

Etude de la dynamique du fer pour un diagnostic de l'état des milieux saturés d'eau en vue d'une meilleure gestion des terres de bas-fond

J.F. VIZIER¹

Résumé — Dans les milieux saturés d'eau, la nature et l'organisation des constituants du sol subissent d'importantes et rapides transformations qui peuvent avoir des conséquences sur leur utilisation. Certaines de ces transformations sont dues aux modifications de l'activité biologique des sols, consécutives au déficit en oxygène existant dans les milieux saturés d'eau, et à l'évolution en anaérobiose de leur fraction organique, qui s'accompagne de réactions d'oxydoréduction impliquant des constituants minéraux. Le fer est un des éléments susceptibles d'être réduits. Sa dynamique est alors marquée par des possibilités nettement accrues, mais variables suivant les sols, de solubilisation et de mobilisation de composés ferreux. La réduction du fer se répercute donc plus ou moins sur la composition de la solution du sol et peut ainsi avoir une influence sur la nutrition minérale des plantes. L'étude de la dynamique du fer est retenue comme base d'une méthode permettant de porter un diagnostic sur l'état des milieux saturés d'eau. La méthode choisie pour cette étude consiste à suivre les variations de certains paramètres physico-chimiques *in situ* ou sur des modèles expérimentaux en laboratoire. Sur le terrain, elle permet d'apprécier l'intensité des processus d'oxydoréduction ; sur les modèles expérimentaux, elle précise le comportement des sols subissant un excès d'eau et apprécie les risques de déséquilibres nutritionnels liés à la présence de fortes concentrations de fer ferreux dans la solution du sol. Ce diagnostic permet une meilleure gestion des terres de bas-fond, en vue d'une utilisation rizicole.

Mots-clés : bas-fond, anaérobiose, oxydoréduction, fer, riziculture.

Introduction

Les sols de bas-fond subissent, comme dans tous les milieux plus ou moins longuement saturés d'eau, des transformations de la nature et de l'organisation de leurs constituants. Ces transformations, dues à la saturation du sol par l'eau, peuvent être importantes, rapides, durables ou saisonnières ; elles représentent parfois des contraintes pour les cultures. Il convient donc de rechercher une méthode permettant d'estimer l'importance de ces transformations pour porter un diagnostic sur l'état de ces milieux, en vue, par exemple, d'une meilleure gestion des terres de bas-fond pour la riziculture.

Fonctionnement des milieux saturés d'eau et choix d'une méthode de diagnostic de l'état de ces milieux

Une des particularités du fonctionnement des milieux saturés d'eau est d'être fortement influencé par le déficit en oxygène qui apparaît dans le sol,

lorsque tout l'espace poral est occupé par l'eau. Dans ces conditions, les micro-organismes aérobies ne peuvent consommer que l'oxygène dissous. La concentration volumique de l'oxygène dans la solution du sol est déjà au moins trente fois plus faible que dans l'atmosphère (6 ml O₂ l⁻¹ dans de l'eau saturée d'air à la pression atmosphérique et à 20 °C), et le milieu devient le plus souvent rapidement anoxique, du fait d'un renouvellement insuffisant de l'eau qui le sature et de la faible vitesse de diffusion de l'oxygène dans la solution du sol (dix mille fois plus lente que dans l'atmosphère).

L'activité biologique du sol est modifiée par l'anoxie ; elle est marquée par une diminution des populations bactériennes et fongiques aérobies et une prolifération de bactéries anaérobies (BERTHELIN, 1982).

L'évolution de la fraction organique du sol, support carboné et énergétique des micro-organismes hétérotrophes, diffère de celle des milieux aérés de par une limitation de la décomposition des matières organiques fraîches, le maintien de composés hydrosolubles et une humification aboutissant à la formation de substances peu polymérisées (DUCHAUFOUR, 1977 ; GHEIKHWADEH & MOSSADEGH 1981).

¹ Centre ORSTOM, BP 5045,
34032 Montpellier Cedex 1, France.

Après la disparition de l'oxygène dans le sol saturé d'eau, le développement des micro-organismes anaérobies s'accompagne de la réduction de divers composés minéraux, accepteurs d'électrons, dans des processus d'oxydoréduction impliquant successivement les nitrates, les composés manganiques, ferriques, les sulfates, le bioxyde de carbone (TAKAI *et al.*, 1963 ; PONNAMPERUMA, 1972). Cette succession de réductions se traduit par des variations des valeurs de certains paramètres physico-chimiques du milieu (Eh, pH). Les produits formés sont volatils (azote, méthane), insolubles (sulfures) ou au contraire plus solubles que les formes oxydées (composés manganeux, ferreux). La mobilité relative des constituants du sol est de ce fait très différente de celle des milieux aérés. Il en résulte des redistributions particulières de certains constituants du sol, et notamment du fer.

Le mode de redistribution du fer, caractéristique des conditions plus ou moins réductrices existant dans le milieu, confère à cet élément un rôle d'indicateur de l'importance des processus de pédogenèse liés à la saturation du sol par l'eau, ou plus simplement un rôle d'indicateur de l'hydromorphie (VIZIER, 1988 ; FAVROT et VIZIER, 1990). La redistribution du fer correspond à une transformation de l'organisation des constituants du sol qui peut se répercuter sur certaines de ses propriétés, comme la conductivité hydraulique (VIZIER, 1990). La réduction du fer et la plus grande solubilité des formes ferreuses contribuent aussi à modifier sensiblement la composition de la solution du sol. De fortes concentrations de fer ferreux dans la solution du sol peuvent correspondre, pour certaines productions végétales, à des risques de déséquilibres nutritionnels, voire de toxicité ; par ailleurs, au niveau d'un système de drainage, ces fortes quantités de fer réduit peuvent être réoxydées et provoquer un colmatage des drains.

Le fer est donc un élément dont la dynamique représente une composante importante du fonctionnement des sols saturés d'eau, tant par les conséquences que cette dynamique a sur l'évolution des sols que par celles qu'elle peut avoir sur l'utilisation de ces milieux (figure 1).

L'étude de la dynamique du fer peut être abordée par deux approches différentes : l'une biologique, l'autre physico-chimique.

La première approche envisage la dynamique particulière du fer dans les milieux saturés d'eau comme une conséquence des modifications de l'activité biologique du sol. L'évaluation de ces modifications, liées à l'apparition de l'anoxie, est assez délicate à réaliser. De très nombreux micro-organismes anaérobies ou aérobies sont en effet capables de réduire le fer. De plus, dans toutes les

études, faites surtout en laboratoire, il n'est pas possible d'établir clairement le rôle exact de ces micro-organismes dans les processus de réduction. Enfin, il n'est pas certain non plus que le développement des micro-organismes dépende toujours de ces processus (GHIORSE, 1988). Ces remarques limitent un peu l'intérêt que peuvent présenter des numérations de populations bactériennes, par exemple, pour évaluer l'influence des modifications de l'activité biologique du sol sur la dynamique du fer.

La seconde approche envisage la dynamique du fer comme une conséquence des processus d'oxydoréduction, dont le développement est lié aux modifications de l'activité biologique du sol. L'évaluation du développement de ces processus et de leurs conséquences est réalisée par la détermination de paramètres physico-chimiques mesurés *in situ* ou sur des modèles expérimentaux, en laboratoire. C'est cette approche physico-chimique qui a été retenue pour l'établissement d'un diagnostic de l'état des milieux saturés d'eau.

Etude de la dynamique du fer par une approche physico-chimique

Cette étude peut permettre tout d'abord de caractériser de façon générale l'ambiance physico-chimique du milieu. Elle vise ensuite à préciser les

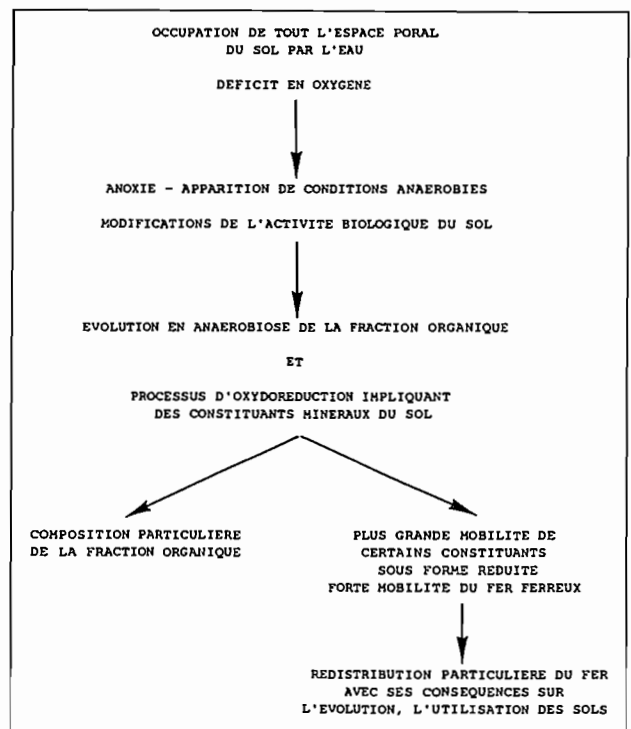


Figure 1. Particularités de fonctionnement des milieux saturés d'eau.

conditions d'utilisation des sols en évaluant les contraintes qui peuvent résulter de la plus ou moins grande mobilité du fer ferreux : modifications des propriétés des sols (réorganisation de leurs constituants), risques de déséquilibres nutritionnels pour les plantes, de colmatage ferrique des drains (concentrations de fer ferreux dans la solution du sol). Les applications de l'étude de la dynamique du fer présentées ici se rapportent à l'utilisation des milieux saturés d'eau pour la riziculture.

Appréciation de l'ambiance physico-chimique d'un milieu

Le développement des processus d'oxydoréduction se répercute sur l'ambiance physico-chimique du milieu. Les modifications de cette ambiance peuvent être appréciées par la mesure *in situ* du potentiel d'oxydoréduction et la détermination, sur des prélèvements de sol saturé d'eau, des concentrations de formes réduites de certains constituants des sols, comme celles de fer ferreux (voir annexe).

Concernant le potentiel d'oxydoréduction (Eh), les valeurs obtenues sont fonction du rapport des activités des formes réduites et oxydées. La séquence de réduction précédemment évoquée étant généralement suivie, les valeurs de Eh indiquent, en principe, l'état d'oxydation ou de réduction dans lequel se trouvent les constituants minéraux du sol susceptibles d'être réduits. A ce titre, Eh peut être

considéré comme étant un paramètre mesurant l'intensité des processus d'oxydoréduction (PONNAMPERUMA, 1972). Ces mesures sont accompagnées de déterminations du pH, les réactions d'oxydoréduction associant souvent des échanges de protons à des échanges d'électrons. De telles mesures sont couramment effectuées dans les milieux naturels et ne présentent pas de difficultés de réalisation particulières.

Le dosage de formes réduites complète l'appréciation portée sur l'ambiance physico-chimique du milieu. L'intérêt du fer comme élément indicateur de l'intensité des processus étudiés réside dans le fait que l'état d'oxydoréduction du sol paraît être largement contrôlé par le système fer ferreux/fer ferrique (PATRICK, 1981). Les valeurs de fer réduit obtenues sont comparées à celles de différentes formes du fer dosées dans le sol aéré. Les formes réduites ou oxydées dont on compare les teneurs sont évidemment fonction des méthodes de dosages retenues (fer ferreux/fer total ou fer ferreux/fer amorphe, par exemple).

Les résultats obtenus peuvent être rapprochés des mesures de potentiel d'oxydoréduction et y être associés pour définir des « classes d'intensité de réduction » caractérisant bien l'ambiance physico-chimique d'un milieu (tableau I).

Appliquée, par exemple, à la connaissance du fonctionnement d'un bas-fond rizicultivé des hautes terres de Madagascar, l'appréciation *in situ* de

Tableau I. Quelques exemples de "classes d'intensité de réduction" caractérisant l'ambiance physico-chimique du milieu.

-200	-100	0	100	200	300	400	500 mV	
Fortement réduit		Réduit		Modérément réduit		Oxydé		(1)
Réduction de SO ₄ ²⁻ , CO ₂		Réduction de Fe ³⁺		Disparition de O ₂ Réduction de NO ₃ ⁻ , Mn ⁴⁺				
Fortement réduit		Modérément réduit		Faiblement réduit		Oxydé		(2)
Réduction de CO ₂		Réduction de Fe ³⁺		Disparition de O ₂ Réduction de NO ₃ ⁻ , Mn ⁴⁺				
Réduction très forte	Réduction forte	Réduction moyenne		Réduction faible				(3)
Fortes diminutions du rendement des cultures de riz		20 % < Fe (II) / Fe (III) < 1 %						
		Conditions pouvant, lors de certaines phases du cycle du riz, être défavorables au rendement des cultures (repiquage du riz)						

(1) Valeurs corrigées à pH 7 (PATRICK, 1981).

(2) YU TIEN REN (1985).

(3) Fe (II) dosé après extraction par une solution de AlCl₃ à 0,2 % et Fe (III) dosé après attaque HCl à chaud, dans les sols d'un bas-fond à Madagascar (VIZIER *et al.*, 1990).

l'ambiance physico-chimique des sols par cette démarche met en évidence des niveaux de réduction préjudiciables au rendement des cultures. Ces niveaux, atteints en certains points du bas-fond lors de différentes phases du cycle du riz, laissent supposer l'existence de déséquilibres nutritionnels, voire de phénomènes de toxicité, dus à la présence de fortes concentrations de fer ferreux (VIZIER *et al.*, 1990).

Appréciation de la mobilité du fer ferreux

Une forte réduction du fer n'est pas toujours synonyme d'une grande mobilité, donc d'une importante redistribution dans le sol ou d'une forte disponibilité de cet élément pour les plantes. Une part seulement du fer réduit dans le sol saturé d'eau se trouve dans la phase liquide. Seules des déterminations de concentrations de fer réduit dans la solution du sol peuvent permettre d'apprécier le degré de mobilité de cet élément, très variable suivant les sols.

Le suivi des concentrations en fer ferreux dans la solution du sol est difficile à effectuer *in situ*. Les capteurs de type « bougies poreuses » ne peuvent pas être utilisés en raison de la réactivité de leur matériau vis-à-vis des solutions contenant du fer réduit. D'autres dispositifs ont été testés sur le terrain. Ils permettent d'extraire la solution circulant librement dans le sol saturé d'eau, mais une importante difficulté subsiste, posée par le conditionnement de la solution prélevée, pour qu'elle soit préservée de toute réoxydation avant la réalisation du dosage (MAITRE, 1991). Pour ces différentes raisons, le suivi des concentrations en fer ferreux dans la solution du sol sur des modèles expérimentaux en laboratoire constitue une bonne alternative pour l'étude des variations de la mobilité du fer réduit dans les milieux saturés d'eau.

Les concentrations en fer ferreux peuvent être déterminées périodiquement dans les percolats recueillis au bas de colonnes de sol saturé d'eau. L'ensemble des opérations, jusqu'au dosage, est effectué sous atmosphère d'azote pour éviter toute réoxydation (voir annexe). D'une manière générale, quelle que soit la périodicité des percolations, les concentrations en fer ferreux dans la solution du sol ainsi recueillie croissent puis décroissent après une certaine durée de saturation. La détermination simultanée du fer ferreux dans le sol saturé (dosé après extraction par une solution d' AlCl_3 à 0,2 %) permet, de calculer pour différentes durées de saturation, le rapport $\text{Fe(II) solution/Fe(II) sol}$ pouvant caractériser le degré de mobilité du fer ferreux (figure 2).

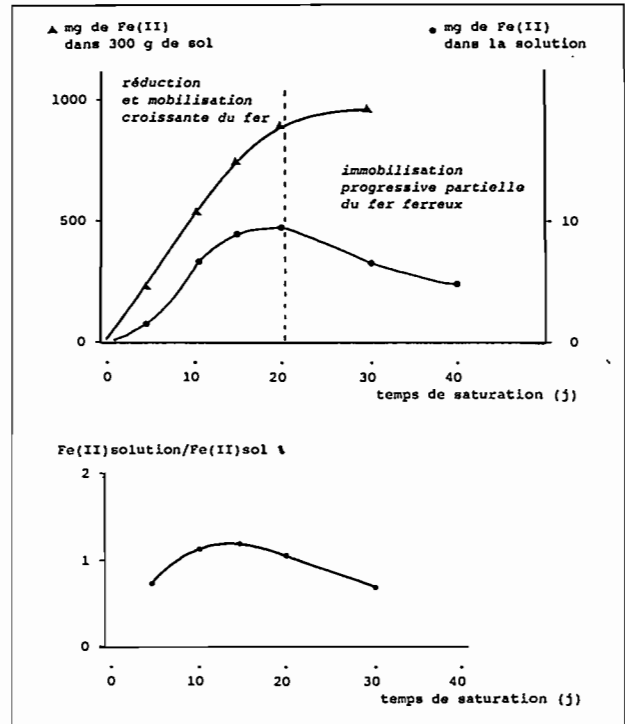


Figure 2. Variations des teneurs en fer ferreux dans la solution et le sol d'une colonne de sol saturé d'eau. Variations du rapport $\text{Fe(II) solution/Fe(II) sol}$, en fonction de la durée de saturation.

Deux enseignements peuvent être tirés de ces résultats.

Le premier enseignement concerne la concentration maximale de fer ferreux en solution, la durée de saturation pour laquelle elle est obtenue et l'évolution de ces concentrations. Ces différentes données traduisent la capacité d'un sol à réduire et mobiliser le fer ; elles peuvent être comparées aux concentrations pour lesquelles un risque de toxicité est habituellement observé pour le riz (TANAKA *et al.*, 1966). Les valeurs obtenues dans ce type d'expérimentation permettent de prévoir le comportement des cultures *in situ* et de préconiser un calendrier cultural adapté au fonctionnement des sols saturés d'eau.

Cette approche expérimentale a été appliquée à l'étude prévisionnelle du fonctionnement des horizons superficiels de trois sols de rizières aménagées dans les bas-fonds du Moyen-Ouest malgache (figure 3, d'après VIZIER, 1978).

Pour le premier sol (courbe 1), aménagé sur un versant de bas-fond (4,2 % de matière organique en surface), la concentration maximale en fer ferreux, légèrement supérieure à 100 ppm, est obtenue après 40 jours de saturation. Si le repiquage du riz est effectué au moment de l'inondation de la rizière, ce maximum, modéré, intervient à la fin de la phase

végétative du cycle de la plante et n'induit pas de risque de toxicité.

Pour le deuxième sol (courbe 2), également aménagé sur un versant de bas-fond, mais mieux pourvu en matière organique (6,1 %), la concentration maximale en fer est très forte (395 ppm) et intervient après 10 jours de saturation. Il existe un risque certain de toxicité, mais la rapide évolution des concentrations permet de préconiser que l'on diffère d'un mois le repiquage, après la mise en eau de la rizière.

Pour le troisième sol (courbe 3), aménagé dans la partie basse d'un bas-fond riche en matière organique légèrement hydrophobe (21,3 %), le maximum de concentration en fer ferreux intervient après une longue période de saturation, mais il correspond à un risque certain de toxicité étant donné le niveau atteint (458 ppm).

Le second enseignement tiré de ces résultats obtenus sur des modèles en laboratoire se rapporte à la nature différente des processus qui se développent quand la durée de saturation augmente.

Pendant une première période, allant du début de la saturation du sol par l'eau jusqu'au temps pour lequel on obtient le maximum de concentration en fer ferreux dans la solution recueillie par percolation, la croissance des concentrations dans la solution correspond à l'augmentation des quantités de fer réduit dans le sol. La mobilisation du fer est donc directement reliée à sa réduction. Au-delà de ce temps de saturation, la diminution des concentrations en fer ferreux dans la solution s'observe tandis que les quantités de fer réduit dans le sol se stabilisent ou augmentent légèrement. Un processus d'immobilisation progressive partielle du fer ferreux se développe donc après une certaine durée de

saturation du sol par l'eau (figure 2). Cette immobilisation, plus ou moins importante suivant les sols, est attribuée à la formation de composés ferreux moins solubles ou à l'adsorption du fer réduit sur les surfaces de la phase solide du sol (VIZIER, 1983). Le développement de ces différents processus dans le sol saturé d'eau témoigne de l'existence d'interactions à l'interface sol-solution, mettant en jeu des mécanismes de précipitation-dissolution et d'adsorption-désorption. Ces interactions sont très différentes suivant les sols et évoluent dans un même sol avec la durée de saturation, comme le montrent les variations du degré de mobilité du fer (valeurs du rapport Fe (II) solution/Fe (II) sol).

Appréciation de la disponibilité du fer ferreux

Au-delà de la prévention des risques de toxicité ferreuse pour le riz, les connaissances acquises sur la dynamique du fer par le suivi des concentrations dans la solution recueillie par percolation peuvent être complétées, en ce qui concerne la disponibilité de cet élément pour les plantes et les risques de déséquilibre nutritionnel, par une méthode visant à « quantifier » l'intensité des interactions existant à l'interface sol-solution.

L'appréciation de la disponibilité du fer ferreux dans les sols saturés d'eau est obtenue par une méthode mesurant la susceptibilité des surfaces de la phase solide du sol à libérer plus ou moins facilement le fer ferreux dans la solution du sol.

La méthode choisie consiste à réaliser une cinétique de séparation des formes de fer ferreux présentes dans une suspension de sol (rapport sol/solution d'environ 1/10), grâce à un dispositif fonctionnant suivant le principe de l'électrodialyse (voir annexe).

L'intérêt de cette méthode réside dans le fait qu'elle permet de mesurer des paramètres (quantité de courant) dont les valeurs, différentes suivant les sols, représentent sans doute une approche quantitative de l'intensité des mécanismes qui, à l'interface sol-solution, assurent la régulation des échanges entre phase solide et phase liquide dans le sol saturé d'eau. Par ailleurs l'utilisation d'un champ électrique permet d'aborder plus globalement l'ensemble de ces interactions, contrairement aux méthodes chimiques qui, par l'emploi de réactifs acides, complexants ou réducteurs, ont une action spécifique sur certains éléments du sol.

Les premiers résultats obtenus par cette méthode montrent ainsi que la disponibilité du fer ferreux dans un milieu saturé d'eau, ou encore la susceptibilité d'un sol à libérer du fer réduit dans la

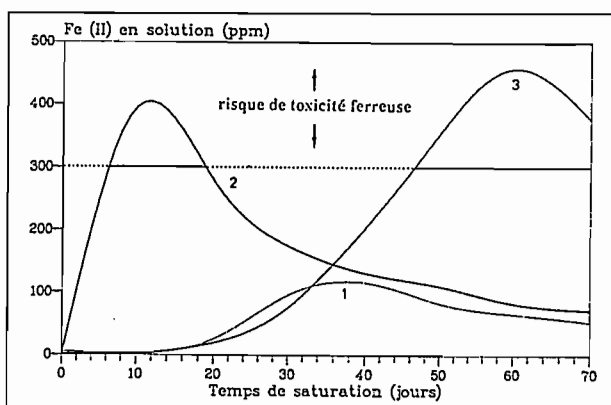


Figure 3. Etude prévisionnelle du fonctionnement des sols de trois rizières. Variation des concentrations en fer ferreux dans la solution recueillie par percolation au bas d'une colonne de sol saturé d'eau, en fonction de la durée de saturation.

phase liquide, dépend de l'abondance de tous les éléments participant à la dynamique d'échange entre phases solide et liquide (VIZIER et DOULBEAU, 1991).

Conclusion

L'étude de la dynamique du fer abordée par une démarche physico-chimique permet donc de porter un diagnostic sur l'état des milieux saturés d'eau en vue, par exemple, de leur utilisation pour la riziculture.

Le dosage du fer ferreux sur des prélèvements de sol réalisés *in situ* donne des résultats qui participent, en relation avec les mesures du potentiel d'oxydo-réduction des sols, à la caractérisation de l'ambiance physico-chimique du milieu. L'évolution de cette ambiance au cours du temps peut révéler l'existence de processus de réduction dont l'intensité est préjudiciable au bon développement des cultures.

Le suivi des concentrations de fer ferreux dans la solution recueillie par percolation au bas de colonnes de sol saturé d'eau permet d'estimer la capacité d'un sol à réduire et mobiliser le fer. Cette appréciation de la mobilité du fer sur des modèles expérimentaux en laboratoire constitue une bonne approche prévisionnelle du fonctionnement des sols saturés d'eau et de l'existence de risques de toxicité ferreuse pour le riz.

La séparation par électrodialyse des formes de fer présentes dans une suspension de sol permet enfin de mieux apprécier la disponibilité du fer ferreux dans ces sols et les risques éventuels de déséquilibres nutritionnels pour les plantes, puisque cette disponibilité paraît dépendante de l'abondance des autres éléments nutritifs présents dans le sol.

Références bibliographiques

BERTHELIN J., 1982. Processus microbiens intervenant dans les sols hydromorphes en régions tempérées. Incidence sur la pédogenèse. *Pédologie*, 32 (3) : 313-328.

BOHN H.L., 1968. Electromotive force of inert electrodes in soil suspensions. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 32 (2) : 211-215.

CHEIKHZADEH-MOSSADEGH D., 1981. Contribution expérimentale à l'étude de la géomicrobiologie du fer dans les sols. Thèse de doctorat d'Etat, université de Nancy-I, 156 p.

DUCHAUFOR P., 1977. Dynamique de la matière organique. *In* : *Pédologie. I. Pédogenèse et classification*. Paris, Masson, p. 28-70.

FAVROT J.C., VIZIER J.F., 1990. Les sols à caractères hydromorphes. *In* : *Présentation du référentiel pédologique au Congrès international de science du sol*, Kyoto, Japon, août 1990. Plaisir, AFES, p. 171-176.

GHIORSE W.C., 1988. Microbial reduction of manganese and iron. *In* : *Biology of anaerobic microorganisms*. Zehnder A.J.B. (ed.). New York, Wiley-Interscience Publ., p. 305-331.

MAITRE V., 1991. Géochimie des eaux libres extraites de sols hydromorphes sur granite dans le massif armoricain. Thèse, université de Paris-VI, 230 p.

PATRICK W.H. (Jr), 1981. The role of inorganic redox systems controlling reduction in paddy soils. *In* : *Proceedings of symposium on paddy soils*. Inst. of Soil Sci. Acad. Sin., p. 107-117.

PONNAMPERUMA F.N., 1972. The chemistry of submerged soils. *Adv. Agron.*, 24 : 29-96.

TAKAI Y., KOYAMA T., KAMURA T., 1963. Microbial metabolism in reduction process of paddy soils. Parts 2 and 3. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 9 : 176-180 and 207-211.

TANAKA A., LOE R., NAVASERO S.A., 1966. Some mechanisms involved in the development of iron toxicity symptoms in the rice plant. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 12 (4) : 32-38.

VIZIER J.F., 1969. Choix et mise au point d'une méthode de dosage du fer ferreux applicable aux sols hydromorphes minéraux. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 7 (3) : 435-445.

VIZIER J.F., 1978. Etude de la dynamique du fer dans des sols évoluant sous l'effet d'un excès d'eau. Etude expérimentale sur des sols de rizières de Madagascar. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 16 (1) : 23-41.

VIZIER J.F., 1983. Etude des phénomènes d'hydromorphie dans les sols des régions tropicales à saisons contrastées. Dynamique du fer et différenciation des profils. Paris, ORSTOM, 294 p. (Coll. Travaux et documents, n° 165).

VIZIER J.F., 1988. Le fer indicateur de l'hydromorphie. Etude de sa dynamique dans les sols subissant un excès d'eau. *Bull. GFHN*, 23 : 25-38.

VIZIER J.F., 1990. Etude du fonctionnement des milieux saturés d'eau. Une démarche physico-chimique. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 24 (3) : 431-442.

VIZIER J.F., GIUDICI P. de, RAUNET M., 1990. Etude physico-chimique des sols de rizières d'un bas-fond sur les hautes terres de Madagascar. Conséquences pour la riziculture. *L'Agron. Trop.*, 45 (3) : 171-177.

VIZIER J.F., DOULBEAU S., 1991. Premiers résultats sur la séparation par électrodialyse des formes de fer ferreux présentes dans un sol saturé d'eau. *In* : *Compte rendu de la IV^e réunion du Groupe de réflexion sur l'étude de la solution du sol en relation avec l'alimentation des plantes*, Montpellier, France, septembre 1991.

YU TIEN REN, 1985. Physical chemistry of paddy soils. Beijing, Science Press, Berlin, Springer Verlag, 217 p.

ZOBELL C.E., 1946. Oxidation reduction potential of marine sediments. *Bull. Am. Ass. Petrol. Geol.*, 30 : 477-513.

ANNEXE

Caractérisation *in situ* de l'ambiance physico-chimique d'un milieu**Détermination du potentiel d'oxydoréduction (Eh)**

Une électrode combinée (Pt, Ag/AgCl ou Pt, calomel saturé) est enfoncée dans le sol, après avoir éventuellement opéré une cavité cylindrique de la dimension de l'électrode si le sol est trop compact. Le milieu est peu perturbé par l'insertion de l'électrode dans le sol. Les valeurs de Eh indiquées par le millivoltmètre auquel est connectée l'électrode varient avec le temps ; elles tendent cependant à se stabiliser et la lecture est faite lorsque la variation est inférieure à 2 mV min^{-1} , généralement 10 à 20 min après la mise en place de l'électrode dans le sol saturé d'eau (BOHN, 1968). Entre chaque détermination, l'électrode est nettoyée avec une solution acide et abondamment rincée à l'eau distillée. L'étalonnage de l'électrode est régulièrement réalisé à l'aide d'une solution de chlorure de potassium à 0,1 M, contenant 0,003 M de ferrocyanure de potassium et 0,003 M de ferricyanure de potassium : le potentiel très stable de cette solution est de 0,428 V à 25 °C (ZOBELL, 1946). La mesure de Eh est répétée plusieurs fois dans le milieu dont on veut caractériser l'ambiance physico-chimique. Le nombre de répétitions dépend de l'hétérogénéité du sol.

Détermination du pH du sol

La mesure s'effectue à l'aide d'une électrode combinée (verre, calomel saturé) sur les mêmes emplacements et suivant un protocole analogue à celui de la détermination du Eh (stabilisation des valeurs du pH obtenue quelques minutes après la mise en place de l'électrode, étalonnage, nettoyage de l'électrode par rinçage à l'eau distillée).

Dosage du fer ferreux dans un sol saturé d'eau

Un échantillon de 2 à 4 g de sol est mis, immédiatement après son prélèvement, dans un erlenmeyer contenant 50 ml de chlorure d'aluminium à 0,2 %. Cet erlenmeyer est conservé à l'abri de la lumière (pour éviter les risques de photoréduction) et régulièrement agité. Après 24 h de contact, l'ensemble est centrifugé et le liquide surnageant filtré (toujours à l'abri de la lumière dans des fioles entourées de papier noir). Le fer ferreux est dosé dans la solution filtrée, par spectrophotométrie à 520 nm, après addition d'un réactif constitué de solution tampon à pH 4,6 contenant 0,2 % de 2-2' dipyridyl. Le poids de terre recueilli après la centrifugation est déterminé après séchage à l'étuve à 105 °C (VIZIER, 1969). La centrifugation et la filtration peuvent être remplacées par une filtration sur millipores à $0,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ après une vigoureuse agitation de la suspension de sol dans le chlorure d'aluminium.

Caractérisation du degré de mobilité du fer ferreux et évaluation des risques de toxicité ferreuse pour le riz

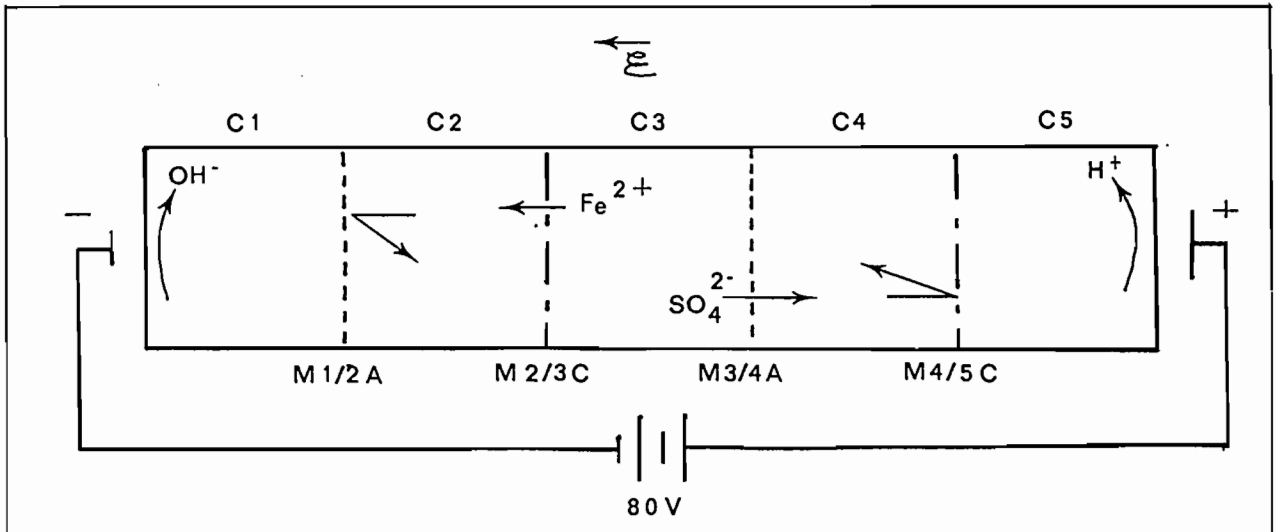
Un échantillon de 100 à 300 g de sol est mis dans une colonne et tassé de manière à reproduire une densité apparente voisine de celle du sol en place. Il est saturé par

addition d'eau permutée ou distillée, dont on établit puis maintient le niveau environ 5 cm au-dessus de celui du sol dans la colonne. Un percolat de 70 à 80 ml est recueilli au bas des colonnes, suivant une périodicité qui dépend de la dynamique de l'eau dans le sol étudié. Le fer est dosé dans la solution recueillie par percolation, soit directement sous forme ferreuse si l'opération se déroule sous atmosphère d'azote, soit après réduction, si la percolation est effectuée à l'air libre.

Détermination de la disponibilité du fer ferreux et évaluation des risques de déséquilibres nutritionnels pour le riz

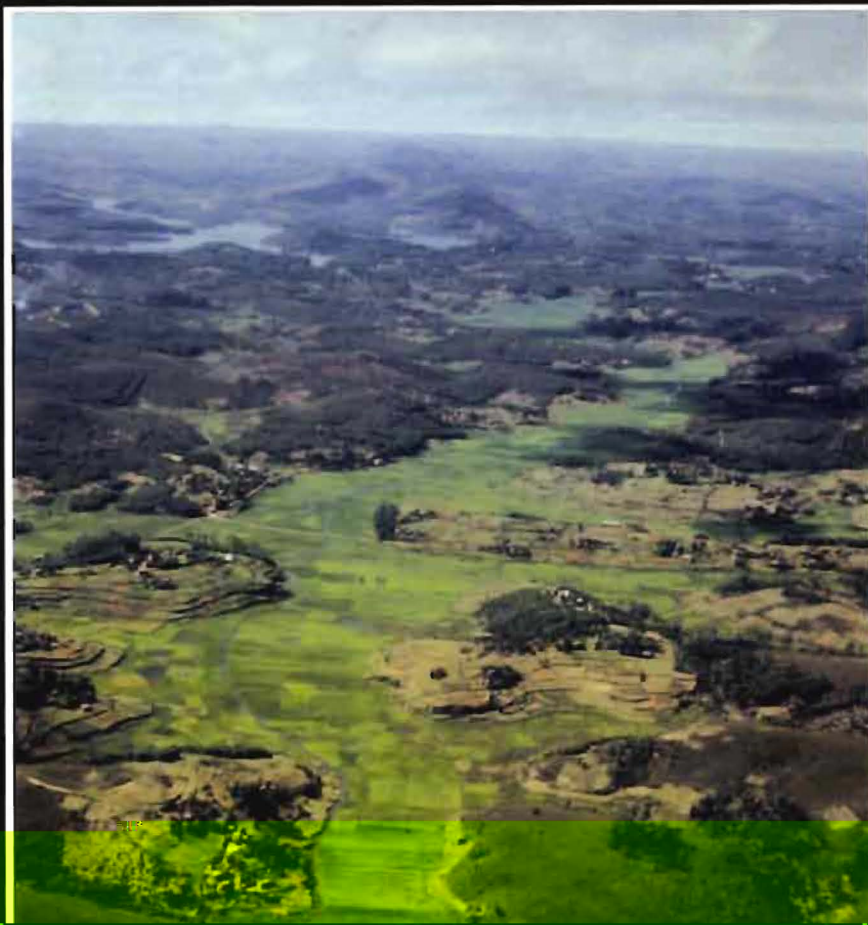
La détermination est effectuée sur une suspension de sol (rapport sol/solution de 1/10 environ) réalisée à partir d'une colonne de sol saturé d'eau. Toutes les opérations sont effectuées en boîte à gants sous atmosphère d'azote pour éviter les risques de réoxydation. Un échantillon de 12 à 15 g de sol (la masse exacte est déterminée en fin d'opération) est prélevé dans la colonne dès la fin de la percolation de la totalité de la solution pouvant être recueillie par gravité au bas de la colonne (environ 130 ml). Des dosages de fer ferreux sont effectués sur une aliquote de la solution recueillie, et également sur d'autres prélèvements de sol de la colonne (suivant la méthode déjà présentée, avec extraction par le chlorure d'aluminium). Ces dosages permettent de connaître exactement le fer ferreux contenu dans la solution et le sol de la suspension sur laquelle va être effectuée la séparation des formes du fer par un champ électrique (ddp constante de 80 V). Cette suspension est introduite dans le compartiment central d'un dispositif qui en comporte cinq (cf. figure) et fonctionne suivant le principe de l'électrodialyse.

Les conditions de pH sont maintenues constantes dans le compartiment central pendant toute la séparation, grâce à l'utilisation de membranes cationiques, anioniques et de solution tampon, limitant le transfert des ions H^+ et OH^- produits aux électrodes. L'intensité du courant, variable au cours de la séparation, est régulièrement mesurée. Des dosages de fer réalisés sur des prélèvements effectués en cours de séparation dans le compartiment central et les compartiments adjacents permettent de suivre la répartition de cet élément dans les différents compartiments, en fonction du temps mais surtout en fonction de la quantité de courant, exprimée en coulombs. Des quantités de courant, variables suivant les sols, sont ainsi nécessaires pour extraire du compartiment central le fer de la solution et le fer du sol de la suspension ; elles sont indicatrices de la plus ou moins grande susceptibilité d'un sol à libérer le fer ferreux dans sa solution. La détermination simultanée d'autres cations dans les prélèvements effectués en cours de séparation permet de connaître la susceptibilité d'un sol à libérer différents nutriments dans sa solution, et peut servir ainsi à évaluer les risques de déséquilibres nutritionnels pour les plantes (VIZIER et DOULBEAU, 1991).



Annexe. Schéma du dispositif utilisé pour la séparation par électrodialyse des éléments contenus dans une suspension de sol.

Bas-fonds et riziculture



CIRAD

ORSTOM

Actes
du séminaire
d'Antananarivo
Madagascar
9-14 décembre
1991

Bas-fonds et riziculture

Editeur scientifique
Michel Raunet

Actes du séminaire d'Antananarivo
Madagascar
9-14 décembre 1991

ISBN 2-87614-100-0
© CIRAD Mars 1993

Publié et diffusé par CIRAD-CA
Service des publications, de l'information et de la documentation
BP 5035, 34032 Montpellier Cedex 1, France