

Étude du fonctionnement des milieux saturés d'eau

Une démarche physico-chimique

Jean-François VIZIER

Pédologue ORSTOM, antenne ORSTOM, auprès du CEA DPVE, Cadarache, 13108 St-Paul-lez-Durance

RÉSUMÉ

L'étude du fonctionnement des milieux saturés d'eau doit permettre de comprendre les rapides transformations qui s'y produisent. Une démarche physico-chimique peut être adoptée pour cette étude ; elle comporte deux types d'approche différents. Le premier type d'approche basé sur le suivi de paramètres physico-chimiques in situ, aboutit à une caractérisation de "l'ambiance physico-chimique" du milieu et de son évolution en fonction de la durée de saturation. Le deuxième type d'approche, basé sur l'étude de la dynamique du fer sur des modèles expérimentaux en laboratoire, peut être utilisé pour prévoir le comportement des sols lié au développement des processus d'oxydoréduction et en particulier à la réduction et à la mobilisation du fer qui interviennent dans de tels milieux saturés d'eau. Appliquée à des sols naturels ou transformés et cultivés, cette démarche physico-chimique permet une évaluation de l'hydromorphie ou encore une estimation de l'importance des transformations qui peuvent résulter de la saturation d'un sol par l'eau, avec les conséquences qu'elles peuvent avoir sur son évolution et son utilisation. Sur ce dernier point, cette démarche peut conduire à préconiser des modes de gestion des sols différents de ceux qui sont habituellement pratiqués.

MOTS-CLÉS : Sols hydromorphes - Anaérobiose - Oxydoréduction - Fer - Riziculture.

ABSTRACT

STUDY OF THE DYNAMICS OF WATERLOGGED ENVIRONMENTS. PHYSICO-CHEMICAL APPROACH

The object of the study of the dynamics of waterlogged environments is to understand origin of the transformations of organization or nature of the components of the soils. This study is possible with physico-chemical determinations, such as Eh, pH or amounts of reduced substances. A first approach consists of in-situ-measurements of physico-chemical parameters ; it allows a characterization of the physico-chemical conditions of the environment. A second approach consists in studying iron dynamics in laboratory models. This approach allows to forecast behaviour of waterlogged soils resulting from the development of oxidation-reduction processes and particularly from the reduction and the mobilization of iron in these soils. These physico-chemical approaches of dynamics study of waterlogged environments are applied to natural or transformed and cultivated soils. In these last cases, the knowledge of the dynamics can modify utilization of the soils.

KEY WORDS : Hydromorphic soils - Anaerobiosis - Oxidation-reduction - Iron - Rice cultivation.

INTRODUCTION

L'étude du fonctionnement des milieux saturés d'eau permet de comprendre les rapides transformations qui s'y produisent. Ces transformations participent à l'évolution de tels milieux et conditionnent leur utilisation.

Différentes voies peuvent être suivies pour apprécier les conséquences de ce mode particulier d'évolution des sols sous l'effet d'un excès d'eau, appelé hydromorphie.

La connaissance du fonctionnement des milieux saturés d'eau peut être indirectement déduite de l'étude de certains caractères morphologiques ou analytiques des sols, plus ou moins bien reliés à la saturation du sol par l'eau. La distribution de taches de couleur dans le sol ou la répartition de différentes formes d'un constituant permettent, par exemple, de distinguer des "classes d'hydromorphie" (JAMAGNE, 1967) ou des "types d'évolution hydromorphe" (NGUYEN KHA et DUCHAUFOR, 1969).

Le fonctionnement des milieux saturés d'eau peut aussi être directement abordé par l'étude de la dynamique actuelle des sols. Cette étude consiste à mesurer des durées de saturation, des flux hydriques dans le sol saturé, des délais de ressuyage (FAVROT, 1986) ou à suivre, dans le temps, les conséquences de cette saturation. Sur ce dernier point, une démarche physico-chimique peut être retenue pour l'étude d'un des aspects les plus originaux du fonctionnement de ces milieux, celui qui est lié à l'existence d'un déficit en oxygène.

Après un rappel des particularités de fonctionnement, d'évolution et d'utilisation des sols saturés d'eau, cet article se propose de faire le point sur la démarche physico-chimique qui peut être adoptée pour leur étude. Son application pour la résolution de divers problèmes posés par ces milieux est présentée, à travers deux types d'approche différents, sur des exemples qui en soulignent l'intérêt.

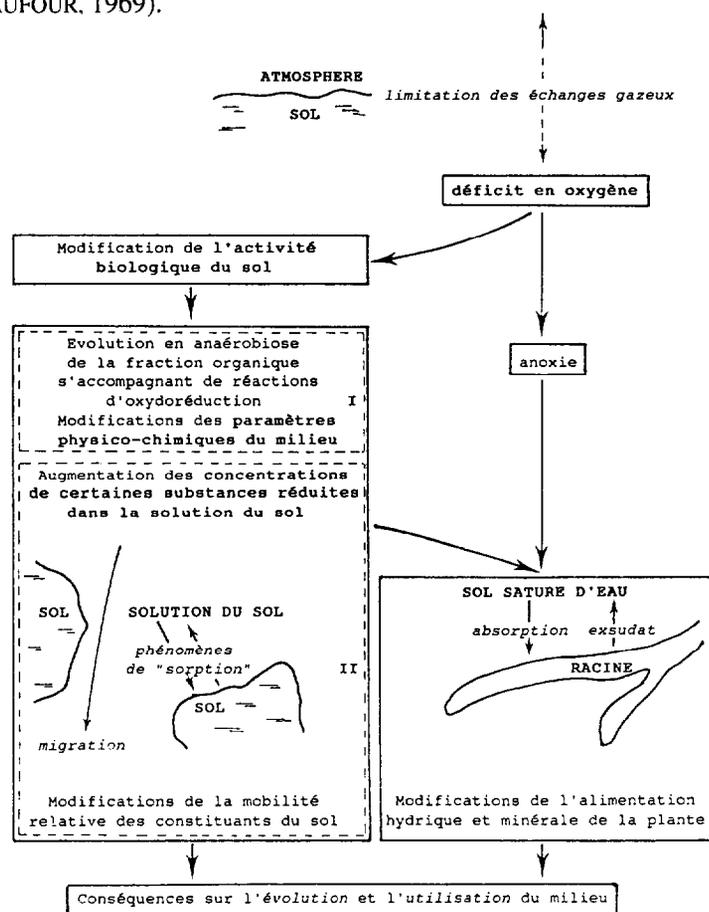


FIG. 1. – Particularités de fonctionnement des milieux saturés d'eau.
Dynamics particularities of waterlogged environment.

1. DONNÉES GÉNÉRALES SUR LE FONCTIONNEMENT, L'ÉVOLUTION ET L'UTILISATION DES MILIEUX SATURÉS D'EAU

Le fonctionnement des milieux saturés d'eau présente certaines particularités liées à l'existence d'un déficit en oxygène (fig. 1). Ces particularités se manifestent au niveau des transferts et des réactions à différentes interfaces (VIZIER, 1988).

La saturation, avec l'occupation de tout l'espace poral accessible par l'eau, limite les échanges gazeux à l'interface sol-atmosphère. Dans la solution du sol, la concentration volumique en oxygène est au moins trente fois plus faible que dans l'atmosphère (6 ml O₂/l dans de l'eau saturée en air à la pression atmosphérique, à 20°C), et sa vitesse de diffusion y est dix mille fois plus lente (10⁻¹² g.cm⁻².sec⁻¹, HOWELER et BOULDIN, 1971).

L'activité biologique du sol, influencée par l'aération du milieu, est fortement modifiée par le déficit en oxygène. La rapide consommation d'oxygène par les micro-organismes aérobies en début de saturation et son faible renouvellement dans le sol saturé d'eau, rendent le milieu anoxique. L'anoxie entraîne une diminution des populations bactériennes et fongiques aérobies et le développement de bactéries anaérobies (BERTHELIN, 1982).

L'évolution de la fraction organique, support carboné et énergétique des micro-organismes hétérotrophes, est différente de celle des milieux aérés. On note une limitation de la décomposition de la matière organique fraîche, la production et le maintien de composés hydrosolubles dans le sol, une insolubilisation et une humification aboutissant à la formation de substances peu polymérisées (DUCHAUFOR, 1977 ; CHEIKHZADEH-MOSSADEGH, 1981).

Le développement des micro-organismes anaérobies s'accompagne de la réduction de divers composés minéraux. Lorsque l'anoxie persiste, les nitrates, des composés manganiques, ferriques, les sulfates, le bioxyde de carbone, sont successivement réduits et forment de l'azote, des composés manganiques, ferreux, des sulfures, du méthane (TAKAI *et al.*, 1963 ; PONNAMPERUMA, 1972). Cette succession de réductions se répercute sur la valeur de certains paramètres physico-chimiques du milieu (Eh, pH).

Les substances réduites sont volatiles (azote, méthane), insolubles (sulfures) ou au contraire plus solubles que les formes oxydées, à l'instar des composés manganiques ou ferreux. Globalement, la mobilité relative des constituants des sols saturés d'eau est différente de celle des milieux aérés. Les substances réduites solubles migrent dans la phase liquide ou interagissent, à l'interface sol-solution du sol, avec les surfaces de la phase solide, par des phénomènes de "sorption" (adsorption, précipitation). La mobilité de

ces substances, modulée par les phénomènes de "sorption" contribue à modifier l'organisation des constituants du sol.

Les conséquences de la saturation du sol par l'eau ont fait l'objet de nombreuses recherches ; elles ont été étudiées dans des régions intertropicales par exemple, sur des milieux évoluant naturellement ou par suite d'une action anthropique sous l'effet d'un excès d'eau. Des transformations de l'organisation ou de la nature des constituants du sol ont ainsi été attribuées à sa saturation plus ou moins prolongée par l'eau. Il s'agit par exemple, de la modification de la composition de la fraction organique ou de la redistribution particulière du fer qui est à l'origine de différenciations morphologiques propres à ces sols (VIZIER, 1983). Ces transformations, caractéristiques de l'évolution des sols subissant un excès d'eau, sont importantes, rapides, saisonnières ou durables ; elles résultent de processus physico-chimiques et biologiques dont le développement est toujours fonction de la durée et de la continuité de la saturation du sol par l'eau. Le développement de ces processus est cependant modulé par de nombreux autres paramètres qui interviennent simultanément et interfèrent entre eux ; il dépend de la température, de la nature des constituants organiques ou minéraux du sol, mais également de l'importance des flux hydriques, donc de la conductivité hydraulique du milieu, de la géométrie de l'espace poral et de l'organisation des constituants du sol.

Ces transformations, dues au fonctionnement du système, réagissent aussi sur le système lui-même. Elles tendent par exemple à modifier le régime hydrique du sol. L'évolution particulière de la fraction organique, avec la formation de composés peu polymérisés à pouvoir réducteur et complexant élevé, facilite la réduction et la mobilisation du fer et tend à modifier les liaisons fer-argile qui interviennent dans la cohésion des agrégats. La fragilisation des agrégats favorise le phénomène de consolidation qui se traduit, dans les sols saturés d'eau, par une diminution du volume massique apparent et une modification de l'espace poral ; d'où les relations qui ont été parfois établies entre la réduction du fer et la diminution de la stabilité structurale ou de la perméabilité du milieu (MOTOMURA et YOKOI, 1969 ; SAITO et KAWAGUCHI, 1971).

Les conditions physico-chimiques qui existent dans les milieux saturés d'eau ont des répercussions sur leur utilisation. En effet, l'anoxie, la mobilité de certaines substances réduites se traduisant par leurs fortes concentrations dans la phase liquide, créent un environnement particulier pouvant perturber, à l'interface sol-racine, l'alimentation hydrique et surtout minérale des plantes (fig. 1).

2. MÉTHODE D'ÉTUDE DU FONCTIONNEMENT DES MILIEUX SATURÉS D'EAU : UNE DÉMARCHE PHYSICO-CHEMISTRIQUE

L'importance et la rapidité des transformations enregistrées dans les sols saturés d'eau, leurs répercussions sur l'évolution et l'utilisation de ces milieux, rendent nécessaire l'étude de leur fonctionnement (VIZIER, 1986). Il s'agit, pour de tels milieux, de connaître ou d'évaluer l'importance des transformations qui peuvent provenir de leur saturation par l'eau. Du fait de la multiplicité des paramètres qui interviennent dans le développement des processus qui sont à l'origine de ces transformations, il convient de *choisir les paramètres à mesurer* et les transformations à suivre, pour *évaluer* le plus aisément possible l'*hydromorphie*.

Cette *évaluation de l'hydromorphie* concerne aussi bien des sols naturels que des sols aménagés. Elle participe à la connaissance du fonctionnement d'écosystèmes naturels ou transformés et peut, dans le deuxième cas, constituer la base d'études prévisionnelles d'évolution des sols de périmètres aménagés.

Les différentes approches du fonctionnement des milieux saturés d'eau peuvent être envisagées à partir du schéma qui en représente les particularités (fig. 1).

L'étude du fonctionnement des milieux saturés d'eau et l'évaluation de l'hydromorphie ne peuvent se limiter à la connaissance de la durée de saturation du sol par l'eau. L'importance des transformations enregistrées dépend en effet de nombreux autres paramètres. La durée du déficit en oxygène n'apporte pas beaucoup plus d'informations, en raison de la rapidité avec laquelle cet élément disparaît, le plus souvent dès le début de l'occupation de tout l'espace poral par l'eau. Le choix de la méthode d'étude s'oriente donc sur le suivi, dans le temps, des conséquences du déficit en oxygène, c'est-à-dire des modifications de l'activité biologique du sol ou des variations des paramètres physico-chimiques qui l'accompagnent.

Les modifications de l'activité biologique peuvent être appréciées grâce à des techniques microbiologiques permettant par exemple de relier cette activité à des numérations de populations bactériennes ou à des concentrations de produits du métabolisme microbien. Ces techniques peuvent s'avérer longues et délicates à mettre en œuvre. De ce fait, la démarche qui consiste à suivre les variations de "l'ambiance physico-chimique" du milieu, constitue une bonne alternative pour approcher la connaissance du fonctionnement des milieux saturés d'eau. Cette *démarche physico-chimique* comporte deux types d'approche différents.

Un premier type d'approche consiste à estimer l'*intensité des processus d'oxydoréduction* à partir de

mesures réalisées *in situ*. Il s'agit de suivre *les variations de certains paramètres physico-chimiques* (I sur la figure 1), qui traduisent l'évolution de l'état d'oxydoréduction du sol et, plus particulièrement, le Eh et le pH, les réactions d'oxydoréduction associant souvent des protons à des échanges d'électrons. De telles mesures sont couramment réalisées dans les milieux naturels.

La *mesure du potentiel d'oxydoréduction* s'effectue à l'aide d'un système comprenant une électrode inerte (platine) jouant le rôle d'accepteur ou de donneur d'électrons vis-à-vis des ions de la solution dans laquelle elle est plongée et une électrode de référence (calomel saturé ou Ag/AgCl) qui fournit un potentiel connu et ferme le circuit électrique. L'utilisation d'électrodes combinées (Pt, calomel saturé ou Pt, Ag/AgCl) est maintenant très courante. Les potentiels sont exprimés par rapport à l'électrode normale à hydrogène. Les valeurs obtenues sont fonction du rapport des activités des formes réduites et oxydées et indiquent, en principe, l'état d'oxydation ou de réduction dans lequel se trouvent les composés minéraux susceptibles d'être réduits, la séquence de réduction précédemment présentée étant généralement respectée. A ce titre, le Eh peut être considéré comme étant un paramètre mesurant l'*intensité* des processus d'oxydoréduction qui se produisent dans les milieux saturés d'eau (PONNAMPERUMA, 1972). Il convient cependant de souligner que les valeurs obtenues sont souvent plus utilisées pour caractériser de façon qualitative ou semi-quantitative l'état d'oxydoréduction de ces milieux que comme des données électrochimiques susceptibles de faire l'objet d'une interprétation thermodynamique (BAAS BECKING *et al.*, 1960). De nombreux problèmes se posent en effet pour interpréter ces résultats. Ces problèmes sont dus à l'hétérogénéité des milieux dans lesquels les systèmes d'oxydoréduction ne sont pas en équilibre ; des écarts importants peuvent être obtenus entre les potentiels mesurés dans le sol saturé d'eau ou dans la solution du sol recueillie par exemple par gravité. D'autres problèmes sont relatifs au dispositif de mesure utilisé, certains produits des réactions d'oxydoréduction n'étant pas électroactifs vis-à-vis de la surface de platine de l'électrode inerte (BERNER, 1981). La méthode retenue pour la mesure du potentiel d'oxydoréduction tient compte de ces difficultés. La réalisation de la mesure dans la solution du sol écarte le problème de l'hétérogénéité du milieu, mais elle se heurte aux difficultés que présentent le recueil et la conservation d'une telle solution avant et pendant la mesure. Il paraît préférable d'effectuer cette *mesure dans le sol en place* et de faire, dans un milieu donné (un horizon, par exemple), *un nombre de répétitions*

qui est fonction de son hétérogénéité. 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. Ces variations tendent cependant rapidement à diminuer et la lecture de la mesure est faite quand la variation de Eh devient inférieure à 2 mV/minute, généralement dix à vingt minutes après la mise en place de l'électrode dans le sol (BOHN, 1968). Entre chaque mesure, l'électrode de platine est correctement nettoyée avec une solution acide et abondamment rincée à l'eau distillée. L'étalonnage de l'électrode combinée 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 du pH s'effectue à l'aide d'un système comprenant une électrode de verre et une électrode de référence qui complète le circuit électrique. Comme pour la mesure du Eh, l'utilisation d'électrodes combinées est très courante. La mesure peut être effectuée sur une suspension de sol ou *in situ*. Dans le premier cas, les valeurs obtenues dépendent du rapport sol/solution, de l'aération de la suspension, de son agitation ; elles sont fonction de l'activité des ions H⁺ présents dans la solution mais aussi des ions libérés par le sol. Il s'agit d'une caractérisation plus qualitative que quantitative du milieu. La méthode qui consiste à insérer directement l'électrode dans le sol paraît plus intéressante à adopter (GARRELS et CHRIST, 1967). La mesure est effectuée sur les mêmes emplacements et suivant un protocole analogue à celui de la mesure de Eh (attente de la stabilisation des valeurs du pH obtenue généralement quelques minutes après la mise en place de l'électrode, étalonnage, nettoyage de l'électrode par rinçage à l'eau distillée).

A la valeur du Eh et à celle du pH obtenues sur un site de mesure, correspond un point sur un diagramme Eh-pH. L'ensemble des points se rapportant aux mesures réalisées *in situ* peut contribuer à caractériser les conditions physico-chimiques existant dans le milieu étudié. La situation de ces points en effet, peut être comparée sur de tels diagrammes, à celle des domaines de stabilité des produits de différents systèmes redox, dont de nombreux exemples sont donnés dans la littérature (BAAS BECKING *et al.*, 1960 ; GARRELS et CHRIST, 1967).

A ces mesures de Eh et de pH sont souvent associées des dosages des formes réduites d'un élément, dans le

sol saturé d'eau. Le fer est l'élément le plus souvent étudié. C'est en effet par le système fer ferreux/fer ferrique que l'état d'oxydoréduction du sol paraît être le plus durablement contrôlé (PATRICK, 1981). Les teneurs en substances réduites obtenues, peuvent être rapportées à celles de différentes formes de cet élément dosées dans le sol aéré (fer ferreux/fer amorphe ou fer ferreux/fer total, par exemple). Les formes réduites et oxydées dont on compare les teneurs sont évidemment fonction des méthodes de dosage choisies, méthodes qu'il convient donc de bien préciser. Les valeurs obtenues, souvent associées à celles de Eh, permettent de définir des "classes d'intensité de réduction" pouvant également caractériser les conditions physico-chimiques d'un milieu.

Un deuxième type d'approche consiste à estimer les conséquences du développement des processus d'oxydoréduction sur certains aspects du fonctionnement des sols. Il s'agit en particulier de la mobilité d'éléments dont la solubilité est plus forte sous forme réduite (II sur la figure 1). Cette approche est réalisée par le suivi des concentrations des formes réduites d'un élément dans la solution du sol. Le fer est l'élément le plus souvent étudié pour des raisons déjà évoquées : différenciations morphologiques ayant valeur de diagnostic liées à la redistribution particulière du fer, son rôle dans l'agrégation et les conséquences de sa mobilité sur la stabilité structurale et la perméabilité de ces milieux, la présence de fortes concentrations de fer ferreux dans la solution du sol éventuellement préjudiciables à une nutrition minérale équilibrée des plantes.

Le suivi des concentrations en fer ferreux dans la solution du sol est difficile à réaliser à l'aide de capteurs implantés dans le sol (bougies poreuses en céramique, etc.). En dehors des problèmes de représentativité des échantillons prélevés par de tels dispositifs, et qui sont communs à tous les éléments présents dans la solution du sol (hétérogénéité de cette solution dont la composition est fonction des modalités de prélèvement), s'ajoutent des difficultés liées à la nature des formes du fer existant dans ces milieux (facilement oxydables, souvent fortement adsorbées sur les parois des capteurs). Il est donc nécessaire d'avoir recours à des méthodes de substitution et d'approcher la connaissance des variations de la concentration des formes de fer ferreux dans la solution du sol, sur des modèles expérimentaux en laboratoire.

Ces modèles expérimentaux consistent, par exemple, à recueillir sous atmosphère d'azote la solution percolant à travers une colonne de sol saturé d'eau et à y doser le fer ferreux. L'importance et la rapidité des transformations enregistrées dans les milieux saturés d'eau, permettent de réaliser des expérimentations

avec des protocoles imposant des conditions de température et hydriques (durée de saturation, renouvellement ou pas de l'eau saturant le sol) voisines de celles existant *in situ* et déterminant, avec la nature des constituants du sol, l'intensité des processus d'oxydo-réduction. Un échantillon de sol, de 100 à 300 g suivant les expériences, est mis dans une colonne de verre 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 centimètres au-dessus de celui du sol dans la colonne. Un percolat de 70 à 80 cm³ est recueilli avec une périodicité variable au bas de la colonne (5, 7 jours ou plus dans le cas d'essais simulant le fonctionnement de sol ayant un faible renouvellement de l'eau le saturant).

Les concentrations en fer ferreux dans la solution du sol ainsi recueillie par gravité, varient en fonction de la durée de saturation : elles augmentent puis, après un certain temps de saturation variable suivant les sols, elles diminuent. L'augmentation des quantités de fer

ferreux présentes dans la phase liquide susceptible de migrer par gravité est liée à la croissance des quantités de fer réduit dans le sol saturé d'eau. La diminution des quantités de fer ferreux présentes dans la phase liquide susceptible de migrer par gravité se produit sans que les quantités de fer réduit dans le sol aient décrû. Cette diminution correspond à une immobilisation progressive partielle du fer ferreux, due à son adsorption sur les surfaces de la phase solide du sol et à la formation de composés du fer peu solubles (VIZIER, 1983).

Ce deuxième type d'approche de la connaissance du fonctionnement des milieux saturés d'eau, basé sur l'étude de la dynamique du fer par une voie expérimentale en laboratoire, permet d'estimer la *capacité d'un milieu à réduire et mobiliser certains éléments réductibles* tels que le fer. L'importance de la mobilisation du fer ferreux permet de *prévoir les possibilités de transformation* de l'organisation des constituants du sol et *leurs conséquences sur certaines propriétés du milieu ou les risques de déséquilibre nutritionnel*

TABLEAU I
Étude du fonctionnement des milieux saturés d'eau
par une démarche physico-chimique. Les deux types d'approche.
*Study of the dynamics of waterlogged environments
by a physico-chemical approach. Two methods for this approach.*

Premier type d'approche

Objectif - Estimer l'intensité des processus d'oxydoréduction qui accompagnent les modifications de l'activité biologique résultant du déficit en oxygène dans les sols saturés d'eau.

Méthode - Suivi *in situ* des variations de paramètres physico-chimiques Eh, pH et des concentrations en substances réduites (fer ferreux), dans le sol saturé d'eau.

Résultat attendu - Caractérisation des conditions physico-chimiques du milieu : diagramme Eh-pH, "classes d'intensité de réduction".

Deuxième type d'approche

Objectif - Estimer la capacité d'un milieu saturé d'eau à réduire et mobiliser des éléments réductibles tels que le fer et à se transformer en fonction de l'intensité des processus d'oxydoréduction et des mécanismes qui modulent la mobilité des substances réduites.

Méthode - Dynamique du fer abordée par la voie expérimentale en laboratoire : suivi des concentrations en fer ferreux dans la solution du sol susceptible de migrer par gravité (à défaut d'avoir des méthodes satisfaisantes de prélèvement de solution du sol *in situ*).

Résultat attendu - Étude prévisionnelle du comportement des milieux saturés d'eau : susceptibilité d'un milieu à subir des transformations de l'organisation de ses constituants avec les conséquences que ces transformations peuvent avoir sur certaines propriétés du sol ; risques de déséquilibres nutritionnels pour les plantes, liés à la présence de fortes concentrations de substances réduites dans la solution du sol.

pour les plantes. Ce type d'approche est à préconiser pour les études prévisionnelles du comportement des sols saturés d'eau.

Les buts différents de ces deux types d'approche du fonctionnement des milieux saturés d'eau par une démarche physico-chimique sont rappelés dans le tableau I, avec les mesures ou dosages qu'ils mettent en œuvre. L'intérêt de l'application de ces deux types d'approche est présenté sur les exemples suivants.

3. APPLICATION DE LA DÉMARCHE PHYSICO-CHIMIQUE A L'ÉTUDE DU FONCTIONNEMENT DES MILIEUX SATURÉS D'EAU

3.1. Caractérisation des conditions physico-chimiques d'un milieu par des mesures de Eh, de pH et des dosages de fer ferreux réalisés dans les sols en place

Cette approche a été appliquée à l'étude physico-chimique des sols de rizières d'un bas-fond des Hautes

Terres de Madagascar (1). Un des objectifs de cette étude était de rechercher, dans le fonctionnement particulier de ces sols inondés 9 mois par an, les causes de la limitation de rendement obtenue dans certaines parties du bas-fond (VIZIER *et al.*, 1990).

Les mesures de Eh, de pH et les prélèvements pour les dosages du fer ferreux (2) ont été réalisés dans l'horizon superficiel "colluvio-anthropique" des sols de parcelles rizicultivées de l'amont, du centre et de l'aval du bas-fond, dont les principales caractéristiques sont rassemblées dans le tableau II. Ces mesures et prélèvements ont été effectués à des périodes particulières du cycle du riz : lors du repiquage, 20 puis 40 jours après cette opération culturale, c'est-à-dire au début du tallage (phase végétative), puis au début de l'initiation paniculaire (phase reproductive) et enfin juste avant la récolte (phase de maturation). Les moyennes des résultats obtenus dans les différen-

TABLEAU II
Principales caractéristiques des horizons de surface (0-25 cm) des sols de rizières du bas-fond étudié sur les Hautes Terres de Madagascar
Analytical characters of surface horizons (0-25 cm) of paddy soils studied on the Madagascar highlands

	Amont parcelle A	Centre parcelles B C D	Aval parcelle E
argile %	30	35	38
limons %	21	23	26
sables %	41	35	30
matière organique %	7,5	7,3	6,5
pH (eau)	4,9	5,0	5,2
Fer total (Fe%)	3,6	3,8	3,8

tes parcelles, à chacune de ces périodes, ont permis d'établir des relations entre les conditions physico-chimiques existant dans les sols des rizières inondées et les rendements des cultures.

Le pH mesuré dans les sols inondés augmente rapidement, de 5 en début de saturation, jusqu'à des valeurs proches de la neutralité. Ces valeurs du pH, tout comme celles de la température du sol mesurée régulièrement dans ces parcelles (20 à 24°C pendant le cycle cultural), permettent un bon développement du riz repiqué. Les écarts de rendements observés peuvent être attribués aux évolutions différentes de l'état d'oxydoréduction du sol des parcelles étudiées (fig. 2).

Quatre "classes" de réduction – faible, moyenne, forte et très forte – ont été définies par des valeurs de Eh et des teneurs en fer ferreux dans les sols saturés d'eau. Elles permettent de caractériser les conditions physico-chimiques de ces milieux et correspondent à peu près à celles adoptées par différents auteurs (PATRICK, 1981 ; YU TIEN REN, 1985).

Les conditions très fortement réductrices qui existent dans la parcelle étudiée dans la partie amont du bas-fond (A), saturée d'eau de façon quasi-permanente, sont préjudiciable au riz. Les rendements sont très faibles (< 0,8 t/ha) ; des phénomènes de toxicité dus à la présence de fortes quantités de fer ferreux sont

(1) Étude réalisée dans le cadre de l'ATP PIREN "Bilan hydrique et minéral d'un bas-fond des Hautes Terres de Madagascar"

(2) Par spectrophotométrie, après extraction du fer ferreux du sol par une solution de $AlCl_3$ à 0,2 %, centrifugation de la suspension de sol, filtration et complexation du fer par 2-2' dipyridyl (méthode VIZIER, 1969, modifiée).

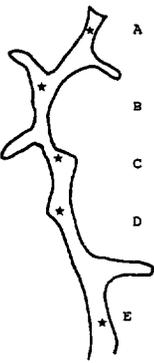
période de mesure	repiquage	20ème j après rep	40ème j après rep	avant récolte	RENDEMENTS t/ha	
	A	++++	++++	+++	<0,8	
	B	++	+++	+++	2,8	
	C	+	+++	+++	4,9	
	D	++	+++	+++	3,1	
	E	+	++	++	5,0	
$Fe^{2+} < 0,5\%$ $0,5\% < Fe^{2+} < 3,5\%$ $3,5\% < Fe^{2+} < 7,5\%$ $Fe^{2+} > 7,5\%$	+	++	+++	++++	$Eh > 200mV$ $0mV < Eh < 200mV$ $-100mV < Eh < 0mV$ $Eh < -100mV$	
		+	++	+++	++++	Réduction faible Réduction moyenne Réduction forte Réduction très forte

FIG. 2. – Situation des parcelles étudiées dans le bas-fond des Hautes-Terres de Madagascar et représentation schématique de l'évolution de l'état d'oxydoréduction des sols inondés.

*Situation of rice fields studied on the Madagascar highlands
and variations of the oxidation reduction status of their waterlogged soils.*

probables. Dans le reste du bas-fond, bien que les conditions optimales pour le riz correspondent à la "classe" de réduction moyenne (PONNAMPERUMA, 1978), les cultures ne semblent pas souffrir des conditions fortement réductrices qui prévalent pendant une partie de leur cycle. Par contre, un écart sensible semble devoir être attribué aux conditions existant lors du repiquage. Dans deux parcelles (B et D) situées à l'exutoire de diverticules du bas-fond inondés avant le repiquage, les conditions sont moyennement réductrices lors de cette opération culturale et les rendements ne sont que d'environ 3 t/ha. Dans deux autres parcelles (C et E), inondées au moment du repiquage et ne présentant à cette époque que des conditions faiblement réductrices, les rendements sont plus élevés (5 t/ha).

Cette étude suggère qu'il existe une certaine sensibilité du riz inondé à l'évolution de l'état d'oxydoréduction du sol et met en évidence des seuils à ne pas dépasser pendant certaines périodes ou toute la durée de la culture.

Le fait que la plante soit affectée par des conditions très fortement réductrices, qu'elle soit sensible à des conditions même modérément réductrices lors du

repiquage, devrait inciter le paysan à éviter une inondation prolongée ou trop précoce des rizières.

3.2. Étude prévisionnelle du comportement des sols saturés d'eau lié à la dynamique du fer, abordée par la voie expérimentale en laboratoire

Un premier exemple de ce type d'approche se rapporte à l'étude prévisionnelle des conséquences de la réduction et de la mobilité du fer dans les sols saturés d'eau, sur la modification de certaines de leurs propriétés.

Dans les expérimentations faites en laboratoire, le percolat est recueilli périodiquement au bas des colonnes de sol saturé d'eau, par l'ouverture d'un dispositif (régulateur de débit) devant assurer un écoulement constant et régulier de la solution du sol. On note cependant des variations plus ou moins importantes, suivant les sols, des vitesses d'écoulement en fonction du temps de saturation (1). La figure 3 représente les variations des vitesses d'écoulement des percolats recueillis après diverses durées de saturation et les pertes en fer ferreux par percolation (cumul des quantités de fer recueillies par percolation/fer total de la colonne de sol). Ces données concernent trois

(1) Colonnes de 120 g de sol avec des densités apparentes qui sont respectivement de 1,09, 1,20 et 1,07 pour les échantillons CTX 1-1, CTX 1-2 et NDK 7-1 ; recueil des percolats tous les 7 jours.

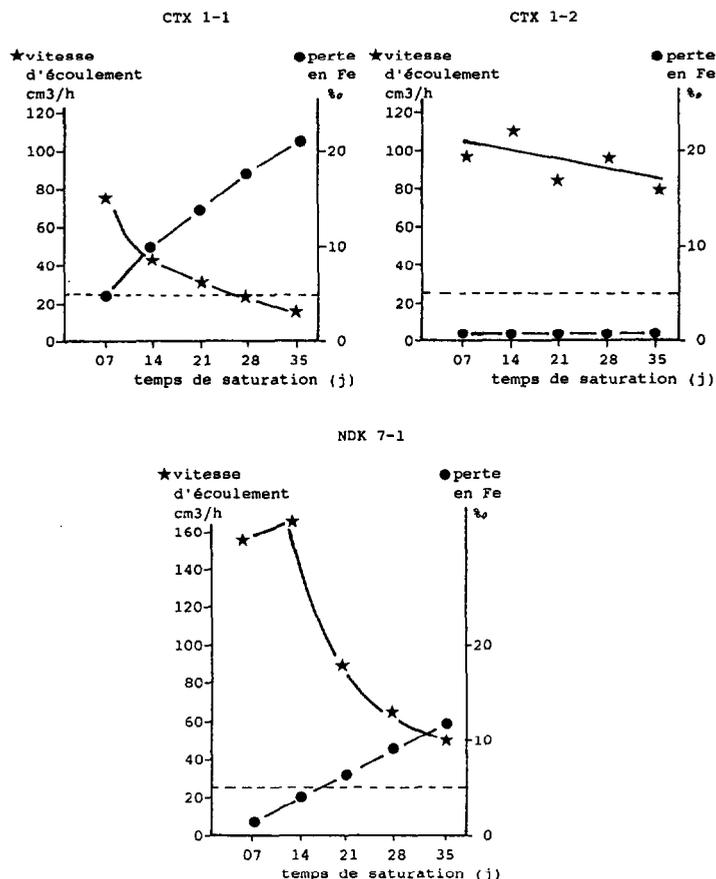


FIG. 3. – Évolution de la vitesse d'écoulement par gravité de la solution du sol et de la perte en fer mobilisé par réduction, en fonction du temps de saturation.
Relations between the flow rapidity of water through the soil and the amounts of leached ferrous iron, function of the saturation duration.

échantillons de sols provenant de la forêt de Cîteaux en France (CTX 1-1, CTX 1-2) ou du Nord-Cameroun (NDK 7-1), dont les principales caractéristiques sont rassemblées dans le tableau III.

Pour l'échantillon peu humifère CTX 1-2 (0,35 % de matière organique), les processus de réduction sont peu développés, la mobilisation du fer est faible, la vitesse d'écoulement de la solution du sol par gravité ne varie pas de façon sensible pendant la durée de l'expérience (35 jours de saturation).

Pour les échantillons humifères CTX 1-1 et NDK 7-1 (ayant respectivement 1,8 et 2,4 % de matière organique) dans lesquels les processus de réduction, plus importants, s'accompagnent d'une mobilisation notable du fer, on observe une *diminution de la vitesse d'écoulement d'autant plus forte que la quantité de fer ferreux entraînée par percolation est plus importante.*

Dans ces expériences, la diminution de la vitesse d'écoulement n'intervient que lorsque la quantité cumulée de fer entraînée par percolation depuis le début de la saturation représente au moins 0,5 % du fer du sol de la colonne ; ce qui se produit dès la première semaine de saturation pour l'échantillon CTX 1-1 et après la deuxième semaine de saturation pour l'échantillon NDK 7-1.

La *diminution de la vitesse d'écoulement*, vraisemblablement consécutive à la réorganisation des constituants du sol, n'est sensible que lorsqu'un certain seuil de mobilisation et de redistribution du fer est atteint. Reliée au développement des processus d'oxydoréduction et à la réduction du fer en particulier, la diminution de la vitesse d'écoulement de la solution du sol limite les flux hydriques dans les milieux saturés d'eau et favorise le maintien de leur saturation.

TABLEAU III
Principales caractéristiques des échantillons utilisés dans les études prévisionnelles
de comportement de sols saturés d'eau
Analytical character of samples utilized in previsional studies of behaviour of waterlogged soils

*Etude des modifications de certaines propriétés du sol
(application à des sols de la Forêt de Cîteaux en France CTX 1-1 et
CTX 1-2 et du Nord Cameroun NDK 7-1)*

	CTX 1-1	CTX 1-2	NDK 7-1
argile %	12	25	20
matière organique %	1,8	0,35	2,4
C%	10,4	2,1	14,0
N%	0,89	0,34	0,87
C/N	11,7	6,3	13,2
pH (eau)	4,75	4,75	5,45
Fer total (Fe%)	1,0	2,5	1,5

*Etude des risques de déséquilibre nutritionnel pour le riz
(application à des sols de bas-fonds aménagés du Moyen Ouest malgache)*

	AB 2	BE 4	MR 1
argile %	18	20	46
matière organique %	4,2	6,1	21,3
C%	24,2	35,0	123,0
N%	2,0	2,9	9,0
C/N	12,1	12,1	13,7
pH (eau)	5,0	5,5	4,3
Fer total (Fe%)	2,5	2,55	10,5

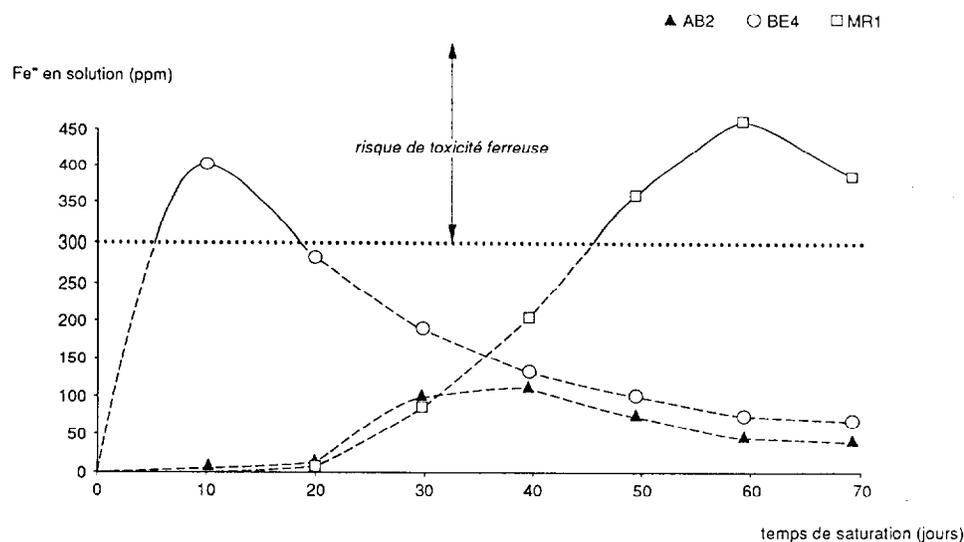


FIG. 4. – Variations des concentrations en fer ferreux dans la solution du sol de trois rizières
en fonction de la durée de saturation.
*Variations of ferrous iron concentrations in soil solution of three paddy soils,
function of the saturation duration.*

Un deuxième exemple de ce type d'approche se rapporte à l'étude prévisionnelle des risques de déséquilibres nutritionnels pour les plantes, pouvant résulter de concentrations élevées en fer ferreux dans la solution du sol.

La figure 4 représente les variations de la concentration en fer ferreux en fonction de la durée de saturation, obtenues sur les percolats recueillis périodiquement au bas de colonnes d'échantillons de sols saturés d'eau (1). Ces échantillons, dont les principales caractéristiques sont données dans le tableau III, proviennent de l'horizon superficiel des sols de trois rizières de bas-fonds aménagés du Moyen Ouest malgache (VIZIER, 1978). Les sols de ces rizières aménagées sur les versants (AB2, BE4) ou dans la partie basse des bas-fonds (MR1), sont inondés 6 mois par an, mais ont des caractères différents (qualité, quantité de matière organique) qui influencent leur fonctionnement lorsqu'ils sont saturés d'eau.

La valeur maximale de la concentration en fer ferreux dans la solution du sol et le temps de saturation pour lequel cette valeur est atteinte, sont importants à déterminer en regard des conséquences que ces concentrations peuvent avoir sur le développement du riz repiqué. La comparaison de l'évolution de ces concentrations, avec les valeurs pour lesquelles un risque de toxicité ferreuse est habituellement observé pour le riz (TANAKA *et al.*, 1966), doit permettre de préconiser un calendrier cultural, différent suivant les sols.

Pour le sol AB2 (4,2 % de matière organique totale), la concentration maximale en fer ferreux dans la solution du sol, légèrement supérieure à 100 ppm, est obtenue après 40 jours de saturation. Si le repiquage du riz a lieu au moment de l'inondation de la rizière, ce maximum modéré intervient à la fin de la phase végétative du riz : il n'induit pas de risque de toxicité pour la culture.

Pour le sol BE4, mieux pourvu en matière organique (6,1 %), la concentration maximale en fer ferreux dans la solution du sol est très importante (395 ppm) et intervient peu après le début de l'inondation (10 jours). Il existe un risque certain de toxicité ferreuse si le repiquage n'est pas différé d'une trentaine de jours après la mise en eau de la rizière, lorsqu'une certaine immobilisation du fer réduit en limite la concentration dans la solution du sol.

Pour le sol MR1, riche en matière organique légèrement hydrophobe (21,3 %), le maximum de concentration en fer ferreux dans la solution du sol intervient longtemps après le début de l'inondation de la rizière,

mais correspond à un risque certain de toxicité étant donné le niveau atteint (458 ppm).

CONCLUSION

Le fonctionnement des milieux saturés d'eau est important à connaître pour bien comprendre et évaluer les rapides transformations qui s'y produisent, en particulier du fait de l'absence d'oxygène qui, dans les sols, résulte de l'occupation de tout l'espace poral par l'eau.

Une démarche physico-chimique, comportant deux types d'approche différents, peut être adoptée pour l'étude du fonctionnement de ces milieux.

Le premier type d'approche est basé sur la réalisation de mesures dans le sol en place. Concernant principalement la détermination du potentiel d'oxydo-réduction, du pH et de teneurs en substances réduites dans le sol saturé d'eau, les résultats obtenus sont indicateurs du développement plus ou moins intense des processus d'oxydoréduction. Ce type d'approche permet de caractériser "l'ambiance physico-chimique" d'un milieu et d'en suivre l'évolution, en fonction de la durée de saturation. Appliquée à l'étude du fonctionnement d'un bas-fond rizicultivé, cette approche a mis en évidence l'existence de seuils de réduction préjudiciables au rendement des cultures, seuils qui, dans le cas étudié, sont atteints en certains points du bas-fond, lors de différentes phases du cycle du riz.

Le deuxième type d'approche est basé sur l'étude de la dynamique du fer, élément réductible susceptible d'être plus ou moins mobile dans les sols saturés d'eau. Cette étude, consistant en un suivi des variations des concentrations de fer ferreux dans la solution du sol, est réalisée sur des modèles expérimentaux en laboratoire. Cette approche est bien adaptée aux études prévisionnelles de comportement des sols saturés d'eau et aux conséquences que la mobilité du fer peut avoir sur certaines propriétés du sol ou l'alimentation minérale des plantes. L'application de cette approche à l'étude du fonctionnement de sols naturels ou aménagés permet de définir des seuils de mobilité du fer ferreux au-delà desquels la redistribution de cet élément ou sa présence dans la solution du sol, entraîne une modification de la conductivité hydraulique du milieu ou des risques de toxicité pour le riz.

Cette démarche physico-chimique, par l'une ou l'autre de ses approches, grâce à des mesures ou des dosages facilement réalisables *in situ* ou sur des modèles expérimentaux en laboratoire, permet de connaître et d'évaluer l'importance des transforma-

(1) Colonnes de 200 cm³ de sol avec des densités apparentes qui sont respectivement de 1,02 0,98 et 0,55 pour les échantillons AB2, BE4 et MR1 : recueil des percolats tous les 5 jours.

tions pouvant survenir dans un sol du fait de sa saturation par l'eau. Cette *évaluation de l'hydromorphie* peut être à la base d'une *meilleure utilisation des sols* en préconisant, dans le cas de la riziculture

par exemple, une conduite différente de l'inondation des rizières ou un calendrier cultural adapté au milieu.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 12 octobre 1990

BIBLIOGRAPHIE

- BERTHELIN (J.), 1982. – Processus microbiens intervenant dans les sols hydromorphes en régions tempérées. Incidence sur la pédogenèse. *Pédologie* XXXII, 3 : 313-328.
- BAAS BECKING (L.G.M.), KAPLAN (I.R.), MOORE (D.), 1960. Limits of the natural environment in terms of pH and oxidation reduction potentials. *Jour. Geol.*, 68, 3 : 243-284.
- BERNER (R.A.), 1981. – A new geochemical classification of sedimentary environments. *J. Sedim. Petrol.*, 51, 2 : 359-365.
- BOHN (H.L.), 1968. – Electromotive force of inert electrodes in soil suspensions. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 32, 2 : 211-215.
- CHEIKHZADEH-MOSSADEGH (D.), 1981. – Contribution expérimentale à l'étude de la géomicrobiologie du fer dans les sols. Thèse Doctorat d'État, univ. de Nancy I, 156 pp., *multigr.*
- DUCHAUFOR (P.), 1977. – Dynamique de la matière organique. In : "Pédologie. 1 Pédogenèse et classification". Masson, Paris : 28-70.
- FAVROT (J.C.), 1986. – Cartographie, caractérisation et interprétation des données pédologiques en vue du drainage agricole. In : Actes du Séminaire "Sol et Eau" (La Havane, avril 1985), *Coll. et Sem. ORSTOM* : 551-577.
- GARRELS (R.M.), CHRIST (C.L.), 1967. – Équilibre des minéraux et de leurs solutions aqueuses. Gauthier-Villars, Paris, 355 pp.
- HOWELER (R.H.), BOULDIN (D.R.), 1971. – The diffusion and consumption of oxygen in submerged soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 35, 2 : 202-208.
- JAMAGNE (M.), 1967. – Bases et techniques d'une cartographie des sols. *Ann. Agro.*, 18, n° hors série, 142 pp.
- MOTOMURA (S.), YOKOI (H.), 1969. – Characteristics of ferrous iron forms in paddy soils with reference to development of soil profile. *Soil Sci. and Plant Nutr.*, 15 : 38-46.
- NGUYEN KHA, DUCHAUFOR (P.), 1969. – Note sur l'état du fer dans les sols hydromorphes. *Science du Sol*, 1 : 97-110.
- PATRICK (W.H. Jr), 1981. – The role of inorganic redox systems controlling reduction in paddy soils. In : Proceedings of Symposium on Paddy Soils. Ed. Inst. of Soil Sci. Acad. Sin. : 107-117.
- PONNAMPERUMA (F.N.), 1972. – The chemistry of submerged soils. *Adv. in agronomy*, 24 : 29-96.
- PONNAMPERUMA (F.N.), 1978. – Electrochemical changes in submerged soils and growth of rice. In : Soils and Rice, IRRI : 421-441.
- SAITO (M.), KAWAGUCHI (K.), 1971. – Flocculating tendency of paddy soils. I Periodic changes in the physical properties of paddy soils under flooded conditions. *Soil Sci. and Plant Nutr.*, 18 : 125.
- TAKAI (Y.), KOYAMA (T.), KAMURA (T.), 1963. – Microbial metabolism in reduction process of paddy soils (Part. 2 et 3). *Soil Sci. and Plant Nutr.*, 9 : 176-180 et 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. and 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.*, VII, 3 : 435-445.
- VIZIER (J.-F.), 1978. – Étude de la dynamique du fer dans des sols évoluant sous l'effet d'un excès d'eau. Étude expérimentale sur des sols de rizières de Madagascar. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, XVI, 1 : 23-41.
- VIZIER (J.-F.), 1983. – Étude des phénomènes d'hydromorphie dans les sols des régions tropicales à saisons contrastées. Dynamique du fer et différenciation des profils. Thèse Doctorat d'État, univ. de Dijon et *Trav. et Doc. ORSTOM*, n° 165, 294 pp.
- VIZIER (J.-F.), 1986. – L'hydromorphie dans les sols. L'aspect pédogénétique en régions tropicales. In : Actes du Séminaire « Sol et Eau » (La Havane, avril 1985), *Coll. et Sem.*, ORSTOM : 499-512.
- VIZIER (J.-F.), 1988. – Le fer indicateur de l'hydromorphie. Étude de sa dynamique dans les sols subissant un excès d'eau. *Bull. du GFHN*, n° 23 : 25-38.
- VIZIER (J.-F.), DE GIUDICI (P.), RAUNET (M.), 1990. – Étude physico-chimique des sols de rizières d'un bas-fond sur les Hautes Terres de Madagascar. Conséquences pour la riziculture (à paraître dans *Agron. Trop.*).
- YU TIEN REN, 1985. – Physical chemistry of paddy soils. Science Press, Beijing. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 217 pp.
- ZOBELL (C.E.), 1946. – Oxidation reduction potential of marine sediments. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, 30 : 477-513.