

Toxicité ferreuse dans les bas-fonds : la rouille du riz

La toxicité ferreuse est un problème grave qui affecte le riz de bas-fonds en Afrique de l'Ouest et du Centre. Elle est particulièrement fréquente dans les bas-fonds où le fer peut se déverser vers les parties inférieures à partir des plateaux et des pentes. En 1994, le Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD) a détaché un physiologiste des plantes à l'ADRAO pour étudier le problème.

Une question d'équilibre

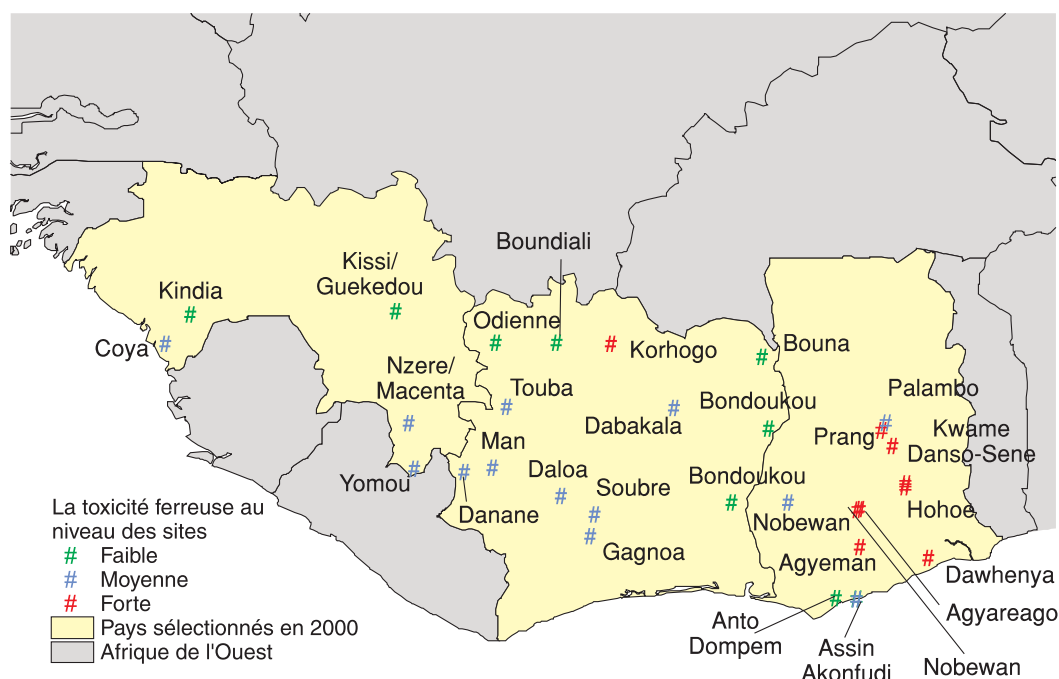
Les éléments nutritifs du sol sont essentiels pour la croissance des plantes. Cultivez dans un sol pauvre en éléments nutritifs et vous verrez les plantes lutter pour survivre et probablement mourir par la suite. Cependant, la nutrition des plantes va au-delà du simple apport d'azote, de phosphore ou autres engrais. Il y a aussi les 'oligo-éléments' comme le zinc, le manganèse et le fer. Ceux-ci sont requis en petite quantité pour maintenir la croissance normale de la plante. C'est quelque chose de bien équilibré : trop peu d'éléments et la plante ne peut se développer, trop d'éléments et... C'est donc ce qui arrive lorsqu'il y a trop de fer dans la rizière.

Une étude préliminaire menée par l'ADRAO en 2001 a révélé que jusqu'à 60 % des zones de bas-fonds rizicoles en Afrique de l'Ouest et du Centre sont exposées au risque de toxicité ferreuse (*voir* carte, Figure 4). La perte moyenne de rendement due à la toxicité ferreuse atteint les 50 % et en fait va de 10 à 100 %. Cela fait de la toxicité ferreuse un problème sérieux pour les producteurs de riz de bas-fond dans la région. « La toxicité ferreuse est un problème typique d'éléments nutritifs du sol », explique le physiologiste des plantes de l'ADRAO/CIRAD Alain Audebert. « L'excès de fer en solution est absorbé par le plant de riz et s'accumule dans ses tissus. Les petites taches brunes qui commencent à apparaître à l'extrémité des feuilles sont les symptômes typiques de la toxicité ferreuse. Ces taches s'étendent, fusionnent et donnent

une couleur rougeâtre aux feuilles. En plus, la toxicité ferreuse altère la structure des racines, le développement de la plante et engendre la stérilité. » (*Voir* Encadré 'Notation des symptômes de la toxicité ferreuse', page 31).

« Le fer est l'élément le plus important de la croûte terrestre. Il est particulièrement concentré dans les sols de bas-fonds de la région », explique Audebert, « mais beaucoup de pentes des plateaux possèdent aussi de fortes concentrations de fer. » Mais, la simple présence du fer dans le sol ne signifie pas nécessairement qu'il y a problème de toxicité. Et au pédologue de l'ADRAO, Sitapha Diatta de poursuivre : « Dans les plateaux et les pentes, le fer se présente, en général, sous ce que nous appelons la forme ferrique [Fe³⁺]. Cette forme est non soluble et par conséquent non disponible aux plantes. » En d'autres termes, le fer ferrique n'est pas nuisible au riz, et la toxicité ferreuse n'est pas un problème dans la partie supérieure de la pente. Par contre, lorsque les champs ne sont pas adéquatement drainés à l'eau douce, le fer des bas-fonds est soumis à un environnement pauvre en oxygène, et tend à se convertir en fer ferreux [Fe²⁺]. Le fer ferreux est soluble dans l'eau et par conséquent disponible à la prise par les plants de riz. « Dans une plaine typique de toxicité ferreuse », poursuit Diatta, « le fer ferrique est entraîné dans le bas-fond, soit par suintement à travers le sol (connu sous l'appellation écoulement divergent) soit par ruissellement et érosion des pentes supérieures vers le

Figure 4. Carte de l'Afrique de l'Ouest montrant le risque de toxicité ferreuse dans trois pays



fond de la vallée. Soit en route (pour l'écoulement divergent) ou en faisant son entrée dans le fond de vallée (pour le ruissellement), le fer ferrique rencontre des conditions d'engorgement en eau et devient du fer ferreux » (voir Figure 5, page 32). Ainsi, les concentrations de fer ferreux déjà importantes dans le fond de vallée sont augmentées par le ruissellement du fer des pentes.

Lutter contre la toxicité ferreuse au niveau du champ

« A partir de ce que nous savons sur les concentrations de fer et la toxicité ferreuse, nous pouvons proposer quelques options de gestion au niveau du champ, options qui pourraient aider à atténuer le problème », note Audebert. « Pour cela, nous avons plusieurs points d'intervention possibles. Nous pourrions bloquer le mouvement du fer provenant des plateaux, drainer les champs pour les débarrasser des excédents de fer, chercher des moyens de convertir le fer ferreux en fer ferrique, essayer de minimiser la prise de fer par la plante ou trouver des variétés de riz tolérantes aux



Gros plan de la zone de résurgence de la nappe souterraine à la lisière du bas-fond, là où l'eau stationnaire et l'eau de la pente se rencontrent. Noter à la surface du sol, la couleur rougeâtre du fer ferrique devenant plus pâle sous le processus de réduction

Notation des symptômes de la toxicité ferreuse

Dans les études des problèmes des plantes, il est toujours utile pour les chercheurs d'avoir une méthode quantitative du score de la contrainte (dans notre cas, la toxicité ferreuse) sur la plante. Le rendement n'est qu'une composante de cet aspect.

Pendant des années, les maladies, les ravageurs et les désordres nutritionnels du riz ont été évalués à l'aide d'une échelle numérique mise au point par l'Institut international de recherche sur le riz (IRRI). Ce score d'évaluation standard ('Standard Evaluation Score-SES') utilise une échelle graduée de 1 à 9 où 1 représente une croissance et un développement presque normaux, et 9, une plante pratiquement morte. Un score moyen de 5 se réfère à une plante avec une croissance et un tallage retardés et beaucoup de feuilles décolorées.



Plant de riz où le SES de la toxicité ferreuse est de 7 au moment où la plante commence à fleurir. Noter que les feuilles paniculaires sont bronzées et les panicules de petite taille

fortes concentrations de fer dans le sol. » La Figure 6 (page 32) résume quelques interventions possibles au niveau du bas-fonds et la Figure 7 (page 33) au niveau du champ.

Dans bien des situations de plateau, les paysans laissent le sol nu après la récolte du riz. Les semis n'étant faits qu'après les premières pluies, les sols dénudés et secs sont exposés à l'érosion au début de la saison des pluies. « Nous encourageons déjà l'utilisation des légumineuses dans les plateaux pour diversifier les systèmes de culture à base riz, améliorer la fertilité du sol, réduire l'érosion du sol et la pression des adventices », explique Andreas Oswald, l'agronome des systèmes cultureux de l'ADRAO. « Ces options aident aussi à résoudre le problème de la toxicité ferreuse en stabilisant les sols de plateaux de sorte qu'ils ne soient pas lessivés le long des pentes dès les premières pluies. » En plus, les plantes à racines profondes utilisées comme cultures intercalaires entre les cultures de riz dans les plateaux permettront de capturer plus d'eau et réduire ainsi l'écoulement divergent. Et Audebert de poursuivre : « La prochaine étape logique serait d'intercepter l'écoulement divergent et le ruissellement dans les pentes inférieures – la zone hydromorphe. » Mais, cette dernière idée nécessite un programme d'aménagement pour l'ensemble de la toposéquence et est inapplicable à l'état actuel de développement de la grande majorité des bas-fonds de la région.

« Nous savons que plus l'eau dure dans le champ plus elle s'appauvrit en oxygène », déclare Audebert. « Une solution possible serait d'améliorer la circulation de l'eau dans le champ pour avoir suffisamment d'aération et contribuer ainsi à garder le fer dans sa forme ferrique. De même, le drainage régulier d'eau douce à travers les champs tendra à entraîner le fer et éviter son accumulation. Le problème ici est que la gestion de beaucoup de bas-fonds est telle qu'il n'y a pas d'eau en excès pour cela. »

« Il est important de percevoir la toxicité ferreuse sous un angle holistique », poursuit Audebert. « Par exemple, si le fer constituait le seul problème, nous pourrions facilement recommander le drainage des champs jusqu'en dessous de la surface du sol. Mais, l'un des principes de base de la gestion améliorée de l'eau dans les bas-fonds est l'utilisation de l'eau dormante pour contrôler les adventices – une situation qui peut potentiellement exacerber le problème de toxicité ferreuse. » La gestion améliorée de l'eau dans le champ permettrait un meilleur drainage, débarrassant la zone racinaire du riz de

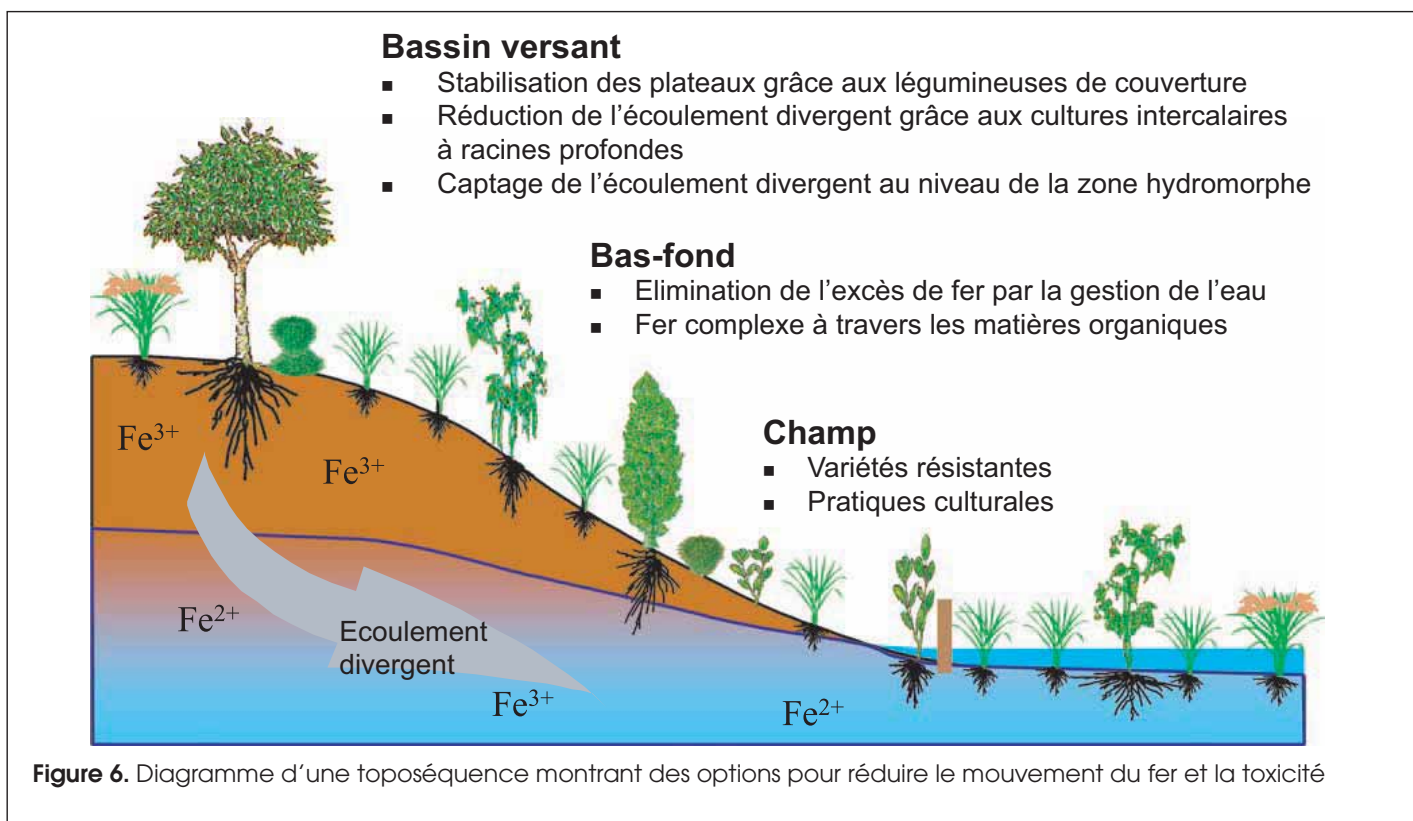
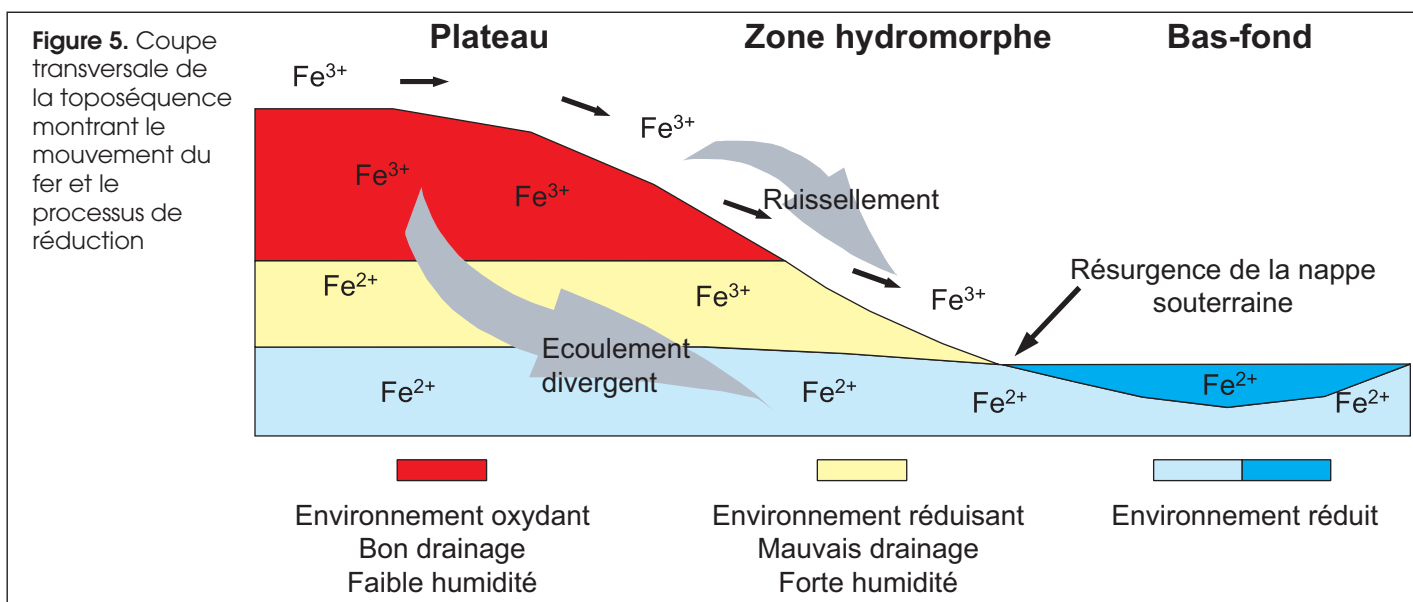
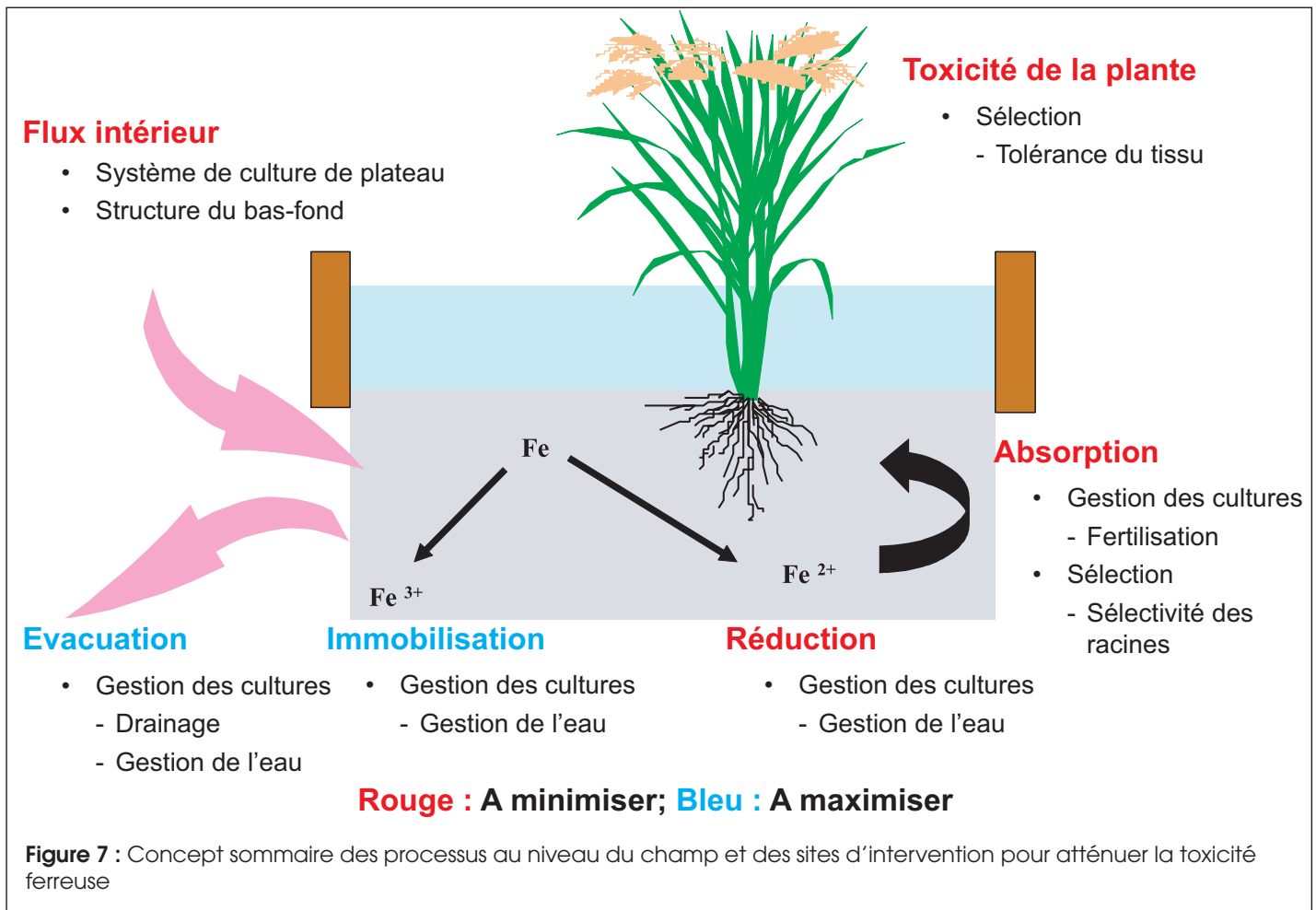


Figure 6. Diagramme d'une toposéquence montrant des options pour réduire le mouvement du fer et la toxicité



certaines quantités de fer ferreux, mais l'équipement requis pour un drainage profond est trop cher pour la plupart des paysans de la région. Audebert et son équipe ont montré que la culture sur billons dans les sites de toxicité ferreuse peut améliorer les rendements de riz. C'est le résultat du fait que les racines du riz se retrouvent dans un environnement en aérobie au-dessus du niveau engorgé en eau. En fait, cette technique est déjà utilisée par les paysans en Guinée, en Guinée Bissau et au Sénégal pour accroître les rendements dans les champs atteints de toxicité ferreuse. Cependant, dans les zones où la culture sur billons n'est pas une pratique traditionnelle, les différentes préparations du champ vont

engendrer des dépenses (surtout la main-d'œuvre) que les paysans peuvent difficilement se permettre.

L'équipe a testé les efforts de gestion améliorée de l'eau par le biais des diguettes dans le site d'essai de Korhogo. Quatre variétés testées ont donné un rendement moyen de 0,7 t/ha dans les champs avec diguettes (voir Tableau 1). « Comme nous n'avions pas une parcelle-témoin non toxique, nous ne pouvons pas attribuer cette augmentation du rendement à un effet de la construction des diguettes sur la toxicité ferreuse », explique Audebert. « Mais, la construction des diguettes améliore le rendement de 30 % en moyenne dans le site de toxicité ferreuse, et cela est significatif. »

Tableau 1. Effet de la variété et des diguettes sur le rendement du riz en conditions de toxicité ferreuse (Korhogo, Côte d’Ivoire, 2001).

Variété	Rendement (t/ha)		
	Sans diguette	Avec diguette	Différence
TOX 3069	3,28	4,39	1,11
CK4	3,44	4,11	0,67
Bouaké 189	2,55	3,03	0,48
CG14	2,70	3,17	0,47
Mean	2,99 b	3,88 a	0,68

Comme la toxicité ferreuse est une maladie de désordre nutritionnel, on pourrait à juste titre s’attendre à un impact de la gestion améliorée de la fertilité des sols sur les rendements du riz dans les sites atteints de toxicité ferreuse. L’ex-chimiste des sols de l’ADRAO, Kanwar Sahrawat, a mené des recherches sur la question dans les années 1990. « Il est beaucoup plus facile d’apporter des éléments nutritifs dans le champ, que d’en retirer quelque chose », a-t-il expliqué. « Nous avons analysé l’effet des différents régimes d’engrais sur le rendement d’une variété de riz sensible dans le site de toxicité ferreuse de Korhogo dans le nord de la Côte d’Ivoire. » Lorsque la variété avait été fertilisée au moyen d’un apport complet d’engrais – azote, phosphore, potassium et zinc – à Korhogo, nous avons enregistré un accroissement du rendement, mais la modélisation a montré que ce niveau est encore en deçà du potentiel. (*voir* Encadré ‘Simulation informatique de la toxicité ferreuse’, page 35). « Des résultats plutôt meilleurs ont été obtenus avec l’utilisation de matières organiques », fait noter Sahrawat, « mais les matières organiques (sous forme de fumier) ne sont pas faciles à trouver dans beaucoup d’endroits de la région. Les considérations de coûts font qu’il est peu probable que les producteurs de riz de bas-fond les utilisent. »

Qu’est ce que la plante a à offrir ?

Et Audebert de lancer dans un soupir : « C’est décourageant de savoir qu’il existe plusieurs moyens de réduire le problème du fer et de savoir aussi en même temps que peu



Champ inondé avec une forte concentration de fer

sinon aucune de ces options n’est actuellement pratique pour un champ de bas-fond typique d’Afrique de l’Ouest. » Comme c’est très souvent le cas lorsqu’on traite avec les petits exploitants sans ressources, la grande partie du fardeau de la recherche d’une solution est renvoyée au sélectionneur. Après tout, on a simplement besoin de distribuer aux paysans des zones affectées une variété de riz qui peut faire face au problème de la toxicité ferreuse, pour que ces paysans améliorent leurs rendements de façon presque immédiate.

« Le problème est que », explique le sélectionneur riz de bas-fond de l’ADRAO, Howard Gridley, « la sélection prend du temps. Mais, des progrès ont été faits et le programme de sélection dispose de variétés utiles. Par exemple, les variétés ‘traditionnelles’ c’est-à-dire des variétés qui ont été cultivées et sélectionnées par les paysans pendant plusieurs années – ce que d’aucuns appellent ‘variétés locales’ tendent à avoir un niveau raisonnable de tolérance à la toxicité ferreuse. » Le problème majeur est que certaines des variétés initiales issues des programmes de sélection et d’introduction et qui sont maintenant populaires et bien répandues, sont sensibles. A titre d’exemple, Bouaké 189, qui est la variété de bas-fond la plus cultivée en Côte d’Ivoire.

Le programme de sélection riz de bas-fond de l’ADRAO, qui a commencé au Nigeria a eu quelques succès. WITA 1, 3 et 4 sont toutes des variétés considérées comme modérément

Simulation informatique de la toxicité ferreuse : Ce qu'elle peut nous apprendre

Au début des années 1990, les membres du Groupe d'action sur les sols à problème de l'époque (faisant partie maintenant du Groupe d'action élargie sur la gestion des ressources naturelles du ROCARIZ) ont identifié la toxicité ferreuse comme l'un des problèmes majeurs des sols de riziculture dans la région. « Malgré le vote à l'unanimité des membres du Groupe d'action d'inclure la toxicité ferreuse dans les priorités de recherches régionales », explique Alain Audebert, le Physiologiste des plantes de l'ADRAO/CIRAD, « il n'y avait pas de données disponibles sur l'impact du problème ou ses effets sur les rendements de riz. »

A l'époque, l'ADRAO avait déjà une expérience dans l'adaptation du modèle cultural *Oryza*, qui prédit le rendement potentiel d'une variété à partir des données climatiques et des constantes photo-thermiques spécifiques à la variété. En conséquence, *Oryza* a été adapté pour la variété Bouaké 189 et les simulations ont été faites avec des données climatiques des deux sites testés en Côte d'Ivoire - Korhogo (zone de toxicité ferreuse) et M'bé (zone sans toxicité ferreuse) - pour prédire le rendement potentiel à chaque mois de semis au cours de l'année. Les effets de la toxicité ferreuse n'ont pas été introduits dans le modèle adapté, qui a prédit que les rendements potentiels pour les deux saisons de cultures normales (semis en février et juillet) étaient similaires dans les deux sites. Par la suite, Bouaké 189 a été cultivée au champ dans les deux sites pendant quatre saisons.

On peut voir sur le graphique (Fig. 8) que le rendement réel à M'bé était en effet de 1,7 tonnes par hectare soit moins que le rendement potentiel. Si nous supposons que cela est la différence normale entre le rendement potentiel et le rendement réalisable au champ, et que nous appliquons le même principe aux résultats obtenus à Korhogo, nous découvrons une autre différence de rendement de 3,3 t/ha, qui peut être attribué principalement à l'effet de la toxicité ferreuse sur le site de Korhogo.

« Ces simulations ont été faites en conditions de fertilisation optimale », explique Audebert. « Lorsqu'il a changé les doses d'engrais dans le champ, Sahrawat a constaté une augmentation significative du rendement avec la fertilisation complète (voir texte principal), mais le rendement final était encore très inférieur au potentiel comme l'a démontré la simulation de fertilisation optimale appliquée à M'bé (voir Fig. 9). En fait, l'engrais agit comme un améliorateur du rendement malgré la présence de la toxicité ferreuse. En ce sens, il fonctionne comme l'amélioration de la gestion de l'eau à travers la construction de diguettes (voir texte principal). »

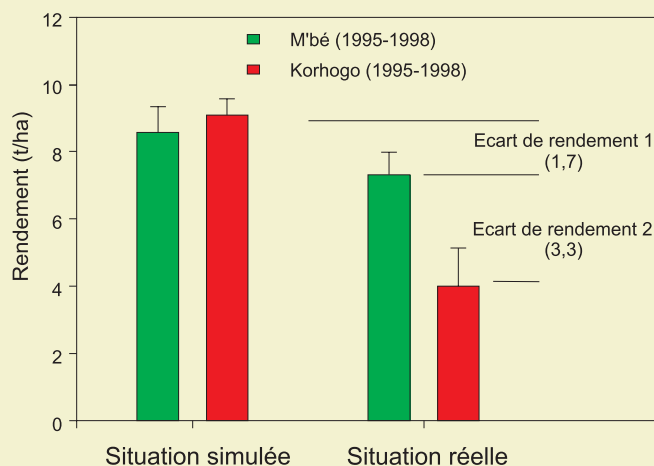


Figure 8. Pertes de rendement dues aux pratiques de gestion au champ (modélisation) et à la toxicité ferreuse (situation réelle)

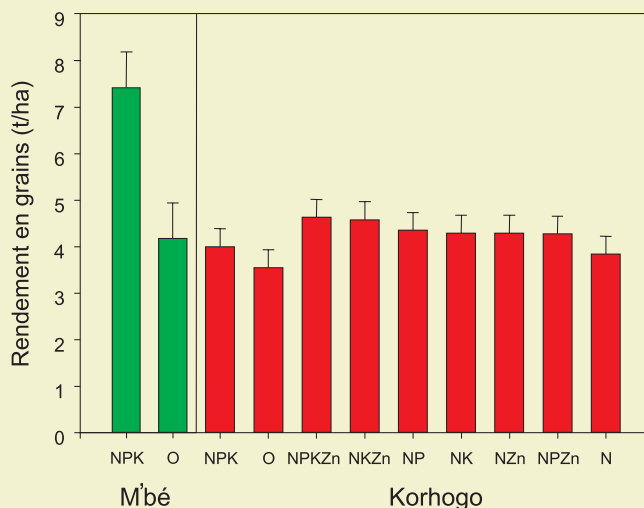


Figure 9. Rendement réel de parcelles fertilisées en conditions de toxicité ferreuse (Korhogo) comparé au rendement potentiel sans toxicité ferreuse (M'bé)

tolérantes à la toxicité ferreuse ou il serait plus précis de dire qu'elles sont adaptées aux sites avec une toxicité ferreuse modérée. Chacune d'entre elles a été homologuée au moins dans un des pays de la région pour ces situations. « Et WITA 12, qui est en cours d'essais avancés dans plusieurs sites en Côte d'Ivoire, est même meilleure », indique Gridley.

Dans le même temps, la caractérisation du pool génétique de *Oryza glaberrima* utilisée dans le programme NERICA a montré que CG14 est très résistante à la toxicité ferreuse. « Le criblage initial des NERICA a révélé que plusieurs sont résistantes à la toxicité ferreuse », indique Gridley, « mais la toxicité ferreuse sera une cible majeure dans le développement en cours des NERICA de bas-fond à partir des variétés *indica* (bas-fond) de *Oryza sativa*. »

Que se passe-t-il à l'intérieur de la plante ?

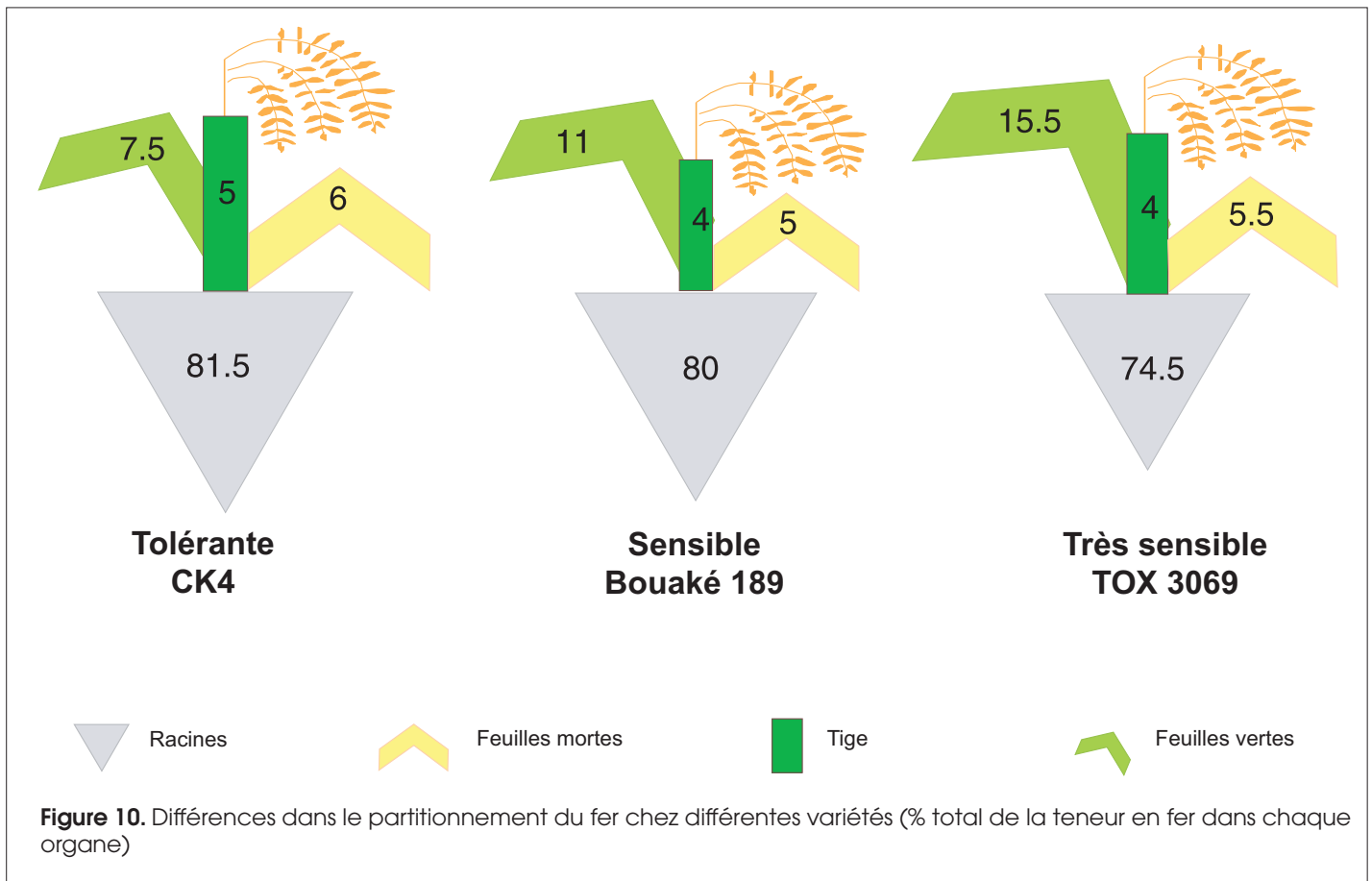
Comme la sélection moderne des plantes devient de plus en plus complexe, les chercheurs essaient de savoir exactement comment fonctionne la résistance ou tolérance à un stress. Découvrir le mécanisme qui sous-tend la résistance d'une variété est la première étape dans la recherche des combinaisons de plantes qui peuvent produire de hauts niveaux de résistance avec la fusion de leurs mécanismes. C'est pour cette raison qu'un projet a été affecté à la recherche sur la toxicité ferreuse dès 1997, l'un des points saillants du travail d'Alain Audebert pendant ses huit années de présence à l'ADRAO.

« Si deux plantes peuvent avoir différents rendements dans le même champ présentant une toxicité ferreuse », déclare Audebert, « nous avons émis l'hypothèse que la plante tolérante/résistante à la toxicité ferreuse pourrait éviter l'accès de la toxicité ferreuse aux racines, répartir différemment le fer entre ses propres parties ou encore exprimer un mécanisme de tolérance au niveau des tissus. Nous avons donc adopté les approches suivantes : prise, partitionnement, et tolérance des tissus. » Pour les sélectionneurs qui veulent combiner les mécanismes de résistance, l'idéal serait que les trois types de mécanismes aient lieu chez des variétés différentes. « Nous avons découvert que certaines variétés 'créent' des conditions d'oxydation autour de leurs racines », indique Audebert. « Cela fait qu'une partie du fer ferreux est converti en fer ferrique. En conséquence, ces plantes peuvent former une croûte de fer ferrique insoluble dans leur zone racinaire. » Les variétés qui

présentent ces caractéristiques font l'objet d'études dans la variabilité génétique de cette caractéristique.

Pour étudier le rôle de la répartition du fer entre les parties de la plante, une variété tolérante (CK4), une variété sensible (Bouaké 189) et une variété très sensible (TOX 3069) ont été cultivées dans des parcelles contiguës dans un champ de toxicité ferreuse. Les résultats ont été cohérents pendant la période d'étude de trois ans. « La prise totale de fer n'a pas varié de façon significative entre les cultivars », note Audebert, « montrant que pour cette variété particulière tolérante, il n'y avait aucune barrière à la prise au niveau des racines. Cependant, il y avait des différences significatives dans la répartition entre les différents organes de la plante. » Alors que les variétés avaient une même concentration dans les racines, la variété tolérante a réparti plus de fer dans sa tige et dans ses feuilles mortes, laissant les feuilles vertes significativement libres de fer par rapport à celles des variétés sensibles ou très sensibles (voir Figure 10). En plus, une corrélation directe était évidente entre la concentration de fer au niveau des feuilles vertes et le rendement final en grains.

« Le fer est une composante importante de la chlorophylle, véritable centrale énergétique de la plante », explique Audebert, « il a aussi des interactions avec toutes les principales enzymes et protéines qui constituent la biochimie de la plante. Nous devons donc nous attendre à ce que la toxicité ferreuse affecte la photosynthèse et les autres processus biochimiques d'une manière ou d'une autre. » Les mêmes expériences qui ont montré la répartition différentielle du fer entre les organes de la plante, ont révélé que les feuilles vertes des variétés sensibles devenaient plus minces à des concentrations de fer plus élevées tandis que les feuilles des variétés tolérantes ne l'étaient pas. Cet amincissement des feuilles peut provenir ou résulter de la réduction de la photosynthèse et donc de la réduction de la croissance de la plante. Et Audebert d'ajouter : « Nous travaillons présentement sur l'hypothèse selon laquelle un excès de fer dans les feuilles vertes perturbe la photosynthèse. Cela peut se faire par la perturbation de la synthèse chlorophyllienne ou par une action directe sur le processus de la photosynthèse lui-même. » C'est là le travail de l'étudiant en Doctorat Chérif Mamadou de l'Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), qui a commencé avec l'équipe de physiologie de l'ADRAO, en 2001.



« Nous étudions aussi la forme que prend le fer à l'intérieur des variétés tolérantes. Ce que nous appelons 'tolérance des tissus' peut être liée à la capacité des tissus et des cellules à mobiliser le fer ferreux, par exemple, par chélation – c'est-à-dire, lier la molécule de métal (dans ce cas le fer) à un composé organique, rendant ainsi le métal non réactif », poursuit Audebert.

« Les travaux d'Audebert, Sahrawat et autres, au cours de ces huit dernières années, ont été cruciaux pour la compréhension de la toxicité ferreuse », a déclaré le Directeur général de l'ADRAO, Kanayo F. Nwanze. Avec le départ d'Audebert en 2002, nous fermerons un chapitre important sur la recherche fondamentale dans ce domaine. »

« Vu l'importance que nos partenaires nationaux accordent à la recherche rizicole à travers les Groupes

d'action du ROCARIZ, nous comptons faire le point sur ce travail lors d'un atelier dans la deuxième moitié de 2002 », conclut Audebert. Cet atelier sera organisé au siège de l'ADRAO à Bouaké, et devrait aboutir à un résumé détaillé de l'état des lieux sur la toxicité ferreuse dans la riziculture en Afrique de l'Ouest.

« A partir de 2003, il est probable que l'accent de la recherche sur la toxicité ferreuse passe de la phase stratégique à la phase adaptative », explique le Directeur de la recherche de l'ADRAO, Günther Hahne. En termes pratiques pour l'ADRAO, cela voudra dire faire passer le travail du niveau de projet spécial à celui de projets plus élargis sur les bas-fonds et les bassins versants. »