

LA TOXICITE FERREUSE DANS LES SOLS DE RIZIERES

IMPORTANCE DU PROBLEME
CAUSES ET MECANISMES MIS EN JEU
CONSEQUENCES POUR L'UTILISATION DES SOLS

Jean-François VIZIER

Antenne ORSTOM auprès du CEA DB-SRA Cadarache (France)

mai 1988

09 MAI 1990

M
ORSTOM Fonds Documentaire

N° : 30.046 ex 1

Cote : B P179

INTRODUCTION

La toxicité ferreuse est parfois invoquée pour expliquer le dépérissement du riz inondé. Le but de cette note est, à partir de données bibliographiques, de présenter les conditions, les mécanismes qui peuvent conduire à une telle toxicité et d'en tirer les conséquences pour la prévenir dans les sols "à risque".

1 - GENERALITES SUR CERTAINS PROBLEMES D'UTILISATION DES SOLS DE RIZIERES LIES A L'EXISTENCE DE PHENOMENES DE TOXICITE POUR LES PLANTES : LA TOXICITE FERREUSE.

De vastes zones favorables à la riziculture sur le plan climatique, hydrique, restent inoccupées en raison de problèmes que posent pour leur utilisation, la salinité, l'alcalinité, la forte acidité et des toxicités aluminique, ferreuse ou liées à la présence de fortes quantités de matière organique.

Ces problèmes sont économiquement très importants. Dans les régions très densément peuplées de l'Asie du sud et du sud-est par exemple, de telles zones inutilisées, représentent environ 100 millions d'hectares (Ponnamperuma, 1983). L'importance de ce chiffre ressort bien de la comparaison qui peut en être faite avec les superficies occupées par les sols subissant un excès d'eau dans les régions intertropicales du globe (wetland soils); celles-ci sont estimées à 550 millions d'hectares, dont 30% seulement (soit 150 millions d'hectares), seraient utilisées (IRRI, 1984).

Quelques uns de ces problèmes d'utilisation des sols, sont spécifiques de certaines zones :

- la salinité apparaît dans des sols des régions côtières, plus ou moins concernés par des invasions ou remontées d'eau de mer ou encore dans des sols de régions intérieures présentant une forte évaporation;
- l'acidité, la toxicité aluminique constituent les problèmes majeurs des sols sulfatés acides des estuaires, des deltas soumis à l'action des marées;
- les toxicités associées à la matière organique apparaissent dans des sols de tourbières (Van Menvoort et al., 1985).

Plus généralement, l'utilisation des sols subissant un excès d'eau peut être limitée par des conditions physico-chimiques extrêmes (forte acidité ou forte alcalinité) et des concentrations exceptionnellement élevées de substances ou d'éléments dues à des apports (sels), ou à la nature du "matériau" saturé d'eau (riche en matière organique, en soufre) ou encore à la plus grande solubilité de certaines formes chimiques des constituants du sol dans un milieu réducteur. C'est cette dernière raison qui

peut être invoquée pour ce que l'on appelle "toxicité ferreuse" : il s'agit en effet de graves désordres nutritionnels pour les plantes, observés dans des sols saturés d'eau présentant de fortes concentrations de fer ferreux (Tanaka et Yoshida, 1970).

2 - LA SOLUBILITE DU FER DANS LES SOLS ET SA DISPONIBILITE POUR LA PLANTE. DESEQUILIBRE NUTRITIONNEL ET TOXICITE FERREUSE.

Dans les sols drainés, bien aérés, les teneurs en fer présentes dans la solution du sol sont extrêmement faibles par rapport à celles de fer total. Ces teneurs sont contrôlées par la solubilité des hydroxydes ferriques qui est fonction du pH et la présence de complexes formés par le fer avec la matière organique du sol (Lindsay et Schwab, 1982).

Dans les sols saturés d'eau, la réduction du fer s'accompagne d'une augmentation de sa solubilité (1). Les quantités de fer présentes dans la solution du sol ne sont cependant pas simplement fonction du développement des réaction d'oxydo-réduction conduisant à la formation de fer ferreux. Des expériences effectuées sur des sols saturés d'eau, correspondant à des milieux "ouvert" ou "fermé" suivant qu'il y a ou pas renouvellement de l'eau saturant la terre, mettent en évidence la succession de deux périodes distinctes sur le plan de la physico-chimie et de la dynamique du fer :

- une première période, en début de saturation, est caractérisée par une baisse du potentiel d'oxydo-réduction, une augmentation du pH pour les sols acides, une rapide croissance des teneurs en fer réduit dans le sol et dans la phase liquide;

- une deuxième période, au delà d'un certain temps de saturation, est caractérisée par une stabilisation des valeurs de Eh, de pH et si l'on note une stabilisation (voire une légère augmentation en milieu "fermé") des teneurs en fer réduit dans le sol, celles-ci diminuent dans la phase liquide.

On observe donc, au delà d'une certaine durée de saturation, variable suivant les sols, une immobilisation progressive partielle du fer ferreux, attribuée à la formation de composés du fer moins solubles (hydroxydes ferroso-ferriques) ou à l'adsorption de fer ferreux (Vizier, 1974, 1978, 1987).

L'apport de fer aux plantes peut se faire sous forme de Fe^{3+} , Fe^{2+} et de complexes organo-métalliques et plus particulièrement de chélates (Mengel,

(1) La forme réduite devient prédominante dès lors que $pe + pH$ est inférieur à 12 ($pe = Eh/59$, Eh en mV - Lindsay et al., 1982).

et Kirkby, 1978). L'assimilabilité du fer par la plante dépend d'interactions à l'interface sol-racine qui sont fonction des formes et des teneurs en éléments absorbables et de propriétés physiologiques, morphologiques des racines, qui assurent une régulation de l'absorption des nutriments suivant les besoins de la plante.

La forte compétitivité existant entre éléments absorbables à l'interface sol-racine peut perturber l'absorption sélective des nutriments par la plante et entraîner des déséquilibres nutritionnels. Si l'absorption de fer est influencée et parfois limitée par la présence de fortes quantités de phosphate, calcium mais aussi de Mn^{2+} , Cu^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et Zn^{2+} , on note souvent, à l'inverse, qu'une forte absorption de fer s'accompagne d'une déficience en l'un ou plusieurs des éléments suivants : P, K, Ca, Mg, Mn (Tanaka, Loe, Navasero, 1966; Benckiser, Ottow, Watanabe, Santiago, 1984). Les antagonismes existant dans l'absorption des différents ions, ne sont cependant pas toujours faciles à mettre en évidence. L'antagonisme existant entre les absorptions de Mn et de Fe par exemple - deux éléments dont la solubilité augmente du fait de leur réduction en milieu saturé d'eau - a souvent été relevé (Rapports de l'IRRI). Cependant, il apparaît qu'une faible absorption de Mn soit davantage due à une faible concentration en Mn assimilable par la plante qu'à une trop forte absorption de fer (Van der Vorm et al., 1979). Plus qu'un antagonisme, il semble que l'absorption de chacun de ces deux éléments est favorisée par des conditions différentes de milieu : celle de Mn l'étant par la présence de nitrate par exemple, tandis que celle de fer le serait par la présence d'azote ammoniacal (Mengel et al., 1978).

Dans les sols bien drainés, aérés, les complexes organo-ferriques jouent un rôle important étant donné que les quantités de fer inorganique soluble - Fe^{3+} , $Fe(OH)_2^+$, $Fe(OH)^{2+}$ - sont très inférieures aux besoins de la plante. Ces composés organo-ferriques peuvent se former à partir d'exsudats racinaires, de substances organiques présentes dans le sol ou de produits du métabolisme microbien. L'absorption du fer par les racines est précédée d'une réduction de Fe^{3+} en Fe^{2+} et, pour les chélates, d'une séparation du composé organique du fer. La réduction, au contact de la racine serait assurée par une production d'électrons provenant des cellules racinaires (Mengel et al., 1978) ou par des substances réductrices produites par certaines parties des racines (Uren, 1982).

Dans les sols inondés, saturés d'eau, évoluant en conditions anaérobies, les teneurs en fer dans la phase liquide sont par contre, très nettement supérieures aux besoins de la plante. Un mécanisme de régulation intervient au niveau de la racine. De l'oxygène, transféré des parties aériennes de la plante aux racines par les aërenchymes, est libéré dans le sol et oxyde le fer ferreux au contact de la racine, limitant ainsi son absorption (Van der Vorm et al., 1979). Ce transfert d'oxygène est efficace lorsque la plante réagit bien à l'inondation, par des adaptations métaboliques qui favorisent par exemple, l'élongation internodale (Raskin et Kende, 1984) ou la formation d'aërenchymes (Smirnoff et Crawford, 1983 ...). Le maintien d'une rhizosphère oxydée est vital pour le riz, car il prévient l'absorption de substances réduites en trop fortes quantités par la plante (Trolldenier, 1977).

La plante est donc susceptible :

- soit de favoriser l'absorption de fer par réduction, dans des milieux aérés où cet élément se trouve en très faibles quantités sous forme soluble;
- soit au contraire, d'en limiter l'absorption par oxydation, lorsque dans les milieux saturés d'eau, les teneurs en fer réduit soluble sont trop importantes pour les besoins de la plante.

Si, pour diverses raisons, cette régulation ne peut pas être assurée par la plante, on pourra observer soit une chlorose ferrique correspondant à une absorption déficitaire en fer, soit une toxicité ferreuse traduisant au contraire, une absorption excédentaire.

Une toxicité ferreuse a été observée sur des sols ayant des teneurs très variables de fer réduit. Les niveaux de concentration en fer dans la solution du sol à partir desquels une toxicité ferreuse a été notée, sont différents suivant les auteurs, les sols étudiés et les expériences réalisées :

- en culture hydroponique, des symptômes attribués à la toxicité ferreuse apparaissent lorsque la concentration en fer ferreux est supérieure à 50 ppm (Tanaka et al., 1966);
- dans les sols de rizières, les symptômes apparaissent pour des concentrations en fer dans la solution, de :
 - = 100 à 500 ppm (Tanaka et al., 1966),
 - = 550 ppm (Tandano, 1974),
 - = 30 à 3000 ppm (Van Bremen et Moormann, 1978).

Une toxicité ferreuse apparaît le plus souvent sur des sols présentant des déficiences en P, K, Ca, Mg. Il semble ainsi, qu'une absorption excédentaire de fer, toxique pour la plante, soit autant liée à un déséquilibre nutritionnel dû à une faible disponibilité en P, K, Ca, Mg dans le sol, qu'à une forte concentration en fer réduit soluble (Benckiser, Ottow, et al., 1984).

3 - REACTIONS DES PLANTES A UNE TOXICITE FERREUSE.

Des carences (en K, Zn, ...), des toxicités (en Fe, H₂S, acides organiques ...) provoquent un déséquilibre dans la physiologie de la plante et se manifestent par différents symptômes - taches sur les feuilles, mauvaise floraison, mauvais rendements - parfois identifiés sous le nom de maladies d'Akiuchi, d'Akagare, Des symptômes assez semblables, peuvent être dus à des maladies virales.

Malgré la difficulté d'identifier les symptômes, certaines manifestations observées au niveau des feuilles, sont généralement attribuées à une toxicité ferreuse. Deux principaux types de manifestations de cette toxicité ont été décrits dans la littérature :

- le "bronzage" (bronzing disease) : apparition de taches éparses de couleur brun-rouge sur les feuilles les plus basses, extension de ces taches, les feuilles deviennent brunes puis de couleur gris foncé et meurent (Ponnamperuma et al., 1955);

- le "jaunissement" (oranging disease) : un jaunissement apparaît sur les feuilles les plus basses, partant de la pointe des feuilles, il progresse vers leurs bases. Ce jaunissement vire parfois à des couleurs plus vives jaune foncé, orange et des stries brunes peuvent être discernables. Les feuilles sont peu à peu affectées par le jaunissement, tandis que les plus basses meurent (Howeler, 1973). Une variante de ces symptômes foliaires, décrite par Tanaka et Yoshida (1970) sous le nom de "yellow type", semble assez proche du "jaunissement".

Les deux types de symptômes foliaires pourraient correspondre, d'après Howeler (1973), à des mécanismes d'absorption impliquant différemment le fer ferreux. Pour cet auteur, le "jaunissement" correspond à une "toxicité ferreuse indirecte", due à un déséquilibre nutritionnel des plantes, sur des milieux ayant des concentrations élevées de fer ferreux en solution.

Ces fortes teneurs en fer réduit, inhibent la formation de nouvelles racines, tandis que la précipitation de fer oxydé au contact des plus anciennes, limitent l'absorption de nutriments et particulièrement en P et Mg. Quant au "bronzage", il correspond à une "toxicité ferreuse directe" due à une forte absorption de fer par des plantes en milieu présentant des concentrations élevées de cet élément en solution. Cette absorption excessive de fer est aggravée par des déficiences en P (affaiblissement de l'état énergétique de la plante), en Ca (augmentation de la perméabilité des membranes des cellules racinaires) et K (accumulation de substances carbonées monomères dans la sève) qui provoquent une augmentation de l'exsudation organique par les racines, du nombre et de l'activité des micro-organismes réducteurs et par conséquent, une forte accumulation d'ions ferreux au contact de la racine, susceptibles d'être absorbés par la plante (Benckiser et al., 1984).

Des autoradiographies réalisées sur des essais en culture hydroponique (75 ppm de Fe²⁺), avec introduction de ⁵⁹Fe, permettent de constater que les taches brunes sur les feuilles, sont plus riches en fer. Cette accumulation est plus rapide dans les vieilles feuilles, ce qui est en accord avec les observations faites, puisque ce sont les feuilles les plus basses, les plus anciennes, qui présentent les premiers symptômes de "bronzage" ou de "jaunissement" (Tanaka et al., 1966). Les teneurs en fer, dans les plants affectés par une toxicité ferreuse, ne sont pas égales dans toutes les parties de la plante; les plus fortes sont notées au niveau des racines (dans les racines et sur leurs surfaces), les plus faibles, dans les jeunes feuilles (Van der Vorm et al., 1979). Les concentrations en fer dans les feuilles présentant des symptômes de toxicité sont variables suivant les variétés de riz : pour certaines, le "bronzage" est net pour des teneurs en fer de 300 ppm, pour d'autres il s'agira de "jaunissement", le "bronzage" étant observé pour des teneurs plus élevées (Tanaka et al., 1966). Des concentrations en fer dans les feuilles, supérieures au seuil de 300 ppm généralement admis pour l'apparition des symptômes attribués à une toxicité ferreuse, peuvent ne pas s'accompagner de manifestations foliaires visibles. Il s'agit dans ce cas, de plantes ayant bénéficié d'un apport équilibré en nutriments; les concentrations en fer y sont par ailleurs, plus faibles dans les racines, ce qui indique l'existence d'un bon transfert de cet élément des racines vers les parties aériennes. Cette remarque tend à montrer que si les symptômes de toxicité

apparaissent liés à des teneurs élevées de fer dans la plante, ils sont surtout dus à un déséquilibre nutritionnel (Benckiser et al., 1984).

Au cours de leur croissance, les plants de riz sont plus ou moins sensibles à la toxicité ferreuse. Cette sensibilité est plus forte en début de croissance, lors de la période de végétation et en fin de croissance, lors de la période de maturation. Le riz serait moins sensible aux fortes concentrations en fer ferreux de la solution du sol pendant la période intermédiaire de floraison et d'épiaison, sauf si celles-ci sont exceptionnellement élevées (Tanaka et al., 1966; Tandano, 1974).

4 - CONSEQUENCES POUR L'UTILISATION DES SOLS. PREVENTION DES RISQUES DE TOXICITE FERREUSE.

La toxicité ferreuse affecte donc plus ou moins directement les plantes, dans des sols présentant généralement de fortes teneurs en fer réduit soluble. Se traduisant par des concentrations élevées mais variables suivant les parties de la plante, cette toxicité se manifeste par des symptômes foliaires et un dépérissement de la plante.

La toxicité ferreuse apparaît surtout liée à des déséquilibres nutritionnels. Concernant l'azote, élément nutritif le plus important pour le riz, on peut noter par exemple, qu'en l'absence d'apport par des fertilisants, l'établissement d'une rhizosphère réductrice est associée à une faible disponibilité en azote au contact des racines (Okajima, 1958). Mais les déséquilibres nutritionnels sont surtout dus à de faibles disponibilités en P, K, Ca, Mg ... dans les sols. Un rôle particulièrement important semble attribué à la déficience en potassium. Celle-ci accroît l'exsudation de composés organiques par les racines, l'activité microbienne au contact des racines et diminue la capacité de la plante à maintenir une rhizosphère oxydée (Trolldenier, 1981).

Pour prévenir efficacement les risques de toxicité ferreuse dans les sols de rizières, il convient :

- d'effectuer un suivi de l'évolution de "l'ambiance physico-chimique" du sol (mesures de Eh, pH et de fer ferreux dans le sol saturé) en fonction de sa durée de saturation par l'eau;

- de connaître la dynamique du fer dans le sol saturé, par le suivi de sa réduction, de sa mobilisation et donc de sa disponibilité croissante pour

pour la plante, puis de l'apparition de l'immobilisation progressive partielle du fer ferreux (mesure de fer ferreux dans la solution du sol : celle-ci , difficile à réaliser in situ en l'absence de système de prélèvement efficace, pourra être faite sur des modèles expérimentaux reproduisant, en laboratoire, les conditions de température et surtout hydriques du milieu naturel);

- de chercher à mettre en évidence des déséquilibres nutritionnels par des analyses de sol pouvant révéler des déficiences en certains éléments, mais surtout par des analyses de plantes lors d'essais en vases de végétation.

Les données obtenues doivent permettre de préconiser des mesures visant à limiter les risques de toxicité ferreuse. Ces mesures vont tendre à agir ou à simplement prendre en compte l'évolution de l'état d'oxydo-réduction du sol et de la disponibilité en fer réduit pour la plante et à corriger les déséquilibres nutritionnels les plus flagrants.

La prise en compte de l'état d'oxydo-réduction du sol et de la concentration en fer ferreux dans la solution du sol, peut permettre de justifier des opérations se rapportant au contrôle de l'inondation des rizières. La pré-inondation des rizières, avant le repiquage, est parfois préconisée. Cette mesure se révèle efficace pour lutter contre la "toxicité ferreuse primaire" affectant les plants pendant la période végétative (Prade, 1987). La pré-inondation permet d'effectuer le repiquage, donc de placer des plants fragilisés par cette opération, dans un milieu saturé dans lequel l'immobilisation progressive partielle du fer ferreux a déjà pu se développer, limitant ainsi la concentration en fer dans la solution du sol et sa disponibilité pour la plante. Un résultat analogue peut aussi être obtenu par l'interruption momentanée de l'inondation juste après le repiquage. Cette opération permet une pénétration de l'oxygène dans le sol, une limitation de la réduction du fer et de sa concentration dans la solution du sol, donc de sa disponibilité pour la plante.

La correction des déséquilibres nutritionnels les plus fréquents consistent à apporter du potassium (Troldenier, 1981; Prade, 1987) des phosphates, du calcaire (Durand, 1983;...). Cette correction doit permettre d'éviter la "toxicité ferreuse secondaire" (Prade, 1987) intervenant pendant la période de maturation de la plante et qui apparaît attribuable

autant à une mauvaise régulation de l'absorption des nutriments par la plante liée à un déséquilibre nutritionnel, qu'à une forte concentration en fer ferreux dans la solution du sol.

CONCLUSION

Des désordres nutritionnels observés sur des plantes poussant dans des milieux saturés d'eau, inondés, présentant de fortes concentrations de fer ferreux, ont été attribués à une toxicité ferreuse. Cette toxicité se révèle à l'observation par des symptômes foliaires bien identifiés, correspondant à des teneurs importantes de fer dans certaines parties de la plante (racines, vieilles feuilles). Cependant, en l'état actuel des connaissances, il semble que les risques de toxicité ferreuse ou de désordres nutritionnels, dépendent autant ou plus de la relation existant entre l'état général de la plante ou le total des éléments absorbés et les concentrations en fer dans la plante (évidemment liées aux fortes teneurs en fer réduit dans la solution du sol), que des seules concentrations en fer dans le sol et la plante.

BIBLIOGRAPHIE

- BENCKISER (G.), OTTOW (J.C.G.), WATANABE (I.), SANTIAGO (S.), 1984 - The mechanism of excessive iron-uptake (iron toxicity) of wetland rice. *J. of Plant Nutr.*, 7 (1-5) : 177-185.
- DURAND (J.H.), 1983 - Les sols irriguables. ACCT PUF Paris 339 p.
- HOWELER (R.H.), 1973 - Iron-induced orangine disease of rice in relation to physico-chemical changes in a flooded oxisol. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, vol. 37 : 898-903.
- LINDSAY (W.L.), SCHWAB (A.P.), 1982) - The chemistry of iron in soils and its availability to plants. *J. of Plant Nutr.*, 5 (4-7) : 821-840.
- MENGEL (K.), KIRKBY (E.A.), 1978 - Iron. *In Principles of plant nutrition Intern. Potash Inst.* : 425-439.
- OKAJIMA (H.), 1958 - On the relationship between the nitrogen deficiency of the rice plant and reduction of the medium. *J. Sci. Soil Manure Jpn* 29 : 175-180.
- PONNAMPERUMA (F.N.), BRADFIELD (R.), PEECH (M.), 1955 - Physiological diseases of rice attributable to iron toxicity. *Nature* 175 : 265
- PONNAMPERUMA (F.N.), 1983 - Improving the productivity of problem rice lands. *In Chemistry and world food supplies: the new frontiers*. Oxford, U.K., Pergamon Press : 47-55.
- PRADE (K.), 1987 - Einfluß der Nährstoffversorgung auf die Eisentoxizität bei NaBreis (*Oryza sativa* L.) in der Basse Casamance - Senegal. Hochschulverlag GmbH, Freiburg (Breisgau) 216 p. (résumé français : 163-170).
- RASKIN (I.), KENDE (H.), 1984 - Effect of submergence on translocation, starch content and amylolytic activity in deep-water rice. *Planta*, 162, (6) : 556-559.
- Soil Taxonomy News, 1985 - Report of the VII Workshop on Soil Taxonomy with the theme "Characterization, Classification and utilization of wetland soils", n°10 : 7-14.
- SMIRNOFF (N.), CRAWFORD (R.M.M.), 1983 - Variation in the structure and response to flooding of root aerenchyma in some wetland plants. *Annals of Botany*, 51 (2) : 237-249.

- TANAKA (A.), LOE (R.), NAVASERO (S.A.), 1966 - Some mechanisms involved in the development of iron toxicity symptoms in the rice plant. *Soil Sci. and Plant Nutr.*, 12, 4 : 32-38.
- TANAKA (A.), YOSHIDA (S.), 1970 - Nutritional disorders of the rice plant in Asia. *Int. Rice Res. Inst. Tech. Bull.* 10.
- TANDANO (T.), 1974 - Iron nutrition of the rice plant. 5 Variation in susceptibility to iron toxicity during growth. *Soil Sci. and Plant Nutr.*, 21 : 303.
- TROLLDENIER (G.), 1977 - Mineral nutrition and reduction processes in the rhizosphere of rice. *Plant and Soil*, 47 : 193-202.
- TROLLDENIER (G.), 1981 - Iron toxicity in rice plants and nitrogenase activity in the rhizosphere as related to potassium application. *In Proc. Symp. on Paddy soils*, Springer Verlag, Berlin : 375-380.
- UREN (N.C.), 1982 - Chemical reduction at root surface. *J. of Plant Nutr.*, 5 (4-7) : 515-520.
- VAN BREMEN (N.), MOORMANN (F.R.), 1978 - Iron toxic soils. *In Soils and rice*. *Int. Rice Res. Inst.* : 781-800.
- VAN DER VORM (P.D.J.), VAN DIEST (A.), 1979 - Aspects of the Fe and Mn nutrition of rice plants. I. Iron and Manganese uptake by rice plants, grown under aerobic and anaerobic conditions. *Plant and Soil*, 51 : 233-246.
- VAN MENSVOORT (M.E.), LANTIN (R.S.), BRINKMAN (R.), VAN BREEMEN (N.), 1985 - Toxicities of wetland soils. *In Wetland soils : characterization, classification and utilization*. *Inter. Rice Res. Inst.*, Manille : 123-138.
- VIZIER (J.F.), 1974 - Contribution à l'étude des phénomènes d'hydromorphie. Recherche de relations morphogenétiques existant dans un type de séquence de sols hydromorphes peu humifères au Tchad. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, XII, (2) : 171-206 et (3) : 211-266.
- 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.*, XVI,(1): 23-41.
- VIZIER (J.F.), 1987 - Analyse des mécanismes d'adsorption et de désorption du fer ferreux dans les milieux saturés. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, XXIII, 3 :