct sur la résistance du riz aux sulfures.

(3) l'emploi des amendements organiques et des engrais verts. Concernant la sulfatoréduction, il ne semble pas y avoir d'interdit à l'utilisation des composts (d'origine fermentaire) ni à celle des engrais verts utilisables en rizières, que sont Sesbania rostrata ou Azolla. Par contre, jusqu'à plus ample information, ces engrais sont à proscrire dans les sols à toxicité ferreuse.

3.1.4. Le choix des variétés

Le repérage des variétés les plus sensibles n'est pas terminé. Seules des indications sont connues. Les sensibilités particulières de certains cultivars (en particulier les riz "IR")

permettent déjà de suggérer que de telles variétés doivent être évitées dans les zones à risques.

3.1.5. La lutte biologique

Elle ne peut être envisagée, actuellement, que pour la limitation de la sulfatoréduction, car il me semble pas exister de bactéries antagonistes des réducteurs de fer actives.

Le maintien de conditions aérobies ou modérément anaérobies favorise la réoxydation des sulfures par les thiobacilles. Par contre, nous n'avons pas trouvé, au Sénégal, de sites favorables à l'activité des autres oxydants des sulfures (Beggiatoa, et bactéries photosynthétiques).

La sulfatoréduction spermosphérique est diminuée quand on enrobe les graines, lors d'une prégermination, par des cyanobactéries: celles-ci, pendant la germination, produisent d'une part des auxines qui accélèrent cette germination, permettant à la jeune plantule d'émerger plus rapidement, et enfin de l'oxygène, qui oxyde la spermosphère.

3.2. L'aspect économique de la lutte contre les intoxications par sulfures et fer ferreux.

Dans le paragraphe précédent, nous avons fait l'inventaire exhaustif des possibilités d'intervention, définies en fonction des paramètres à modifier. Il devrait apparaître évident que toutes ces techniques ne sont pas faciles à appliquer et que, sur le plan économique, elles ont chacune un coût, en numéraire ou en heures de travail supplémentaires, différent. La stratégie à appliquer, cas par cas, consiste donc à utiliser en priorité, des techniques qui ne coûtent rien, celles mettant l'accent sur un contrôle du régime hydrique de la parcelle.

3.2.1. Contrôle du régime hydrique

A priori, aucune technique de lutte ne saurait être totalement efficace si les bactéries réductrices continuent à être favorisées par la présence de zones de sol fortement réduites au niveau des racines. Ces zones réduites sont provoquée essentiellement par un excès d'eau: l'engorgement progressif peut être dû à la remontée des nappes de profondeur, mais, le plus souvent, il est essentiellement une conséquence directe de l'accumulation, à la surface du sol, de trop grandes quantités d'eau de surface.

Au Sénégal, le contrôle des niveaux d'eaux dans les rizières ne peut être que partiel, d'une part, parce qu'une partie importante (et de plus en plus, du nord, le Delta, au sud, la Casamance) de l'eau utile est d'origine pluviale, et d'autre part, parce que la plupart des casiers sont conçus sans système de drainage, et que les apports d'eau d'irrigation se font un peu trop empiriquement.

En première approximation, il existe deux cas extrêmes: (1) celui des casiers de grande surface (≥ 1 ha) des périmètres irrigués; c'est le cas des casiers de la SAED, dans le Delta, et celui des grandes stations expérimentales. Ces casiers se caractérisent par une maîtrise relative des apports d'eau, (par pompage ou par gravité) et parfois, par une possibilité d'hexaure. (2) celui des parcelles paysannes, en particulier, les parcelles villageoises de Basse-Casamance sur lesquelles le contrôle de l'eau ne peut être qu'approximatif.

Pour les grands casiers, l'efficacité du contrôle de l'eau est fonction du système d'aménagement, et d'une certaine discipline des responsables de l'irrigation.

Le contrôle des niveaux d'eau exige des parcelles, petites, mais parfaitement planées: ceci évite la création de zones basses, qui sont engorgées plus longtemps, et où nos prospections ont montré qu'elles sont des zones de sols réduites en permanence.

Sur les casiers correctement aménagés, les niveaux d'eaux sont en grande partie réglables... ce qui sous-entend une économie judicieuse des eaux apportées. Il faut impérativement limiter les apports massifs d'eau aux stades végétatifs suivants: semis (ou repiquage), tallage et floraison-épiaison. Nous conseillons fortement:

- (1) de semer ou de replanter dans un sol humide (c'est à dire non engorgé), et, dans tous les cas, d'attendre que la lame d'eau soit réduite à 3-4 cm d'épaisseur. Le semis en prégermé est souhaitable. Dans le cas d'un repiquage (celà est vrai aussi pour les parcelles paysannes), il faut éviter de replanter des jeunes plants dont le système racinaire a été endommagé;
- (2) de maintenir, pendant les 10-12 jours du début de tallage, une lame d'eau dont l'épaisseur est inférieure à 5cm;
- (3) de provoquer un "à sec" de 8 à 10 jours juste avant la floraison, et d'éviter tout engorgement excessif pendant l'épiaison;
- (4) quand c'est possible, de drainer toute l'eau excédentaire

chaque fois que l'épaisseur de la lame d'eau de submersion excède 12 à 15cm.

En règle générale, dans tous les casiers sensibles, il est impératif d'économiser l'eau, et souhaitable de l'apporter plus souvent, mais en plus petites quantités; l'idéal étant de provoquer de courtes périodes d'assèchement entre des phases de submersion courtes.

Dans les casiers-paysans, si la culture est faite en surface plane, on ne peut que conseiller au riziculteur d'apporter le moins d'eau possible et également, en plusieurs fractions de faible volume, tout en tenant compte des stades critiques précédents.

Si la culture est faite traditionnellement en billons, il faut continuer à utiliser cette pratique culturale, mise au point de façon empirique et depuis longtemps; cette pratique a des conséquences favorables car elle permet de maintenir une partie importante du système racinaire dans la zone haute des billons, peu réduite. Il faut donc éviter, là encore, que les fossés entre les billons ne soient trop remplis.

Au contrôle des quantités d'eau apportées dans la rizière, il est judicieux d'ajouter l'analyse des qualités physico-chimiques des eaux; quelques exemples le montrent:

(1) si l'eau d'irrigation est une eau stagnante, elle s'appauvrit progressivement en oxygène, et devient favorable aux bactéries anaérobies facultatives ou strictes. En Casamance, par exemple, les canaux constituent un réservoir permanent de bactéries sulfatoréductrices du genre Desulfovibrio: très mobiles, ces bactéries sont capables de survivre dans l'eau de submersion et leur nombre augmente rapidement au niveau de la rhizosphère, la contamination se faisant par l'interface;

(2) si les eaux contiennent des quantités importantes de sulfates solubles ou de fer (ferrique ou ferreux), les teneurs en ces éléments augmenteront progressivement dans les sols. Inversement le drainage permet de diminuer sous forme solubilisée ces mêmes éléments;

(3) l'emploi d'eaux saumâtres ou légèrement salées ne semble dans l'état actuel de nos connaissances pas avoir d'effet sur la toxicité ferreuse. Elle en a cependant sur les bactéries sulfatoréductrices, le plus souvent relativement halotolérantes, donc

actives dans les milieux légèrement salés. Il faut en tenir compte et éviter au maximum l'utilisation de telles eaux, soit dans la zone du Delta, où les premières eaux disponibles, avant les crues peuvent être légèrement salées (voir travaux de LOYER) soit en Casamance, pour les rizières de mangrove, et de façon plus générale, pour tous les casiers alimentés en eau par les bolons en aval des barrages anti-sel.

En résumé, l'essentiel de la lutte contre les bactéries réductrices doit toujours être un contrôle volumétrique de l'eau: une rizière dans laquelle le sol est peu réduit, ou réduit seulement en fin de cycle cultural est peu propice à l'accumulation, à des niveaux toxiques, des ions sulfures et fer ferreux. Dans bien des cas, cette maîtrise de l'eau suffira pour limiter les intoxications à un niveau négligeable.

3.2.2. Les autres techniques de lutte: les techniques "gratuites"

Simultanément à cette maîtrise de l'eau, il faut appliquer les techniques de lutte "gratuites", qui n'impliquent pas de traitement spécial, mais seulement la mise en oeuvre de certaines précautions.

Celles-ci peuvent être résumées ainsi:

Dans les sols sensibles à la sulfatoréduction, il faut éviter absolument tout engrais contenant des sulfates, tout comme l'urée enrobée de soufre (Sulfur Coated Urea), à la fois comme engrais de fond, et pendant tout le cycle végétatif;

Dans les sols sensibles à la toxicité ferreuse, de même, il faut éviter l'apport d'engrais organique, qui constituerait, pendant sa décomposition anaérobie, une source permanente de substrats carbonés pour les bactéries réductrices de fer ferrique.

Dans les sols sensibles aux deux intoxications et, même si cette matière organique fraîche semble sans effet sur les bactéries productrices de sulfures, il faut à la fois éviter ces engrais organiques (Sesbania, Azolla, etc...), mais aussi, par désherbages fréquents, éviter que ne s'accumulent à l'interface, sol-eau, des débris organiques qui fermentant en semi-anaérobiose, constituent un nouveau microsite d'activité de ces bactéries réductrices.

3.2.3. La sélection de variétés résistantes

Tout programme de sélection variétale est un programme long et coûteux; à long terme, s'il permet de définir les cultivars les plus résistants, il s'avère cependant le plus rentable. Il ne peut être mené par l'ORSTOM, mais seulement par des organismes (ISRA, ADRAO) capables de tester, en vraie grandeur, et dans les conditions réelles, en Casamance et dans le Delta, un nombre élevé de variétés, locales ou importées, sur des sols moyennement sensibles; par exemple à Djibélor et à Savoigne ou Pont-Gendarme.

Rappelons que la base de la sélection doit être :

- le choix de variétés exsudant beaucoup d'oxygène;
- celui, simultanément, ou parallèlement, de variétés dont les exsudats sont les moins favorables aux bactéries réductrices de fer et de sulfates.

3.2.4. La lutte chimique:

Cette lutte "chimique" nécessite un apport financier, à chaque cycle, qui peut dépasser les possibilités monétaires du riziculteur. Pour l'ensemble des sols sensibles, un apport de nitrates (40 à 80 kg/ha), en début de cycle, ou lors du premier labour, retarde l'installation de conditions très anaérobies, tout au moins à la surface du sol.

Des précisions seront données ultérieurement concernant les engrais phosphatés, calciques, magnésiques et potassiques - et les doses à appliquer - pour favoriser une bonne survie des plants de riz dans les sols sensibles à la toxicité ferreuse. Des données expérimentales plus précises seront connues à la fin de la saison rizicole 1984.

CHAPITRE 4.

4.1. Conclusions partielles: le point sur les recherches actuelles ou à court terme.

Dans l'état actuel de nos connaissances, nous l'avons vu, des interprétations partielles sont possibles, et sur le plan pratique, elles sont suffisantes pour suggérer des applications. Cependant, pour cela, il nous a fallu renoncer à certaines hypothèses de départ, et à remettre en question certains résultats:

(1) ces deux maladies physiologiques du riz ne sont pas spécifiques des zones des sols sulfatés acides ou des sols de mangrove;

(2) les principales bactéries sulfato-réductrices des rizières sénégalaises ne sont pas les formes vibrioïdes pour lesquelles les exsudats constituent la principale source de carbone; au contraire, une part très active de la microflore sulfatoréductrice est constituée d'espèces sporulantes, nouvelles, capables d'utiliser ces exsudats, mais aussi, et peut-être préférentiellement, des substrats carbonés, comme l'acétate ou les acides gras volatils résultant de la décomposition de la matière organique;

(3) les cycles biologiques du fer et du soufre pour la seule partie "réduction" ne se manifestent pas toujours avec des conséquences fâcheuses, dans les mêmes sols. Leur fonctionnement se fait en parallèle, car les conditions écologiques qui favorisent la réduction sont similaires, mais avec des intensités variables.

Ceci étant définitivement acquis, l'interprétation finale qui doit conduire à la soutenance de deux doctorats d'états nécessite que soient mieux connues certaines données fondamentales parmi lesquelles nous citerons :

(1) La nutrition carbonée préférentielle de chaque groupe de bactéries sulfatoréductrices (et en particulier, celles qui sont spécifiques du Sénégal): études en cours en Europe.

(2) Les répartitions spatiales relatives de chacun de ces groupes. Si les principaux microsites de l'activité sulfato-réductrice sont bien connus, certains résultats nécessitent une interprétation statistique (en cours) pour définir le (ou les) microsite(s) préférentiel(s) de chaque genre. Ceci ne peut être interprété

que si sont connus les substrats carbonés préférentiels (point précédent) et les vitesses relatives de croissance sur ces substrats. De tels résultats ne seront connus, au mieux, qu'en 1985-86.

(3) Les causes des mécanismes de la sporulation à température ambiante, des souches sporulantes.

(4) de même, pour les bactéries réductrices du fer ferrique, il est nécessaire d'expliquer pourquoi, en Basse-Casamance, les souches trouvées ne réagissent pas exactement comme les souches similaires trouvées ailleurs: ces travaux seront poursuivies en RFA par l'équipe du Prof. OTTOW.

Certaines relations plante-microflore sont à préciser; elles font appel à des connaissances de physiologie végétale:

(5) l'effet réel des différents engrais (N, P, K, Ca et Mg) sur la microflore réductrice de fer, via l'exsudation racinaire, fait l'objet essentiel de la campagne d'hivernage 1984. Il serait souhaitable de poursuivre, en 1985, à Hohenheim, l'étude de l'effet de ces engrais sur la nature et l'abondance de ces exsudats.

(6) Dans le même ordre d'idée, il est souhaitable de vérifier si les variétés de riz les plus résistantes à la toxicité ferreuse se caractérisent aussi par une différence significative de l'exsudation, et/ou par une plus grande aptitude à libérer de l'oxygène au niveau des racines. Un tel travail permettrait d'initier la phase de sélection des variétés les mieux adaptées et devrait se faire simultanément aux essais de terrain.

(7) le mécanisme de protection des racines contre l'excès des ions Fe^{++} , qui semble efficace pour empêcher le passage de ces ions dans le système racinaire, jusqu'à un certain stade, continue à être étudié à Hohenheim par le Prof. OTTOW.

Enfin, une étude chimique serait utile pour définir:

(8) les changements de nature chimique des différentes gaines entourant le système racinaire: dans un premier stade, une telle gaine serait constituée essentiellement de Fe_2O_3 (fer à l'état ferrique), de couleur rouille, et dont la présence constitue un signe de bon état physiologique de la racine; cette gaine est progressivement réduite, avec accumulation de Fe^{++} , puis noircit par précipitation de FeS (sulfure ferreux). L'étude de ces transformations successives est à relier à l'activité bactérienne, la diminution progressive des teneurs en O_2 et du

potentiel d'oxydo-réduction. Cette étude permettrait en outre de préciser notre théorie de la double intoxication et pourrait être confiée à un chimiste du sol.

4.2. Propositions concrètes pour la poursuite du programme au Sénégal.

Dans l'intérêt immédiat de la riziculture sénégalaise, un certain nombre d'actions peuvent être menées immédiatement, sans ordre de priorité relative:

(1) Former le(s) remplaçant de MM.JACQ et PRADE, en choisissant, parmi les chercheurs et/ou techniciens de l'ISRA, ou parmi les jeunes diplômés, un agronome, ou un chimiste du sol, ou encore un spécialiste de la protection des végétaux, à qui seraient données quelques notions essentielles de la bactériologie des anaérobies du sol, lui permettant de comprendre les résultats de terrain et de faire quelques vérifications au laboratoire.

La formation est possible, soit par des stages en laboratoire, à l'ORSTOM, soit même dans les structures locales d'enseignement, car des cours de biologie des sols existent depuis cette année, à l'INDR de Thiès et à l'ENSUT.

(2) Lancer, à partir de nos données (fragmentaires) un programme de sélection. Un tel programme, destiné à définir les cultivars les plus résistants, est à réaliser simultanément en Casamance (à Djibélor, par l'ISRA) et dans le Delta du Fleuve Sénégal (à Savoigne, par exemple, dans le cadre de la SAED), compte-tenu des différences de sols et de systèmes d'aménagement, très sensibles, entre ces deux zones rizicoles. Nous pensons qu'il serait judicieux d'y associer l'ADRAO.

(3) informer l'ensemble des organismes de développement, et si nécessaire, les coopératives dans les zones précitées, de l'essentiel de nos résultats pratiques. Ceci pourrait être fait sous la forme d'une plaquette d'information (note technique) préparée à l'intention du MRST, et diffusée par ses soins.

Les informations à y faire paraître sont les suivantes :
comment:

3.1. Reconnaître les maladies physiologiques du riz dues aux intoxications par les sulfures et le fer ferreux, et ceci à tous les stades végétatifs.

3.2. apprécier les baisses de rendement dans les parcelles atteintes, et relier l'importance des dégâts à tels ou tels facteurs écologiques.

3.3. intervenir immédiatement après l'apparition des premiers symptômes, pour minimiser ces dégats.

3.4. prévoir, par un nombre limité d'analyses physico-chimiques, qu'un sol donné est potentiellement sensible, et de ce fait, exige que soient prises certaines précautions.

3.5. aménager, correctement (dans le cas de casiers en réalisation) ces parcelles des zones à risque: planage, drainage, etc...

3.6. conduire une culture, (surtout dans le cas d'une double culture annuelle) en contrôlant au mieux le régime hydrique et en choisissant les engrais.

3.7. choisir les variétés de riz les mieux adaptées.
Il devrait être possible de rédiger une telle plaquette courant 1985:

CONCLUSIONS GENERALES

L'étude biologique des cycles du fer et du soufre en rizières inondées a été menée dans un but pratique, c'est-à-dire essentiellement pour définir des solutions appropriées aux difficultés de protéger le riz contre deux formes de maladies physiologiques. Cette étude, essentiellement d'écologie microbienne et de pédologie, s'est faite suivant une voie originale, qui n'était certes pas la plus facile, car il fallait y intégrer l'analyse de multiples facteurs, liés au climat, à l'eau, au sol, à la plante, et, surtout, à des groupes bactériens mal connus en zone tropicale.

Cette étude touche à sa fin, dans deux domaines bien précis:

(1) l'analyse des causes écologiques des processus toxiques,

(2) la description et l'interprétation des mécanismes. Des résultats complémentaires sont attendus à la suite de la campagne rizicole 1984.

Dans deux autres voies de recherche, cette étude continue: (3) une recherche fondamentale, concernant la description et la classification des groupes microbiens, se poursuivra encore 1 à 2 ans. En effet, ces groupes sont originaux, restent mal connus, et sont difficilement identifiables suivant des techniques applicables au Sénégal; aussi l'essentiel des travaux se poursuit en collaboration avec des laboratoires Européens: à Stuttgart-Hohenheim (équipe du Prof. J.C.G. OTTOW), à Marseille (équipe du Dr. J.L. GARCIA) et à Constance (équipe du Prof. N. PFENNIG): les chercheurs actuellement au Sénégal rejoindront l'une ou l'autre de ces équipes.

(4) l'application des résultats de cette recherche devrait désormais être confiée à un organisme de recherche et de développement, au Sénégal (à l'I.S.R.A. par exemple).

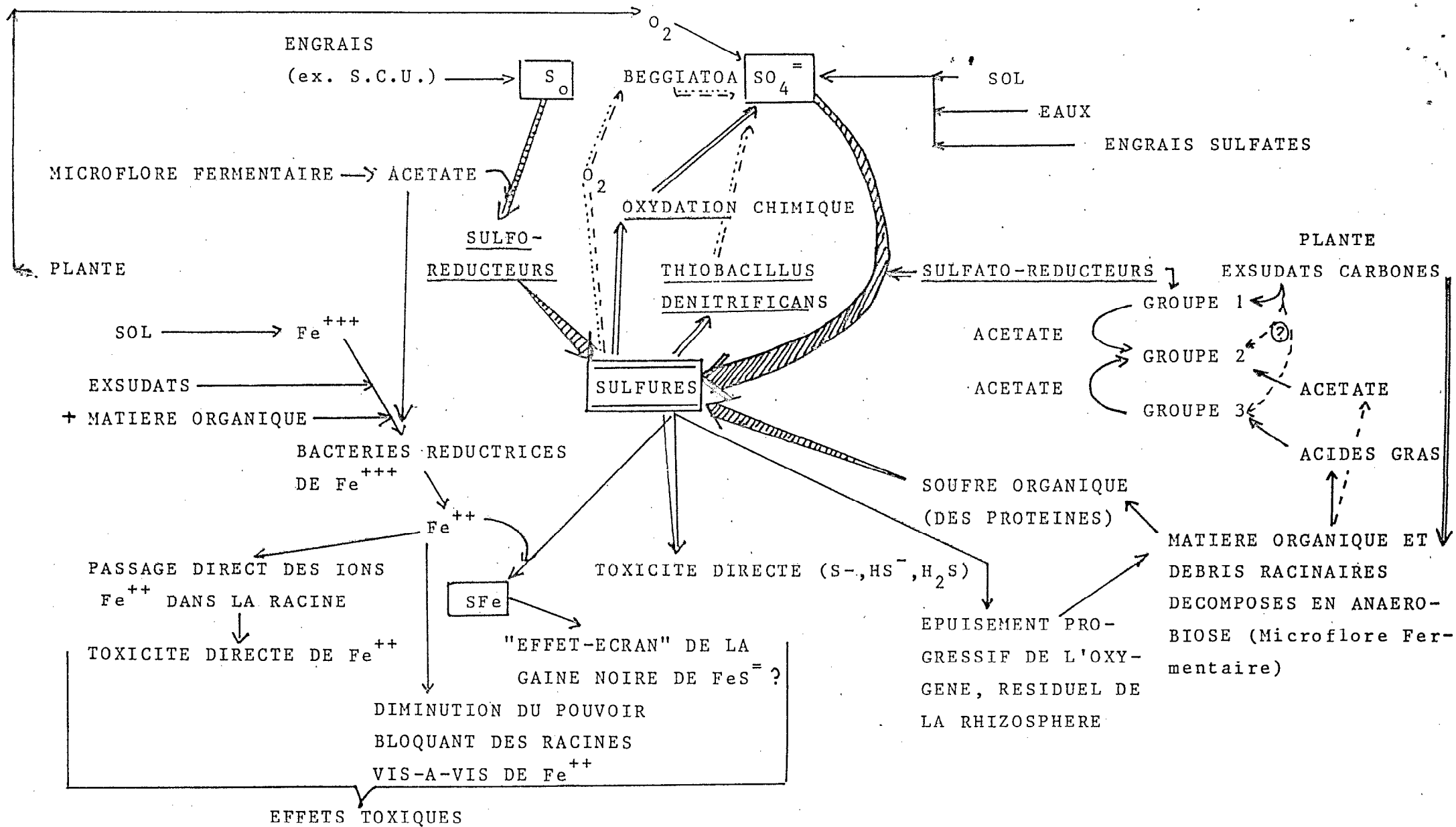
Deux actions sont à mener en priorité: (a) informer le monde rural des précautions à prendre, autant lors de l'aménagement des parcelles que pendant leur utilisation, (b) tester toutes les variétés locales et d'origine étrangère pour repérer les plus résistantes.

L'équipe actuelle de microbiologistes (V. JACQ et K. PRADE) reste affectée au Sénégal jusqu'à la fin 1984 (M. PRADE) ou la mi-1985 (M. JACQ), dans le cadre d'un accord tripartite, I.S.R.A-Université de Hohenheim-ORSTOM; l'importance économique des maladies physiologiques du riz inondé justifierait que cette équipe soit remplacée, le plus rapidement possible, par une équipe locale, de terrain, comportant, au minimum, un généticien sélectionneur et un chimiste du sol.

D E S T I N A T A I R E S

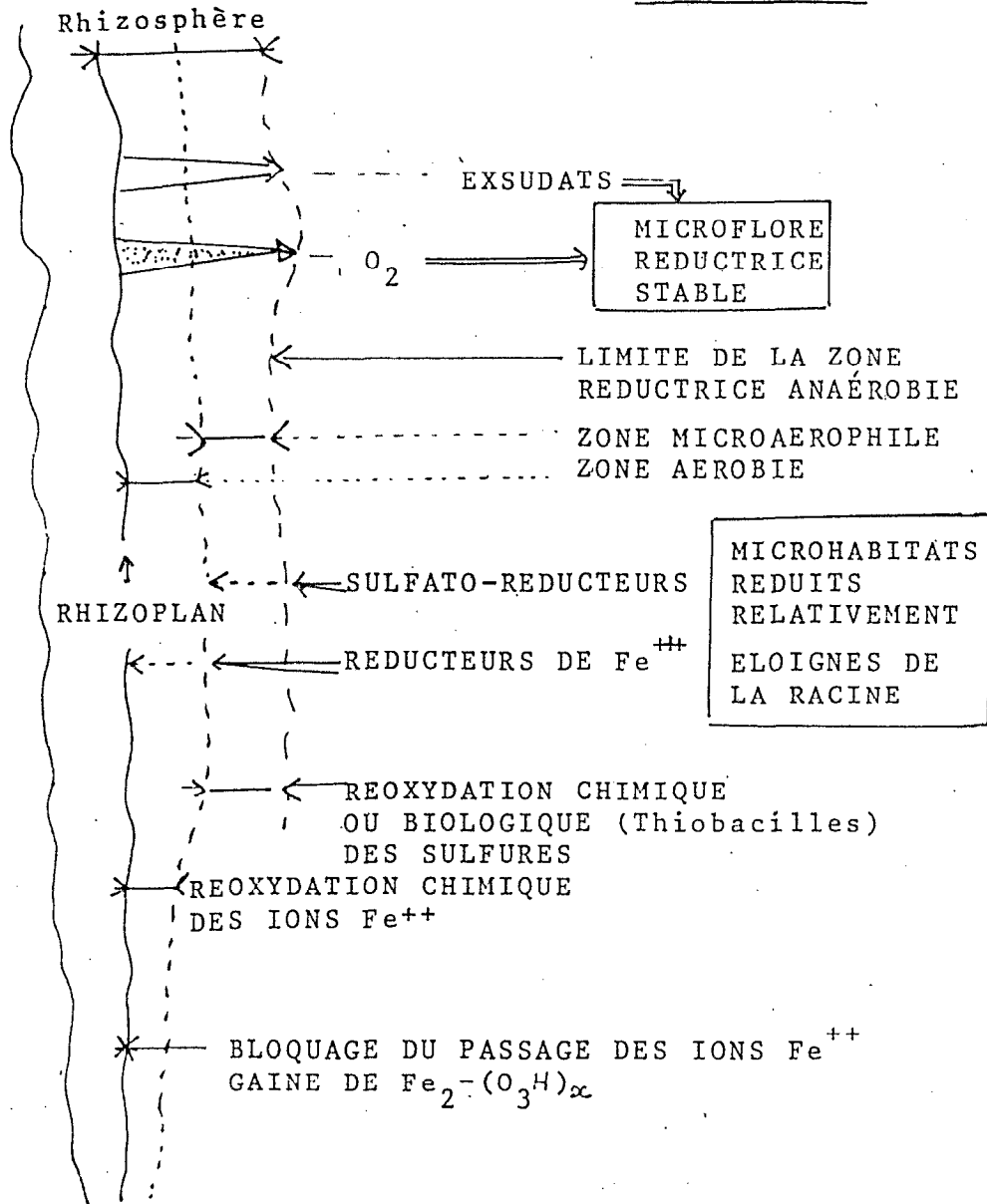
- 1/ Ministère de la Recherche Scientifique et Technique (MRST) 5
- Monsieur le Ministre 3
- M. Moctar TOURE, DRAAI 1
- M. Helmut MEISE, Conseiller Scientifique 1
- 2/ Institut Sénégalais de Recherche Agricoles (ISRA) 6
- Direction Générale (M.M. THIONGANE et SONKO) 2
- Centre ISRA de Djibélor (M. M. NIANG) 4
- 3/ Société d'Aménagement et d'Etudes du Delta (SAED)
- Direction Générale (St-Louis) 3
- 4/ O.R.S.T.O.M. 9
- Direction Générale, Paris 2
- Département F, M. J.-M. WACKERMANN, Paris 1
- UR601, M. J.-L. GARCIA, Marseille 1
- Dakar M. B. DALMAYRAC 1
Pédologie M. J.-Y. LOYER 1
Microbiologie 3
- 5/ République Fédérale d'Allemagne 6
- (à transmettre par le Prof. J.C.G. OTTOW)
Université Hohenheim (Stuttgart) Prof. OTTOW 1
GTZ 2
DFG 2
M. K. PRADE 1
- 6/ SOMIVAC (M. KAUFMANN) Ziguinchor 2
- 7/ M. Georges MALOUF (Technicien) 1

SCHEMA 1: MECANISMES DE L'INTOXICATION DU RIZ PAR LES SULFURES, DIRECTE ET EN RELATION AVEC L'ION FERREUX

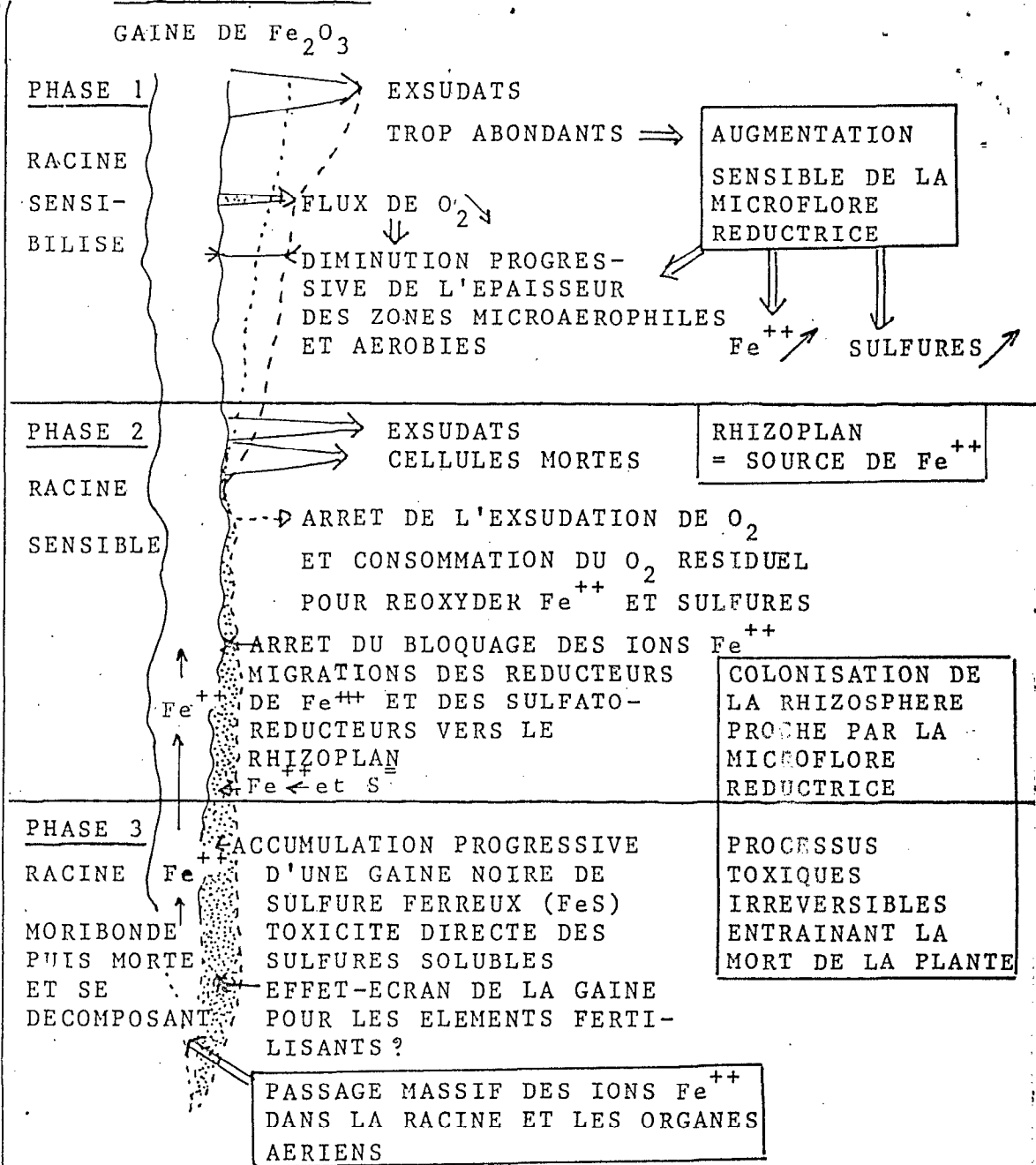


SCHEMA 2 : THEORIE DE LA DOUBLE INTOXICATION PAR IONS $S^{=}$ et Fe^{++}

RACINE SAINNE



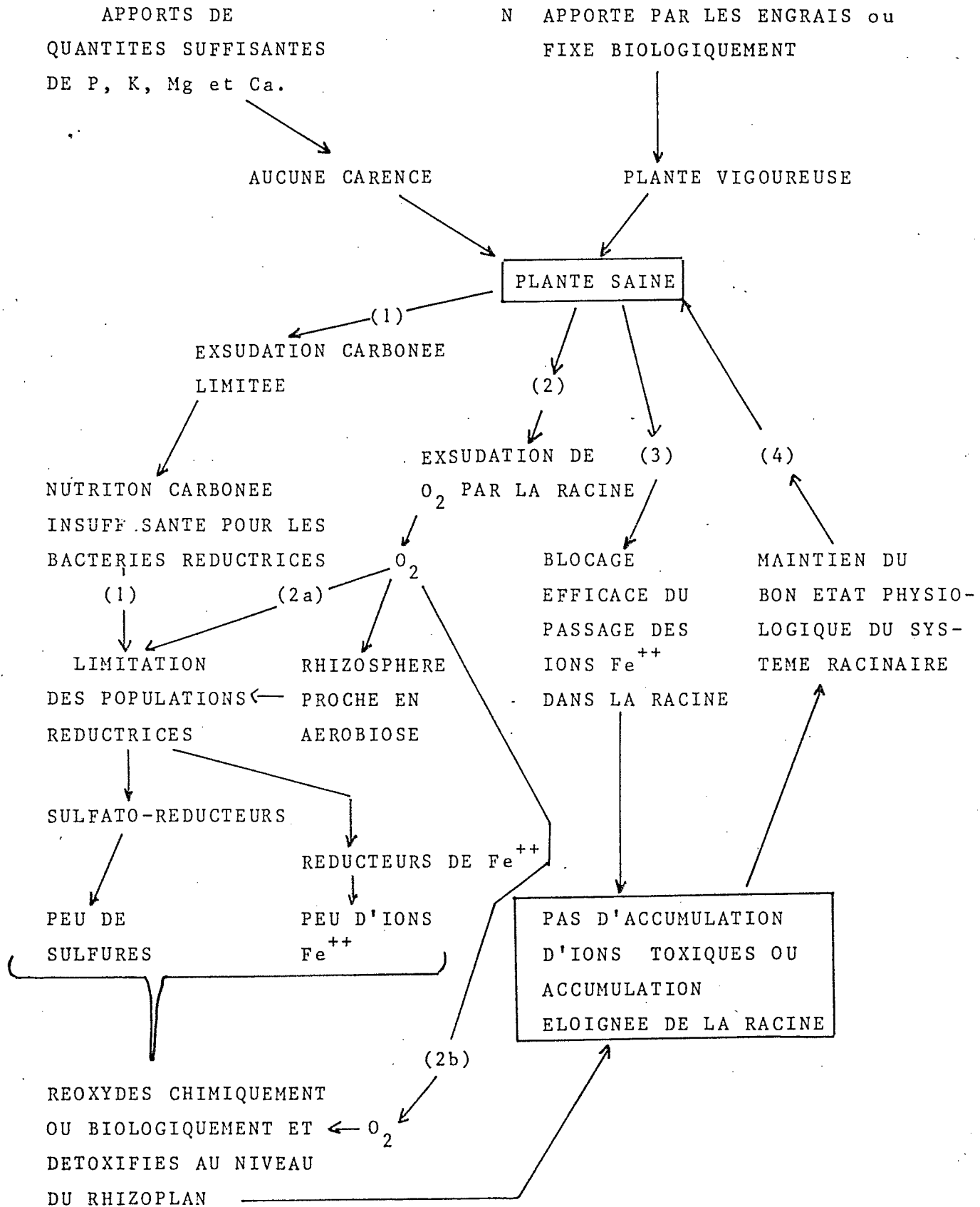
RACINE ATTEINTE



SCHEMA 3 :

REGULATION DE LA TOXICITE DES IONS $S^{=}$ et Fe^{++}

CAS FAVORABLE A LA SURVIE DE LA PLANTE



SCHEMA 4 :

DOUBLE OU SIMPLE INTOXICATION DU RIZ PAR LES IONS $S^{=}$ et/ou Fe^{++}

CAS DEFAVORABLE A LA SURVIE DE LA PLANTE

