

# 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

Jean-François VIZIER

*Pédologue ORSTOM, BP 375, Lomé (Rép. du Togo)*

### RÉSUMÉ

*Cette étude expérimentale réalisée sur des échantillons provenant de sols de rizières, permet de préciser quelques aspects de la dynamique du fer dans les sols hydromorphes. Ces précisions portent sur le rôle de la matière organique, sur le développement des conditions réductrices dans les sols saturés par l'eau et sur l'allure du phénomène d'appauvrissement de la terre en fer résultant de la réduction du fer.*

### ABSTRACT

STUDY OF IRON DYNAMICS IN GROUNDS BEING FORMED UNDER THE ACTION OF EXCESS WATER. EXPERIMENTAL STUDY OF GROUNDS IN RICE FIELDS OF MADAGASCAR.

*Some features of the iron dynamics in the hydromorphic soils have become clearer through this experimental study conducted on samples from rice field soils. These details concern the role of organic matter, the development of reducing conditions in soils saturated by water, and the rate of iron impoverishment in the ground as a result of iron reduction.*

### PLAN

#### INTRODUCTION

#### 1. LES SOLS - OBJETS DE L'ÉTUDE - LEURS PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES

- 1.1. Les sols de flancs de bas-fonds et de bas de pente
- 1.2. Les sols des parties basses des bas-fonds

#### 2. PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

- 2.1. Conditions d'évolution à simuler par l'expérimentation
- 2.2. Etablissement du protocole expérimental
- 2.3. Analogies existant entre les conditions naturelles d'évolution des sols aménagés et les conditions expérimentales

#### 3. LES PRINCIPAUX RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

- 3.1. Variations du potentiel d'oxydoréduction de la terre et du pH, en fonction de la durée de saturation
- 3.2. Les pertes en carbone organique et en fer subies par les échantillons
- 3.3. Relations existant entre les poids des matières exportées, le potentiel d'oxydoréduction de la terre, le pH et la conductivité

#### 4. ESSAI D'INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET DE L'ALLURE DES PHÉNOMÈNES OBSERVÉS

- 4.1. Remarques sur le rôle de la matière organique dans le développement des phénomènes de réduction
- 4.2. Remarques sur la dynamique du fer

#### CONCLUSIONS

#### BIBLIOGRAPHIE

## INTRODUCTION

Cette étude expérimentale a été réalisée dans le cadre d'un programme de recherches, dont le but était de connaître les modifications intervenant après aménagements hydroagricoles, dans des sols évoluant sous l'effet d'un excès d'eau, à Madagascar (Vizier, 1976).

L'aménagement de rizières dans les bas-fonds du Moyen Ouest malgache consiste :

— à *irriguer* des sols de flancs de bas-fonds ou de bas de pente, mis en terrasses (petites surfaces aplanies et endiguées) ; les profils de ces sols se différenciant dans un matériau complexe ayant subi une évolution ferrallitique composé de colluvions provenant des sols ferrallitiques des plateaux et de la zone d'altération de ces mêmes sols ;

— à *drainer* les sols des parties basses des bas-fonds, riches en matière organique et qui présentent avant aménagement un aspect de « prairie flottante », le mât racinaire, épais de 60 à 80 cm, étant décollé du sol par l'importante masse d'eau qui circule subsurface.

La démarche méthodologique adoptée pour ce programme a consisté :

— à mettre en évidence les *différences* qui existent entre *sols* équivalents (sols de flancs de bas-fonds ou des parties basses) *non aménagés* ou *aménagés* depuis plus ou moins longtemps,

— à essayer d'expliquer les modifications observées, par le *comportement* de ces sols dans les conditions nouvelles d'évolution résultant des aménagements.

C'est cette dernière partie concernant le comportement des sols, réalisée sur des *modèles expérimentaux*, qui est développée dans cette étude.

### 1. LES SOLS - OBJETS DE L'ÉTUDE - LEURS PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES

#### 1.1. Les sols de flancs de bas-fonds et de bas de pente

Les profils se différencient sur un matériaux sablo-argileux, les taux d'argile variant entre 15,5 et 23 % dans des 70 premiers centimètres, tandis que ceux de limons (2-50  $\mu$ ) représentent 12 à 20 %. La fraction sableuse grossière (supérieure à 200  $\mu$ ) domine, le rapport sables fins/sables grossiers étant compris

entre 0,27 et 0,37. Ces profils ont un bon drainage interne.

L'attaque triacide laisse un important résidu (plus de 50 %), résidu dans lequel la détermination minéralogique révèle dans tous les cas, la présence exclusive de quartz et de feldspath (1). Le rapport  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  est égal ou légèrement supérieur à 2. L'analyse thermique différentielle et l'étude thermopondérale (2) effectuées sur la fraction 0-2  $\mu$ , montrent que l'argile est kaolinitique ; on note également la présence de gibbsite.

Trois profils ont été étudiés :

- AB 1 (bas-fond d'Ambalahazo), sol de bas de pente non aménagé,
- AB 2 (bas-fond d'Ambalahazo), sol de bas de pente aménagé depuis 10 ans,
- BE 4 (bas-fond de Belagera-nord), sol de flanc de bas-fond, aménagé depuis 10 ans.

La différence existant entre les deux sols aménagés réside dans les conditions d'irrigation.

Le premier (AB 2), en bas de pente, est irrigué et inondé pendant 5 mois par an (culture du riz), par de l'eau amenée par des canaux et provenant d'une retenue située en tête de bas-fond. Cette eau est peu riche en fer (2,9 mg/l de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

Le deuxième sol (BE 4) est saturé et inondé pendant 5 mois également, grâce à la retenue, par les diguettes, de l'eau des résurgences qui existent à mi-pente sur les flancs des bas-fonds. Cette eau est riche en fer (15,4 mg/l de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Ce type de sol, sans être saturé, reste humide pendant la saison sèche (mai-septembre).

Par rapport au sol-témoin AB 1, les modifications constatées dans les sols aménagés affectent essentiellement les horizons superficiels humifères. Ces modifications portent sur :

— *Les quantité et qualité de la matière organique* : épaisseur plus importante des horizons humifères qui passent de 15 à 40-50 cm ; teneurs en matières organiques plus élevées (4,2 et 6 % contre 3,3 % dans le sol témoin) ; proportion plus forte d'acides fulviques, le rapport acides fulviques/acides humiques étant toujours supérieur à 0,5 dans les sols aménagés contre 0,3 dans le sol-témoin.

(1) Détermination réalisée au Laboratoire de Spectrographie des SSC de l'ORSTOM à Bondy.

(2) Analyses effectuées au Laboratoire des Sols du CNRA à Versailles.

— Les teneurs en fer, plus faibles dans les sols aménagés : le rapport  $Fe_2O_3$ /argile passe de 22,6 % dans le sol-témoin à 12,6 - 13,8 % dans les sols aménagés.

— La saturation du complexe absorbant, plus faible dans les sols aménagés, où elle est comprise entre 13 et 28 % contre 46 % dans le sol-témoin.

## 1.2. Les sols des parties basses des bas-fond

Les profils se différencient sur un matériau plus fin, les taux d'argile et de limons (2-50  $\mu$ ) étant respectivement compris entre 40 et 50 % et 20 et 30 %. Le drainage de ces parties basses, en accélérant l'écoulement de l'eau, permet d'obtenir la « stabilisation » de l'horizon superficiel de ces « prairies flottantes » riche en matière organique, puis son évolution qui est favorisée par l'apparition de périodes de non-saturation du sol par l'eau. Cette évolution se traduit aussi par un tassement du sol, tandis qu'une structure très stable, laissant de larges vides entre les agrégats, se développe peu à peu assurant au sol un bon drainage interne.

Trois profils ont été étudiés :

- AN 1 (bas-fond d'Antsapanimahazo), « prairie flottante » non aménagée,
- AN 2 (bas-fond d'Antsapanimahazo), sol « stabilisé » après deux années de drainage,
- MR 1 (bas-fond de Morafeno), sol aménagé depuis 10 ans.

Les modifications résultant de l'aménagement affectent essentiellement les horizons superficiels humifères et sont les suivantes :

— diminution de l'épaisseur de l'horizon organique s'accompagnant d'une augmentation de la densité apparente (0,25 à 0,55);

— baisse des teneurs en matières organiques (35 à 21 %) qui sont mieux évoluées, le rapport C/N passant de 18,5 à 13,7 et le taux d'extraction des matières humifiées de 9,3 % à 37,8 %;

— le taux de saturation du complexe absorbant déjà faible (20 %) s'abaisse à 10 % dans le sol aménagé depuis 10 ans;

— les teneurs en fer des différents sols ne sont pas comparables, en raison de la richesse en cet élément des eaux d'ennoyage des rizières des parties basses des bas-fonds (Didier De Saint Amand, 1967).

## 2. PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

L'étude du comportement des sols dans les nouvelles conditions d'évolution résultant des aménagements hydroagricoles, réalisée sur des modèles expérimentaux, est un *essai de schématisation de la dynamique actuelle des profils*.

### 2.1. Conditions d'évolution à simuler par l'expérimentation

Les aménagements modifient le régime hydrique des sols.

Dans le cas des *sols irrigués* (rizières de bas de pente ou de flanc de bas-fond), la modification du régime hydrique se caractérise par l'apparition d'une période de cinq mois de saturation du sol par l'eau. *Avant aménagement*, ces sols (profil AB 1, par exemple) ont à la fois un bon drainage interne et externe et leur régime hydrique est fonction de l'intensité et de la fréquence des pluies. La région de Mahasolo-Kianjao dans laquelle ont été étudiés les sols de divers bas-fonds, objets de ce programme, a un climat qui se caractérise par l'alternance d'une *saison chaude et pluvieuse qui dure sept mois*, d'octobre à avril (total des précipitations : 1 596 mm, températures moyennes mensuelles comprises entre 23° à 23,9 °C et d'une *saison fraîche et sèche* de cinq mois, de mai à septembre (total des précipitations : 59,2 mm, températures moyennes mensuelles comprises entre 19° et 21,9 °C). Les profils sont humides sans toutefois être saturés d'octobre à avril et se dessèchent de mai à septembre. L'aplanissement du sol, la mise en terrasse et l'endiguement annulent le drainage externe. L'apport complémentaire d'eau par les canaux d'irrigation (bas de pente : profil AB 2) ou par les résurgences (flanc de bas-fond : profil BE 4) assure l'inondation des rizières pendant cinq mois de décembre à avril.

Dans le cas *des sols* des parties basses des bas-fonds, *drainés*, la modification du régime hydrique se caractérise par l'apparition d'une période de dessèchement des horizons superficiels des profils pendant la saison sèche.

Dans tous les cas le drainage interne des sols aménagés est bon : caractère existant déjà dans les sols de bas de pente et de flancs de bas-fonds avant l'aménagement, caractère acquis par le développement d'une structure stable dans les sols des parties basses drainées. Le régime hydrique est le même pour tous

les sols aménagés, qu'ils soient irrigués ou drainés ; ce régime se caractérise par :

— une période de saturation de la terre avec, du fait du bon drainage interne des profils, possibilités de mouvements d'eau verticaux dans les horizons superficiels ;

— une période de dessèchement des profils pendant la saison sèche, dessèchement plus ou moins accentué suivant l'ancienneté de l'aménagement dans le cas des sols drainés, la position topographique dans le cas des sols irrigués (alimentation en eau faible mais continue des sols de flancs de bas-fonds, par les résurgences pendant la saison sèche).

## 2.2. Etablissement du protocole expérimental

Le protocole expérimental adopté est identique à celui qui avait été utilisé pour l'étude du rôle des mouvements de l'eau sur la dynamique du fer dans une séquence de sols hydromorphes au Tchad (Vizier, 1974). Le but de ces expériences est de connaître les pertes que subissent les échantillons de sols provenant des horizons superficiels humifères des profils étudiés (horizons qui subissent les transformations les plus importantes), lorsqu'une partie de l'eau qui les sature s'écoule par gravité. On suit ainsi, en fonction de l'état d'oxydoréduction de la terre et de la durée de saturation, les pertes en fer et en carbone organique.

On opère sur 200 cm<sup>3</sup> d'échantillon mis dans des colonnes de verre de 4 cm de diamètre. La terre est

tassée de façon à reproduire la densité apparente du sol *in situ* (d'où des poids de terre sèche à mettre dans les colonnes, indiqués dans le tableau I).

TABLEAU I

Echantillons	AB11 0-10 cm	AB21 0-10 cm	BE41 0-10 cm	AN11 0-15 cm	AN21 0-15 cm	MR11 0-10 cm
$d_b$ . . . . .	1,09	1,02	0,98	0,20	0,25	0,55
Poids de terre sèche dans la colonne en g.	218	204	196	40	50	110

Pour éviter toute modification pouvant être due à un dessèchement trop fort de la terre, les échantillons sont mis en colonne à une humidité proche de celle du sol en place au moment du prélèvement (c'est-à-dire fin août, en saison sèche). Cette humidité est déterminée en même temps que la mise de la terre en colonne, ce qui permet de connaître les poids de terre humide à mettre dans les colonnes (1).

(1) Il est évident que cette humidité est inférieure à celle du sol en place, pour les échantillons AN 11 et AN 21, une partie de l'eau les saturant ne pouvant être récupérée au moment du prélèvement.

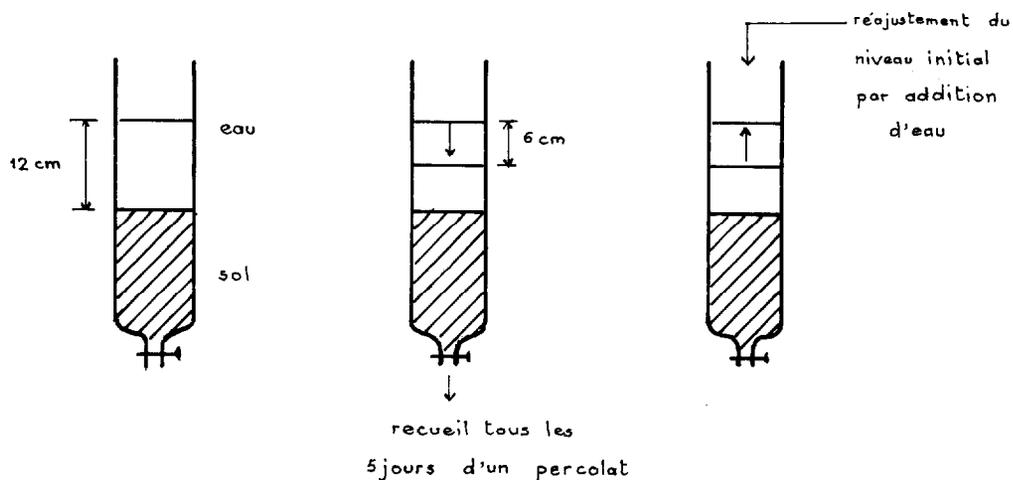


FIG. 1. — Schéma de l'installation expérimentale.

Les échantillons sont saturés par addition d'eau distillée et on amène le niveau de l'eau dans la colonne 12 centimètres au-dessus de celui de la terre (voir fig. 1). Tous les cinq jours, on mesure le potentiel d'oxydoréduction de la terre de la colonne, puis on laisse écouler une partie de l'eau qui percole à travers l'échantillon jusqu'à ce que le niveau de l'eau ait baissé de 6 centimètres. On recueille le percolat et on rétablit le niveau d'eau initial dans la colonne. Sur le percolat (environ 75 cm<sup>3</sup>), on effectue immédiatement une mesure de pH, de conductivité et on dose sur des aliquotes le carbone organique (méthode Walkley et Black), le fer (après attaque HC 1 à chaud) et, une fois sur deux, toujours sur une aliquote, on pèse le résidu sec obtenu après séchage à l'étuve.

Ces expériences ont été menées pendant 75 jours et faites deux fois pour les échantillons AB 11, AB 21, BE 41, MR 11 et une fois pour les échantillons AN 11 et AN 21.

### 2.3. Analogies existant entre les conditions naturelles d'évolution des sols aménagés et les conditions expérimentales

On va s'efforcer de préciser ce que représentent la quantité d'eau recueillie à chaque percolation par rapport à la quantité d'eau qui sature la terre, les éléments dosés dans les percolats, les quantités d'eau mises en jeu dans l'expérimentation par rapport à celles que reçoivent les rizières, et comparer enfin la vitesse de percolation et la température, facteurs qui peuvent avoir une influence sur la dynamique du fer, dans les conditions naturelles et expérimentales.

Pour un échantillon provenant d'un horizon humifère d'un sol de flanc de bas-fond ou de bas de pente, ayant une densité apparente voisine de 1 (voir tabl. I) et une densité réelle estimée à 2,6, la porosité calculée est de 61 %. Les vides dans les 200 cm<sup>3</sup> de sol mis en colonne représentent donc environ 120 cm<sup>3</sup>, c'est le volume d'eau que doit contenir la terre pour être saturée. L'humidité pondérale initiale de l'échantillon au moment de la mise en colonne est de l'ordre de 2 %, ce qui représente 4 cm<sup>3</sup> d'eau. L'humectation de la terre en début d'expérience, s'effectue très lentement (en 2 ou 3 heures), le système de purge situé à la base des colonnes étant ouvert (voir fig. 1). Il faut ajouter entre 80 et 90 cm<sup>3</sup> d'eau pour obtenir un début d'écoulement au bas de la colonne. On peut supposer que l'eau ainsi rajoutée est assez fortement retenue par la terre et ne migre pas facilement par gravité. Ce n'est

donc que le complément nécessaire pour obtenir la saturation, soit 26 à 36 cm<sup>3</sup>, qui migrerait facilement par gravité.

Pour un échantillon provenant de l'horizon humifère d'un sol des parties basses des bas-fonds aménagés (échantillon MR 11), la densité apparente étant de 0,55 et la densité réelle étant estimée comprise entre 2,1 et 2,3, la porosité calculée est de 74 à 76 %. L'humidité initiale de la terre est de 15 % et la quantité d'eau à ajouter pour obtenir un début d'écoulement en bas de colonne étant de 70 cm<sup>3</sup>, par un raisonnement analogue à celui effectué précédemment, on conclut que la quantité d'eau susceptible de migrer facilement par gravité est de 62 à 66 cm<sup>3</sup>.

Dans les deux cas, le volume recueilli à chaque percolation (75 cm<sup>3</sup> environ) est supérieur à la quantité d'« eau libre » migrant facilement par gravité; il correspond donc vraisemblablement à toute l'eau qui, dans la terre peut migrer facilement, plus une partie de l'eau située au-dessus de la surface de la terre dans la colonne et qui s'écoule à travers le sol en empruntant les plus gros pores.

Pendant la période de 5 jours séparant deux percolations, des réactions vont se produire dans la terre saturée (oxydation de la matière organique, réduction d'éléments oxydés tel que le fer), puis par complexation, mise en solution ou pseudosolution, une partie des substances résultant des réactions précédentes vont se trouver tout d'abord dans l'eau fortement retenue par la terre (eau interstitielle) puis peu à peu, par simple diffusion dans l'eau dite « libre ». Ainsi on peut supposer qu'en recueillant à chaque percolation toute « l'eau libre » on aura dans le percolat des substances dont les quantités refléteront bien l'intensité des phénomènes qui se produisent dans la terre saturée. On avait d'ailleurs constaté, lors de l'étude expérimentale, déjà mentionnée, réalisée sur des sols hydromorphes au Tchad, que pendant les 20 premiers jours de saturation d'un échantillon provenant d'un gley de surface, la quantité totale de fer recueillie pour un temps de saturation donné, était indépendante du nombre de percolation et du volume d'eau percolé pourvu que celui-ci soit suffisant et cela semblait être le cas dans ces expérimentations, dont le protocole a été repris pour cette étude.

Les quantités d'eau apportées à la terre de la colonne représentent 115 à 130 cm<sup>3</sup> en début d'expérience pour amener la terre à saturation, puis 16 fois 75 cm<sup>3</sup> par les réajustements successifs du niveau initial de l'eau dans la colonne après chaque percolation. Pour une surface de sol, dans la colonne d'environ 13 cm<sup>3</sup>, l'apport d'eau pendant les 75 jours d'expérience

correspond à environ 1 000 mm de pluie. Partant de la terre non saturée, l'expérimentation vise à simuler les conditions d'évolution du sol pendant la première moitié de la culture du riz, donc du mois de décembre à la mi-février. Pendant la saison sèche et jusqu'au mois de novembre, l'évapotranspiration potentielle étant supérieure aux précipitations, les sols sont encore peu humides au début du mois de décembre (Riquier, 1959). Entre décembre et la mi-février, les rizières reçoivent en moyenne 850 mm de pluies, auxquels s'ajoutent les apports d'eau des résurgences ou d'irrigation (1). On peut donc estimer que les quantités d'eau ajoutées à la terre pendant l'expérimentation, correspondent à peu près aux apports reçus par un volume équivalent de sol de rizière pendant une période d'égale durée.

La vitesse de percolation moyenne pendant toute l'expérience peut être calculée en considérant la baisse du niveau de l'eau de 6 cm qui se produit tous les cinq jours. Cela représente une perméabilité moyenne de 0,5 mm/h. Si on considère par contre, la vitesse de percolation au cours d'une seule manipulation, l'opération durant environ 3 h, on obtient une perméabilité de 2 cm/h. Suivant les sols, les rizières ont besoin d'un apport d'eau variable pour assurer le maintien de l'inondation. D'après différents travaux, ces apports correspondent à des pertes équivalentes de 0,4 mm à 2 cm/h. Par conséquent, que l'on considère la vitesse de percolation moyenne ou celle d'une seule opération, on se trouve dans la gamme de perméabilité des sols de rizières.

La température enfin, dont le rôle sur le développement des phénomènes d'oxydoréduction a été souvent démontré (Meek *et coll.*, 1968, par exemple), est, au cours de l'expérimentation (22-25 °C), sensiblement la même que celle que l'on peut relever pendant la saison des pluies.

Les points précédemment évoqués, permettent de constater une certaine analogie entre les conditions naturelles et les conditions expérimentales, l'expérimentation simulant un régime hydrique global moyen pour des sols de rizières. Par contre, les conditions expérimentales diffèrent des conditions naturelles sur deux points. D'une part, il est très vraisemblable que les quantités d'eau drainant à travers les profils varient au cours de la période d'inondation des sols et d'autre part la qualité de l'eau apportée à la terre des colonnes (eau distillée) est différente de celle que

reçoit le sol en place : eau des précipitations, plus apports complémentaires dont on a déjà souligné la richesse plus ou moins grande en fer.

### 3. LES PRINCIPAUX RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

On exposera successivement les résultats concernant : les variations du potentiel d'oxydoréduction de la terre, du pH, du percolat et des pertes relatives en fer et en carbone de la terre de la colonne en fonction du temps de saturation. Toutes ces substances recueillies correspondent à une perte en poids de la colonne, perte que l'on peut connaître par la pesée des différents résidus obtenus par évaporation du percolat puis séchage à l'étuve.

#### 3.1. Variations du potentiel d'oxydoréduction de la terre et du pH, en fonction de la durée de saturation

Les variations du potentiel d'oxydoréduction dans des sols saturés par l'eau permettent de juger de la vitesse de développement des conditions réductrices dans le sol. L'effet favorable de la matière organique sur le développement de telles conditions a déjà été plusieurs fois démontré (Motomura *et coll.*, 1962 ; Aomine, 1962 ; Meek *et coll.*, 1968 ; Vizier, 1970).

Le tableau II rassemble, pour chaque échantillon, les données suivantes : pourcentage de matière organique (M.O. %), taux d'extraction des matières humifiées (T.E. %), les valeurs de  $E_h$  et de pH correspondant à des temps de saturation différents, les valeurs minimales de  $E_h$  et les valeurs maximales de pH étant soulignées. La figure 2 représente les variations de  $E_h$  et de pH en fonction de la durée de saturation.

On constate que les valeurs de  $E_h$  diminuent plus ou moins rapidement de 525 à 750 mV en début d'expérience pour atteindre un minimum voisin de 0 mV (-60 à +105 mV), avant de se stabiliser dans une gamme comprise entre -40 et +140 mV. On remarque que la baisse de  $E_h$  est rapide dans l'échantillon BE 41 provenant du sol de flanc de bas-fond aménagé, sol qui *in situ* reste toujours humide mais qui n'a pas la plus forte teneur en matière organique ; elle est plus lente pour tous les autres échantillons. On verra plus loin que l'importance de l'effet de la matière organique sur le développement des phénomènes de réduction n'est pas seulement fonction de la quantité de substances organiques mais aussi de la qualité de celles-ci.

(1) Ces apports complémentaires sont très difficiles à estimer *in situ*.

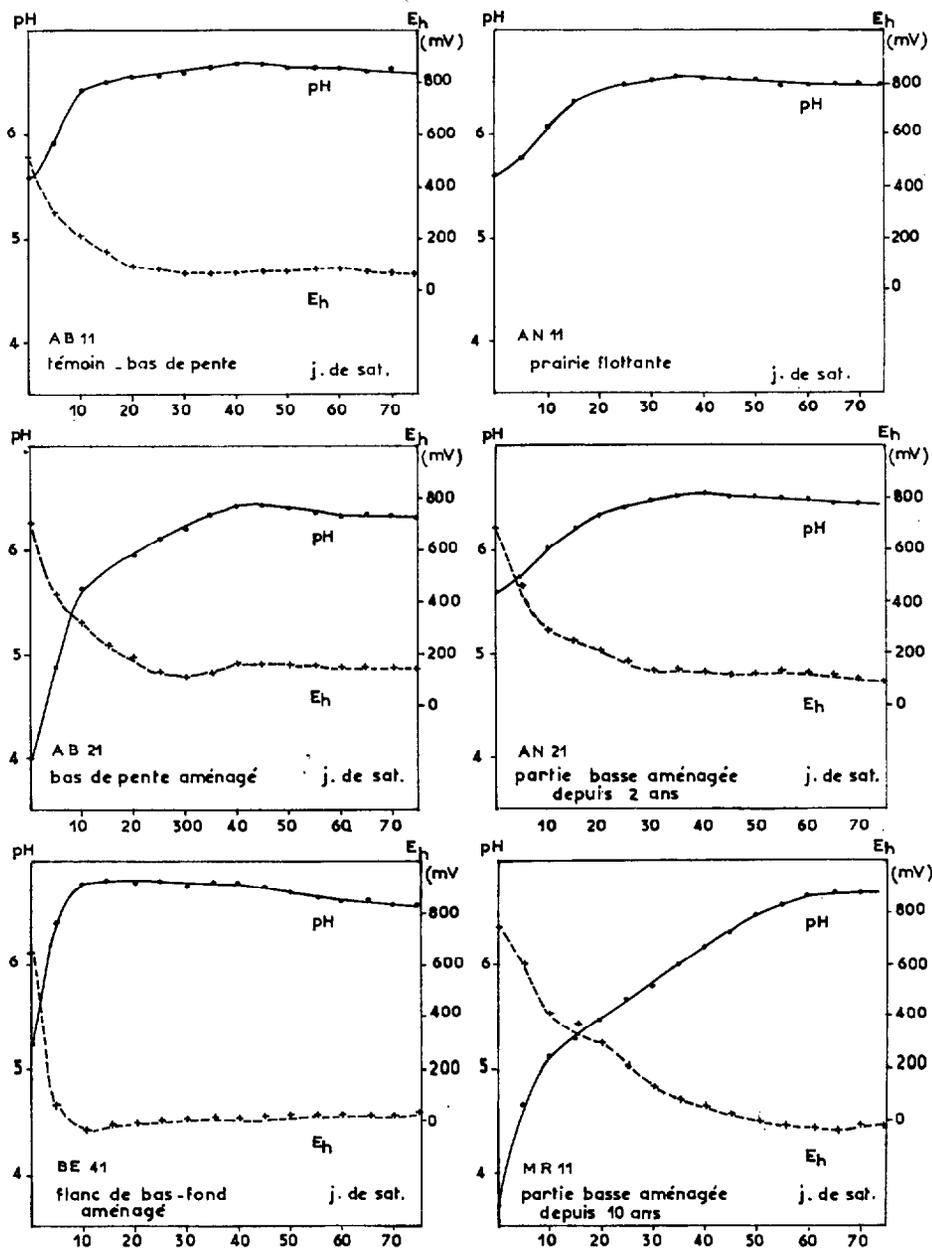


FIG. 2. — Variation de  $E_h$  et pH en fonction du temps de saturation.

TABLEAU II

Echantillons	MO %	TE %		Valeurs de $E_h$ et de pH après x jours de saturation							
				x = 0	x = 10	x = 20	x = 30	x = 40	x = 50	x = 60	x = 70
AB 11	3,3	36,3	$E_h$	525	215	95	65	85	85	80	75
			pH	5,60	6,45	6,55	6,60	6,70	6,65	6,60	6,60
AB 21	4,2	33,5	$E_h$	710	305	185	105	180	185	130	140
			pH	4,0	5,65	5,95	6,20	6,45	6,40	6,35	6,35
BE 41	6,1	36,9	$E_h$	660	-20	-10	0	10	25	30	15
			pH	5,20	6,80	6,75	6,75	6,80	6,70	6,60	6,60
AN 11	35,4	9,3	$E_h$	—	—	—	—	—	—	—	—
			pH	5,60	6,10	6,30	6,50	6,50	6,50	6,45	6,45
AN 21	21,8	17,4	$E_h$	670	270	245	135	100	120	105	100
			pH	5,60	6,05	6,35	6,45	6,55	6,50	6,50	6,45
MR 11	21,3	37,8	$E_h$	750	395	280	135	80	-10	-60	10
			pH	3,70	5,10	5,40	5,80	6,20	6,50	6,75	6,70

Les valeurs du pH augmentent avec la durée de saturation, atteignant un maximum qui, pour ces sols acides, se situe entre 6,5 et 6,8, puis se stabilisent après avoir légèrement baissé (de 0,1 à 0,2 unité pH). On constate que l'augmentation des valeurs du pH est rapide quand la baisse des valeurs du potentiel d'oxydoréduction est elle-même rapide (BE 41), elle est plus lente dans les autres cas, bien que forte pour les échantillons provenant des sols les plus anciennement aménagés et qui sont plus acides en début d'expérience.

### 3.2. Les pertes en carbone organique et en fer subies par les échantillons

Les dosages de carbone organique et de fer dans deux aliquotes du percolat d'une part, la détermination exacte du volume recueilli à chaque percolation d'autre part, permettent de calculer les quantités de fer et de carbone organique perdues par la colonne de terre à chaque opération, c'est-à-dire pour un temps de saturation donné. Ces quantités sont comparées à celle de fer (1) et de carbone organique existant dans la colonne (teneur en Fe ou C  $\times$  poids de terre). On obtient ainsi,

$\frac{C \text{ exporté à chaque percolation}}{C \text{ de la colonne}}$

et

$\frac{Fe \text{ exporté à chaque percolation}}{Fe \text{ de la colonne}}$

(1) Fe dosé après attaque HCl à chaud, donc même méthode que pour la détermination de Fe dans le percolat.

Ces deux fractions qui représentent les pertes relatives en fer et en carbone pour chaque échantillon et pour un temps de saturation donné, sont exprimées en pour mille.

Les courbes représentatives de ces pertes en fonction du temps de saturation (fig. 3) montrent que les pertes en fer et en carbone des échantillons varient en fonction du temps ; elles augmentent puis diminuent.

L'allure des courbes est différente suivant les échantillons ; on remarque en particulier, que pour les échantillons provenant de sols non aménagés (AB 11 et AN 11), les courbes relatives au carbone ne présentent pas de maximum net. Pour les sols aménagés (AB 21, BE 41, ME 11) les maxima des pertes de carbone et de fer correspondent, pour un échantillon, à peu près au même temps de saturation.

Dans une étude expérimentale analogue réalisée sur des sols hydromorphes au Tchad (Vizier, 1974), on a démontré que le fer exporté est essentiellement du fer ferreux et que les pertes de fer observées sont une conséquence du développement de phénomènes de réduction au sein de la terre saturée par l'eau. On a déjà signalé par ailleurs (paragr. 2.3.), que les quantités de fer recueillies par percolation reflètent l'intensité des phénomènes qui se produisent dans la terre. On peut constater que le maximum de perte en fer se produit pour tous les échantillons lorsque les valeurs de  $E_h$  et de pH sont stabilisées. On a représenté, en exemple sur la figure 4 les variations de  $E_h$ , pH et des pertes en fer en fonction du temps de saturation pour trois échantillons présentant des comportements différents : un échantillon pour lequel le démarrage du développement des phénomènes de réduction est

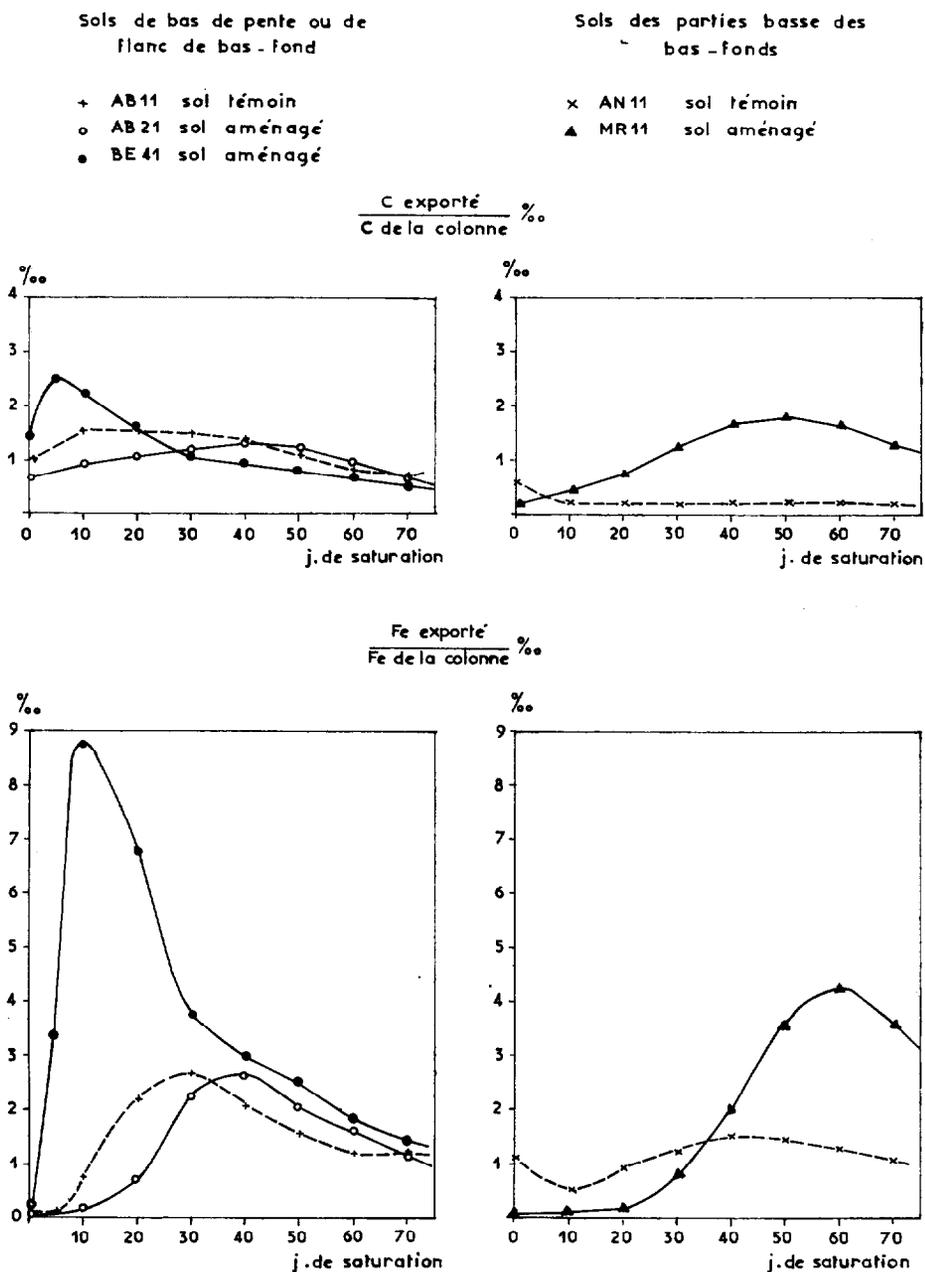


FIG. 3. — Pertes relatives en carbone organique et en fer en fonction du temps de saturation.

rapide (BE 41), un échantillon pour lequel ce démarrage est très long à se réaliser (MR 11) et un échantillon ayant un comportement intermédiaire (AB 11).

Pour les échantillons sur lesquels on a pu faire deux essais (AB 11, AB 21, BE 41 et MR 11), on observe une bonne reproductibilité de l'allure des courbes. Cette reproductibilité se remarque aussi sur les *quantités totales de fer et de carbone perdues* par les échan-

tillons au cours des 16 percolations réalisées en 75 jours. Ces résultats rassemblés dans le tableau III permettent de constater que *les pertes* en fer et en carbone subies par les échantillons de terre mis en colonne *sont importantes* puisqu'elles représentent après 75 jours de saturation : 1,0 à 2 % de la quantité totale de carbone organique et 1,8 à 5 % de la quantité totale de fer de la terre.

TABLEAU III

Echantillons	Mat. organ. (%)	Taux d'extract. (%)	C exporté C colonne (‰)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe exporté Fe colonne (‰)
AB 11	3,3	36,3	15,6 à 18,3	3,6	22 à 25
AB 21	4,2	33,5	10,4 à 12,4	2,5	18,2 à 21
BE 41	6,0	36,9	17,7 à 19,7	2,55	53,1 à 54,3
AN 11	35,0	9,3	2,4	5,0	18,1
MR 11	21,0	37,8	18,8 à 20,7	10,5	30 à 50,2

On constate qu'il n'y a pas de relations entre les pertes totales de fer et de carbone, et les teneurs en carbone organique et en fer de la terre. Par contre on note une bonne relation entre les pertes totales de carbone et à un degré moindre de fer et le taux d'extraction des matières humifiées. Il apparaît que ces pertes sont d'autant plus importantes que la matière organique est plus humifiée. On remarque donc que ce ne sont pas les sols les plus organiques qui présentent les phénomènes de réduction les plus importants (quantité totale de fer exportée), ni les phénomènes de réduction qui se développent le plus rapidement (temps de saturation correspondant à la perte maximale en fer : fig. 3 et 4), mais que par contre le degré d'évolution de la matière organique et par conséquent sa qualité semble intervenir sur l'importance de ces phénomènes.

### 3.3. Relations existant entre les poids de matières exportées, le potentiel d'oxydoréduction de la terre, le pH et la conductivité

Au cours de la deuxième série d'expérience, on a, sur une aliquote du percolat amenée à sec (à l'étuve), pesé le résidu obtenu. Connaissant le volume recueilli au cours de l'opération de percolation, on calcule le poids de substances perdues par la colonne de terre

(tabl. IV). Les valeurs correspondantes des quantités de fer et de carbone recueillies à chaque opération, permettent de connaître les teneurs en ces deux éléments du « résidu sec », teneurs que l'on compare à celles de la terre des colonnes. Lorsque les teneurs en fer du résidu sont plus fortes que celles de l'échantillon mis en colonne, on a un appauvrissement de la terre en fer.

On remarque que les poids de « résidu sec » suivent des variations semblables à celles des quantités de fer et de carbone organique exportées en fonction du temps de saturation ; ils augmentent, puis diminuent.

Les résultats rassemblés dans le tableau IV, permettent de constater que *la teneur en fer du résidu* est, en début d'expérience, inférieure ou voisine de celle de la terre de la colonne ; il n'y a donc pas, pendant cette période, d'appauvrissement réel de la terre en fer. Cela se traduit par des valeurs du rapport % Fe résidu/% Fe terre inférieures ou voisines de l'unité. Par contre ce rapport passe assez brusquement à des valeurs supérieures à 2, après :

15 jours de saturation pour l'échantillon AB 11  
25 jours de saturation pour l'échantillon AB 21  
5 jours de saturation pour l'échantillon BE 41  
35 jours de saturation pour l'échantillon AN 21  
et 35 jours de saturation pour l'échantillon MR 11.

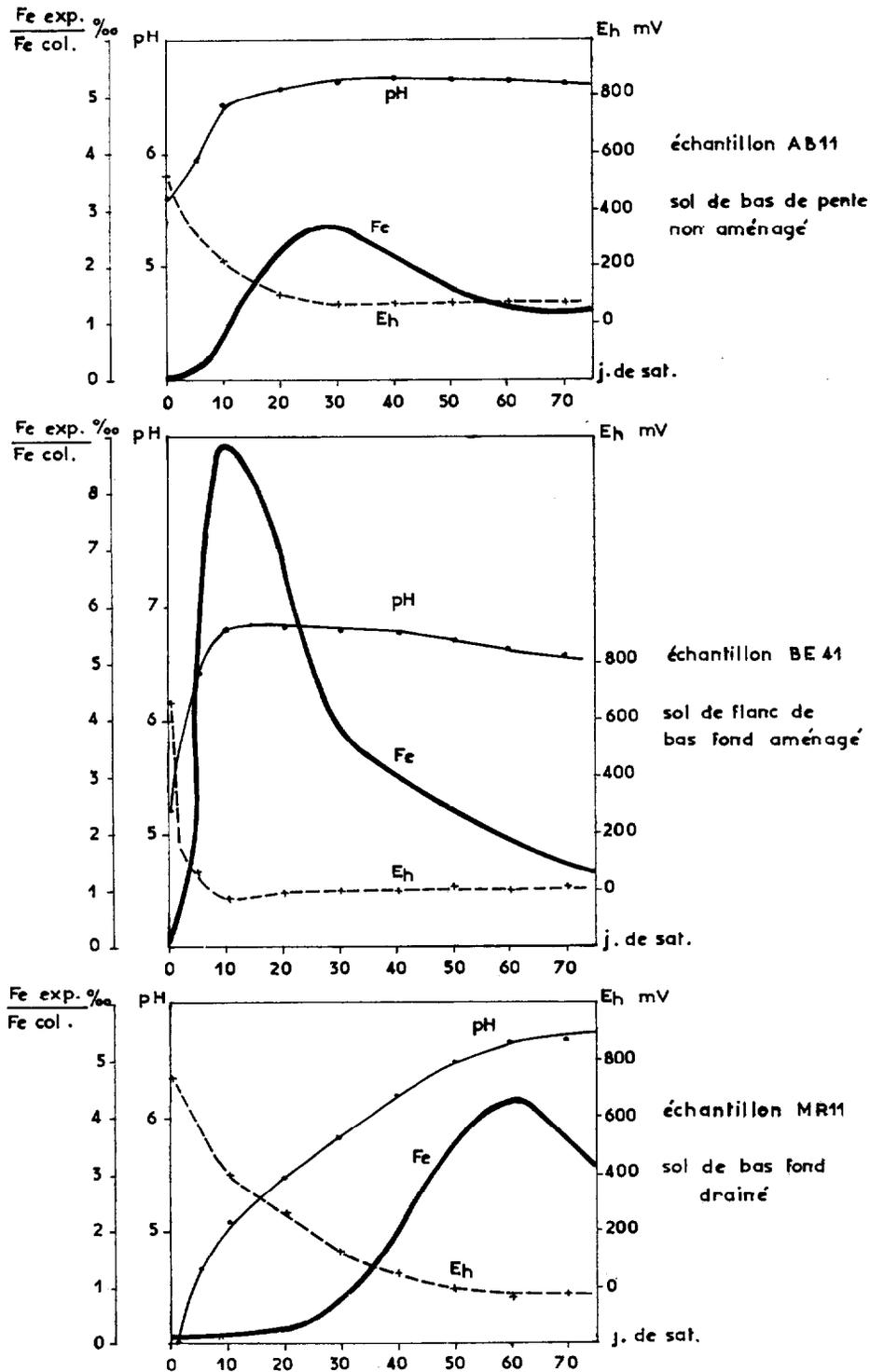


FIG. 4. — Exemples de relation existant entre les variations de Eh—pH et les pertes en fer, en fonction du temps de saturation.

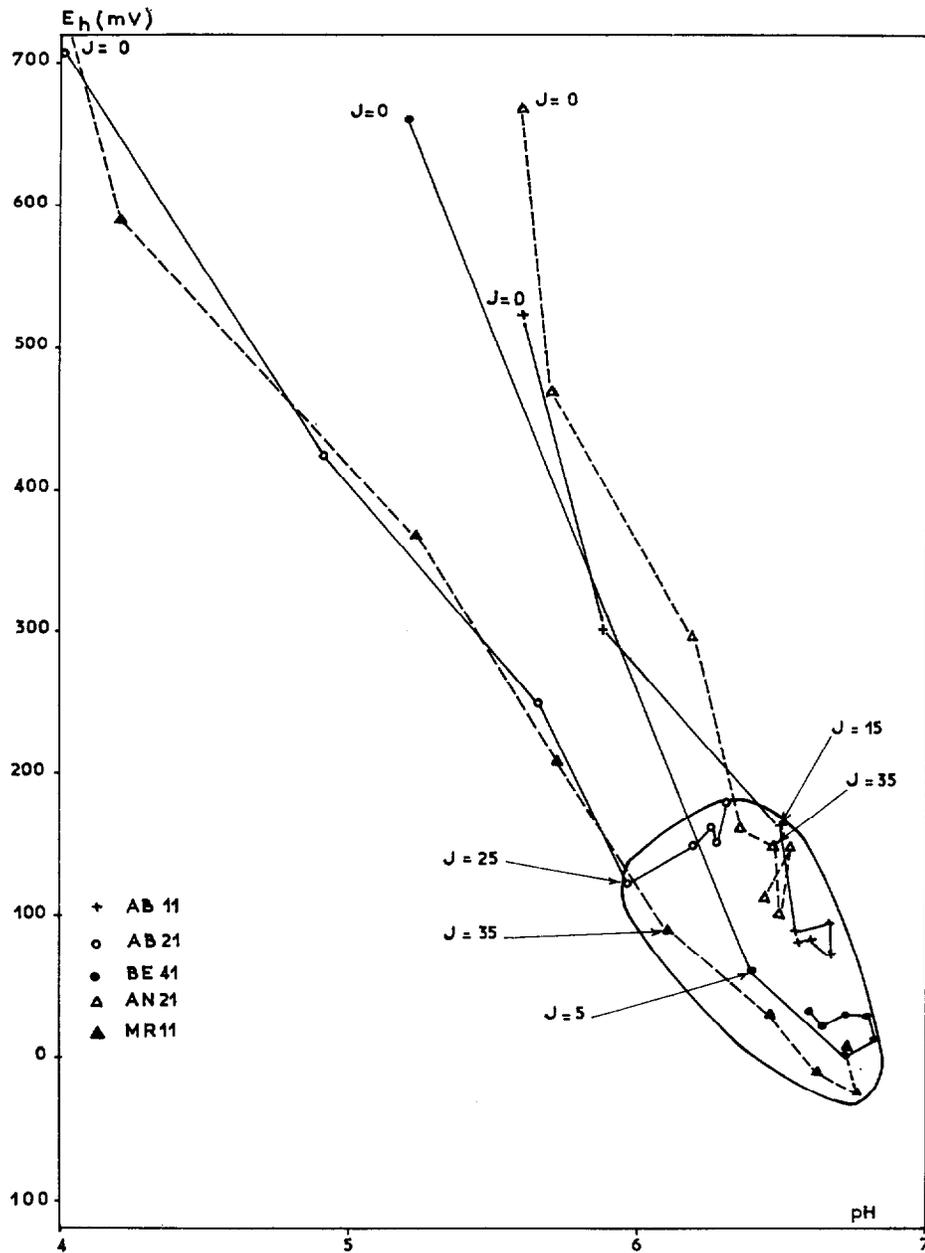


FIG. 5. — Délimitation du domaine  $E_h$  pH dans lequel les sols subissent un appauvrissement en fer.

TABLEAU IV

		Temps de saturation (en jours)						
		5	15	25	35	45	55	65
AB 11	Résidu mg .....	22,1	44,1	91	52,7	24,2	23,6	20,8
	% Fe résidu/% Fe terre .....	0,6	6,0	6,8	10,8	20,0	14,1	14,8
	Fe/C .....	0,03	0,55	1,23	1,04	1,25	1,40	1,33
AB 21	Résidu mg .....	25,2	28,1	59	23,2	10,1	14,5	12,1
	% Fe résidu/% Fe terre .....	0,9	1,2	5,4	23,9	48,5	24,5	23,1
	Fe/C .....	0,09	0,08	0,58	0,87	0,93	0,83	0,94
BE 41	Résidu mg .....	72,5	94,7	102,5	40,2	17,2	22,9	18,1
	% Fe résidu/% Fe terre .....	8,8	15,8	9,4	16,2	27,4	13,5	14,7
	Fe/C .....	0,51	1,70	1,42	1,19	1,45	1,02	1,14
AN 21	Résidu mg .....	432	36,2	132	25,2	11,6	18,7	18,8
	% Fe résidu/% Fe terre .....	2,2	2,1	1,95	7,2	18,0	7,8	10,0
	Fe/C .....	0,32	0,40	0,28	0,86	0,91	0,86	1,35
MR 11	Résidu mg .....	50,2	27,3	76,7	71	77,5	105	92,5
	% Fe résidu/% Fe terre .....	0,05	0,2	0,5	2,1	4,1	3,4	4,4
	Fe/C .....	0,08	0,05	0,22	0,46	0,95	0,95	1,25

Il y a alors *appauvrissement de la terre en fer*, le résidu obtenu étant au moins deux fois plus riche en fer que la terre de la colonne. On constate également (fig. 3) que les quantités de fer exportées au-delà des temps de saturation ci-dessus mentionnés, représentent toujours plus de 1 ‰ de la quantité de fer contenue dans la terre de la colonne.

Simultanément, le rapport des quantités de fer à celles de carbone recueillies (Fe/C) atteint des valeurs supérieures à 0,40. D'après d'Yakonova (1962) les acides humiques et fulviques extraits de plusieurs types de sols peuvent former des complexes avec le fer dans la proportion de 15 à 35 mg de Fe pour 100 mg de C, soit un rapport Fe/C de 0,15 à 0,35. On peut donc penser, lorsque les valeurs du rapport Fe/C dépassent 0,4, que le fer recueilli ne peut pas être entièrement complexé avec les substances organiques, leur « capacité de complexation » étant dépassée et qu'une partie de cet élément se trouve simplement en solution.

Si on porte sur un diagramme  $E_h$ -pH les points correspondant aux couples de valeurs  $E_h$ -pH obtenues successivement dans la terre de la colonne au cours des expériences (fig. 5), on remarque que les points tendent à converger vers une même zone. Cette zone est atteinte après des temps de saturation variable suivant les sols, mais qui sont identiques à ceux à partir desquels :

— le rapport Fe résidu/Fe terre est supérieur à 2,

— la quantité de fer exportée à chaque percolation représente plus de 1 ‰ du fer de la terre de la colonne, et le rapport Fe/C est supérieur à 0,4.

On remarque que lorsque cette zone est atteinte, les variations de  $E_h$  et pH deviennent faibles.

Les sols atteignent donc plus ou moins rapidement, un domaine de relative stabilité de  $E_h$  et de pH, correspondant pour la terre à une *phase d'appauvrissement en fer*. Il est important de noter, que ce domaine de stabilité compris entre les valeurs de pH de 6 à 6,8 et celles de  $E_h$  de -30 mV à +180 mV, est atteint par tous les échantillons au cours des expérimentations.

On peut rechercher la part que représente le fer dans le percolat pendant cette phase de stabilité de  $E_h$  et de pH, en étudiant la relation qui existe entre les concentrations en fer (en mg/l) et les valeurs de la conductivité du percolat mesurée après chaque opération de percolation.

On constate que l'on a une corrélation entre ces deux variables et que les lignes de régression sont des droites (fig. 6).

Les coefficients de corrélation calculés sont :

pour AB 11  $r = +0,65$  et pour AN 21  $r = +0,74$   
 AB 21  $r = +0,80$  MR 11  $r = +0,96$   
 BE 41  $r = +0,90$

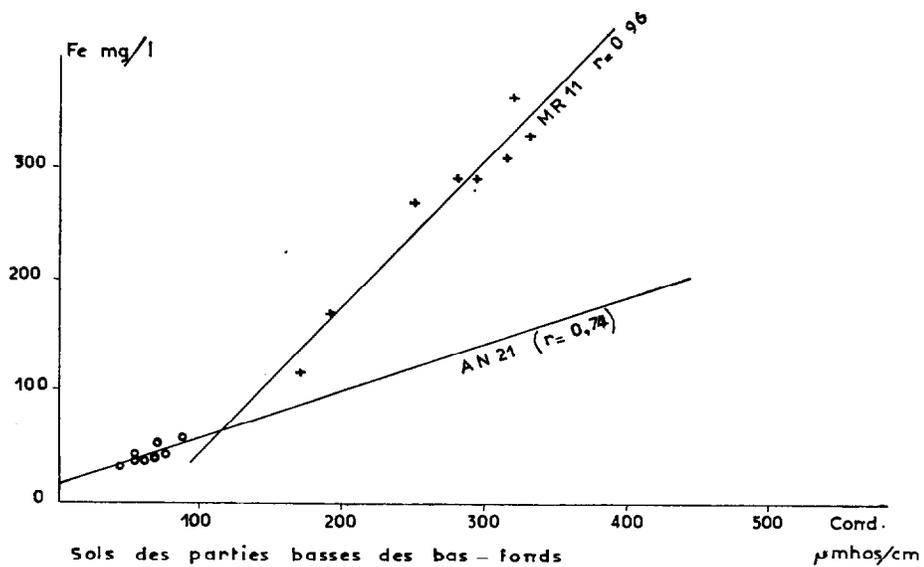
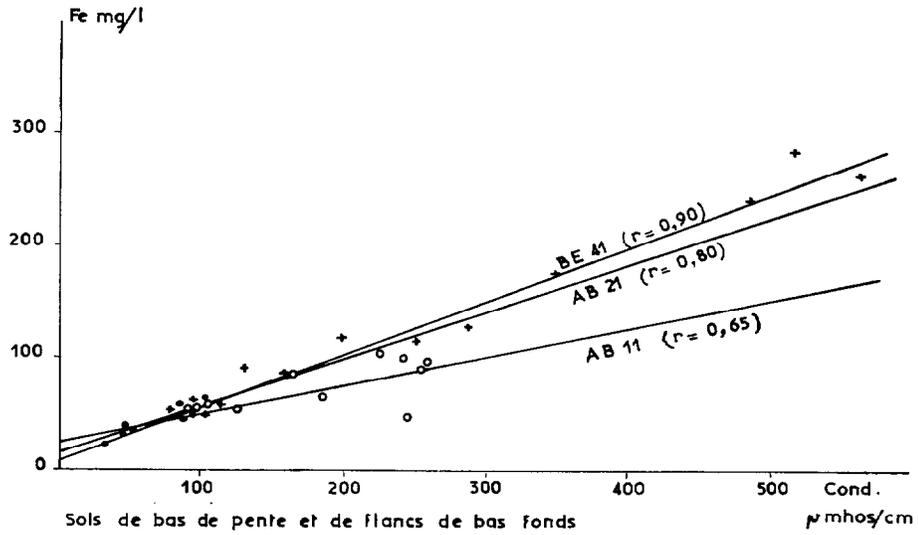


FIG. 6. — Relations existant entre la conductivité et les quantités de fer exportées, pendant la phase de stabilité de  $E_h$  et pH.

Ces coefficients sont plus élevés dans les sols aménagés depuis 10 ans (BE 41, AB 21 et MR 11 : 0,80 à 0,96) que dans le sol aménagé depuis peu de temps (AN 21 : 0,74) et dans le sol témoin (AB 11 : 0,65).

On peut remarquer sur la figure 6 que pour une valeur de la conductivité donnée, on aura plus de fer dans le percolat obtenu à partir des échantillons prélevés dans les sols aménagés que dans celui obtenu à partir du sol témoin.

Ces calculs et ces remarques font ressortir la *part* de plus en plus *prépondérante* que prend le fer dans la *phase migrante* dans les sols qui évoluent depuis plus longtemps dans les nouvelles conditions imposées par les aménagements.

#### 4. ESSAI D'INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET DE L'ALLURE DES PHÉNOMÈNES OBSERVÉS

##### 4.1. Remarques sur le rôle de la matière organique dans le développement des phénomènes de réduction

Les résultats obtenus au cours de ces expériences permettent de faire quelques remarques qui complètent les données déjà acquises (Vizier, 1970-1974). On a déjà constaté que la dynamique du fer et en particulier la migration de cet élément dans un sol inondé, est liée au développement de conditions réductrices dans le profil. Le rôle de la matière organique sur le développement des phénomènes de réduction a souvent été démontré et on a observé que dans des horizons superficiels de profil présentant des teneurs en matière organique différentes mais de « qualité » sensiblement voisine (taux d'extraction des matières humifiées, rapport acides fulviques/acides humiques, rapport C/N), les phénomènes de réduction se développent d'autant plus rapidement que le sol est plus organique.

Dans les sols de bas-fonds étudiés, la matière organique des profils est non seulement très différente en quantité, mais aussi en qualité. Elle est plus ou moins évoluée dans les sols des parties basses des bas-fonds non aménagés ou drainés depuis plus ou moins longtemps (AN 11, AN 21 et MR 11) et on remarque que le développement des phénomènes de réduction (baisse de  $E_h$  - quantité de fer recueillie par percolation) est lent dans les sols très humifères mais à matière organique peu évoluée (AN 11, AN 21). On note aussi que les phénomènes de réduction dé-

marrent avec un certain retard dans les sols aménagés qui subissent une dessiccation poussée au cours de la saison sèche. La matière organique présente dans ces profils (AB 21, MR 11) semble ne devenir « active » qu'après un temps de saturation assez long. Il est vraisemblable que ce retard est dû au caractère légèrement hydrophobe acquis par ces horizons humifères fortement desséchés pendant une partie de l'année.

Par conséquent, ce n'est pas seulement la *quantité*, mais aussi la *qualité* des substances organiques présentes dans un sol qui interviennent sur la vitesse d'évolution des phénomènes de réduction et sur les conséquences que ces phénomènes peuvent avoir sur la migration du fer.

##### 4.2. Remarques sur la dynamique du fer

Si les quantités relatives de fer qui migrent dépendent de la quantité et de la qualité de la matière organique et leur prédominance par rapport aux substances exportées est fonction du degré de transformation déjà atteint par le profil (ancienneté de l'aménagement, voir paragr. 3.3.), l'allure que présente le phénomène d'appauvrissement en fer mérite quelques remarques. On a noté que les quantités de fer recueillies sont faibles en début d'expérience, augmentent rapidement ou progressivement pour atteindre un maximum correspondant à un temps de saturation différent suivant les sols, puis diminuent. Cette allure particulière des courbes représentant les quantités de fer recueillies en fonction du temps de saturation a été observée par plusieurs auteurs (Dae Young Cho et Ponnampereuma, 1971, Ponnampereuma, 1972...) et a déjà attiré notre attention (Vizier, 1974).

Dans des études antérieures (Vizier, 1970-1974), on a établi la relation existant entre les variations des teneurs en fer ferreux dans la terre et celles du potentiel d'oxydoréduction. Ces différentes variations en fonction du temps de saturation sont schématisées sur la figure 7, sur laquelle on porte également les pertes en fer. Les hypothèses formulées sur l'allure de ces phénomènes sont représentées sur un diagramme  $E_h$ -pH (fig. 8), diagramme sur lequel on a figuré les domaines dans lesquels évoluent les valeurs de  $E_h$  et de pH mesurées dans les sols étudiés (fig. 5) et les domaines d'existence des différentes formes du fer (d'après Ponnampereuma, Tianco et Loy, 1967).

Dans une première phase, jusqu'au temps  $t_1$ , le potentiel d'oxydoréduction de la terre décroît plus ou moins rapidement et cela en fonction de la quantité et de la qualité de la matière organique présente,

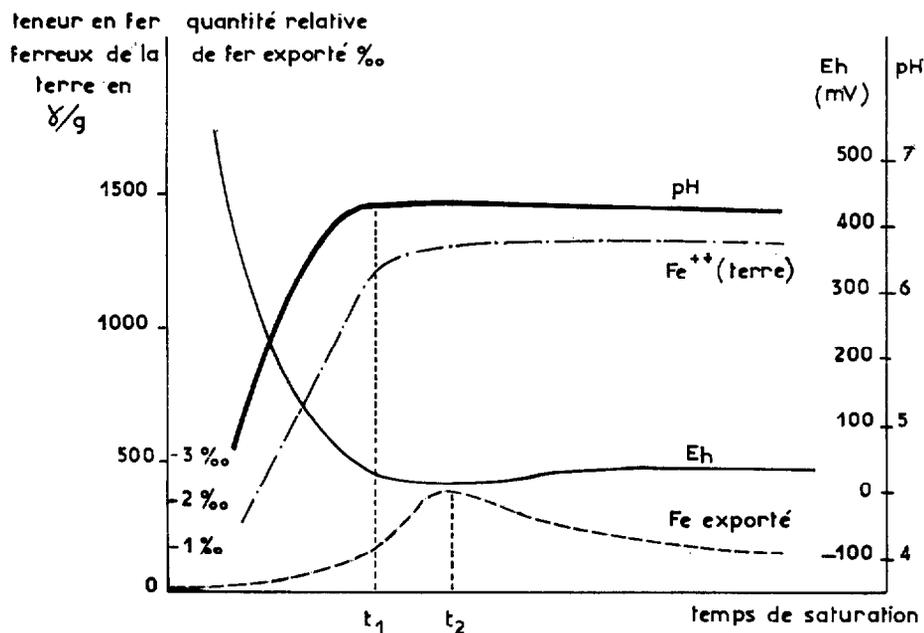
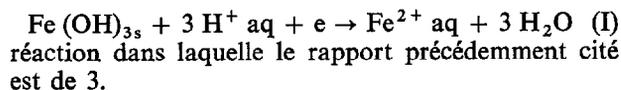


FIG. 7. — Schéma des variations de  $E_h$ , pH, des teneurs en fer ferreux de la terre, des quantités de fer exportées en fonction du temps de saturation.

tandis que simultanément les teneurs en fer ferreux de la terre augmentent. L'oxydation des substances organiques dans la terre saturée d'eau et privée d'oxygène se fait au détriment des substances oxydées tel que le fer qui, au cours des réactions d'oxydoréduction qui se produisent, joue le rôle d'accepteur d'électron. Pendant cette même phase, les valeurs du pH augmentent, augmentation qui peut être expliquée, d'après F.N. Ponnampereuma (1972), par la consommation d'ions  $H^+$  ou plutôt par le rapport du nombre d'ions  $H^+$  à celui d'électrons consommés au cours des phénomènes de réduction. La forte hausse des valeurs du pH, en début d'expérience, correspondrait à l'existence de la réaction suivante :

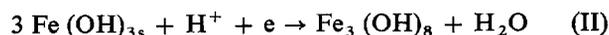


Suivant cette réaction, on remarque que la quantité de fer ferreux et par conséquent le développement des phénomènes de réduction seraient d'autant plus importants qu'il y aurait plus de matière organique facilement oxydable (éléments donneur d'électron),

d'hydroxyde ferrique facilement réductible (formes amorphes ou faiblement cristallisées) et que le pH du sol serait plus acide (présence d'ions  $H^+$ ).

Ce type de réaction et les remarques qu'elle suggère correspondent bien aux observations que l'on peut faire sur les sols qui présentent les phénomènes de réduction les plus importants en présence d'un excès d'eau (Vizier, 1970-1974).

Au delà du temps  $t_1$ , les teneurs en fer ferreux de la terre, les valeurs de  $E_h$  et de pH tendent à se stabiliser. F.N. Ponnampereuma (1972) suggère l'existence d'un deuxième type de réaction :



réaction dans laquelle le rapport du nombre d'ions  $H^+$  au nombre d'électrons consommés égal à 1, expliquerait la stabilisation du pH. Cette réaction conduit à la formation de l'hydroxyde ferroso-ferrique dont le domaine d'existence (d'après Ponnampereuma, Tianco et Loy, 1967) correspond bien au domaine de stabilisation des valeurs de  $E_h$  et de pH (voir fig. 5 et 8).

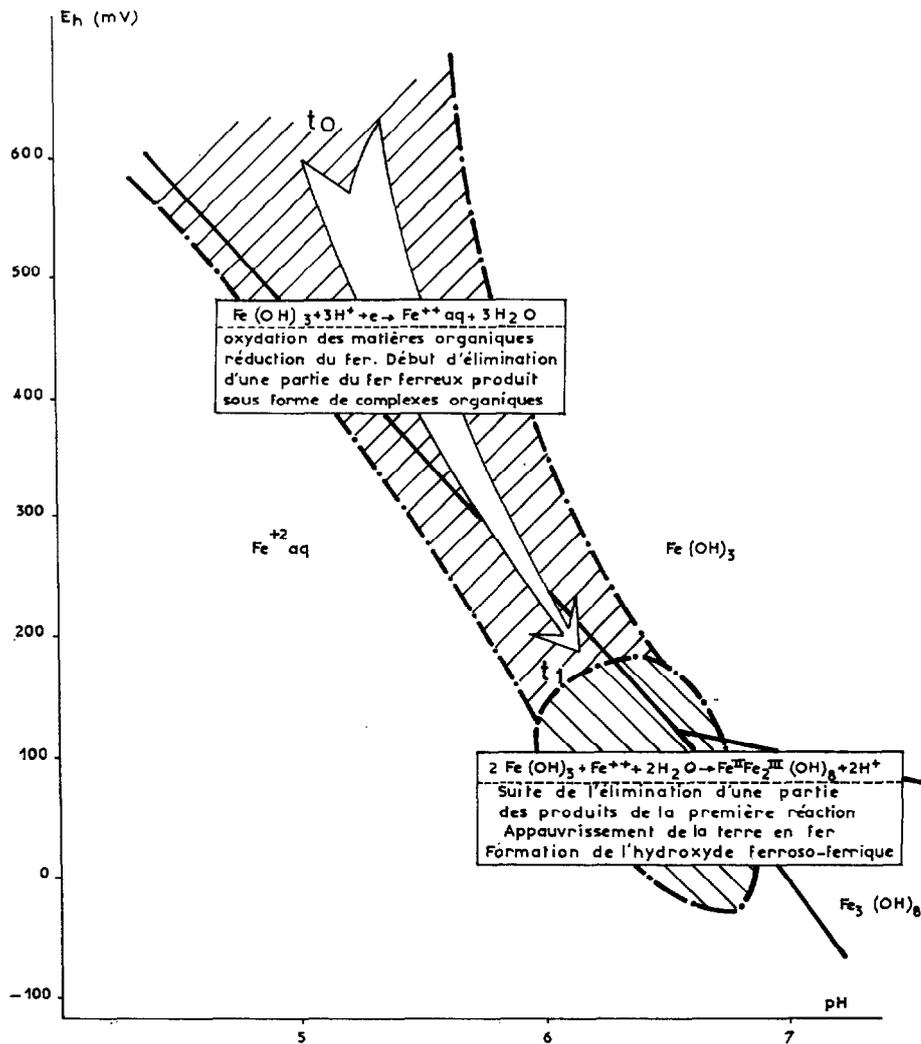
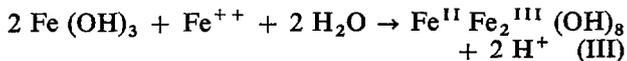


FIG. 8. — Délimitation, sur un diagramme  $E_h$ , pH, des zones correspondant à différentes phases de la dynamique du fer.

Cependant, dans les expériences effectuées on a noté, au-delà du temps  $t_1$ , une légère baisse du pH de 0,1 à 0,2 unité suivant les cas. On peut supposer que se produit une réaction différente de celle envisagée précédemment (réaction II) et que des produits issus de la première réaction (I) réagissent avec l'hydroxyde ferrique pour donner l'hydroxyde ferroso-ferrique suivant la réaction :



On remarque que cette réaction qui s'effectue sans échange d'électrons n'est plus une réaction d'oxydo-réduction. Elle fait apparaître des ions  $H^+$  qui peuvent expliquer la baisse de pH observée.

Les quantités de fer exportées à chaque percolation augmentent au cours de la première phase ; elles continuent de croître au-delà du temps  $t_1$  pour atteindre leur maximum lorsque les valeurs de  $E_h$  et de pH sont stabilisées, puis diminuent.

Pendant la première phase, l'eau qui migre vers le

bas de la colonne de terre et qui est recueillie, entraîne des substances organiques hydrosolubles et une faible partie du fer réduit, produit par la réaction I, vraisemblablement sous forme de complexes organo-ferreux, la « capacité de complexation » des substances organiques n'étant pas atteinte ( $Fe/C < 0,4$ ).

Après le temps  $t_1$ , la réaction III qui aboutit à la formation de l'hydroxyde ferroso-ferrique se substitue peu à peu à la réaction I.

Pendant jusqu'au temps  $t_2$ , l'eau qui migre à travers la terre et qui est recueillie contient de plus en plus de fer réduit produit au cours de la première réaction. Ce fer continue à former des complexes avec les substances organiques qui migrent, mais la capacité de complexation de celles-ci étant atteinte, il est vraisemblable que le fer exporté se trouve sous une forme autre que complexée. On a alors un appauvrissement important de la terre en fer.

Enfin le fer réduit produit de la réaction I intervenant peu à peu dans la réaction aboutissant à la formation de l'hydroxyde ferroso-ferrique ne migre plus et les quantités de fer ferreux recueillies diminuent.

Il y aurait donc un *décalage* dans le temps, entre les *phénomènes de réduction* qui se produisent dans la terre et l'*élimination* d'une partie des produits de ces réactions. L'importance des substances recueillies dans les percolats ne reflète donc pas l'intensité des phénomènes qui existent au même moment dans la terre, mais traduit celle des phénomènes qui se sont développés antérieurement. Cette explication peut être rapprochée des conclusions formulées par Fokin (1968), selon lesquelles la migration du complexe fer-acide fulvique serait dans un milieu poreux 3 à 6 fois plus lente que celle de l'eau.

Ces remarques sont importantes car il semblerait que pour qu'il y ait appauvrissement en fer dans un horizon de sol, il soit nécessaire que l'on ait à la fois : saturation par l'eau, réduction du fer et mouvement d'eau pendant un temps suffisant pour que le fer réduit puisse, en partie, être exporté.

## CONCLUSIONS

Ces expériences, réalisées sur des échantillons provenant de sols de rizières et simulant les conditions dans lesquelles évoluent les profils lorsque les rizières sont inondées, ont permis de préciser quelques aspects de la dynamique du fer dans les sols évoluant sous l'effet d'un excès d'eau.

La matière organique intervient sur la vitesse d'évolution des phénomènes de réduction du fer, par les quantités mais aussi par la qualité des substances organiques présentes dans les profils.

L'allure des variations des valeurs du potentiel d'oxydo-réduction et du pH en fonction du temps de saturation peut être expliquée par l'existence de deux types de réactions qui se produisent successivement dans le sol. On aurait tout d'abord, une réaction d'oxydoréduction qui aboutit à la formation de fer réduit susceptible de migrer et au cours de laquelle le potentiel d'oxydoréduction de la terre décroît au fur et à mesure qu'augmentent les teneurs en fer ferreux tandis que le pH s'élève, dans ces sols acides, jusqu'à des valeurs proches de la neutralité ; puis on aurait une seconde réaction ne donnant plus lieu à des échanges d'électrons et qui faisant intervenir des produits issus de la première réaction, conduirait à la formation de l'hydroxyde ferroso-ferrique, le potentiel d'oxydo-réduction de la terre étant stabilisé et les valeurs du pH baissant légèrement.

Enfin le décalage dans le temps, existant entre le développement de la réaction de réduction du fer qui devient susceptible de migrer et le phénomène d'appauvrissement de la terre en fer, souligne la nécessité d'avoir une saturation du sol par l'eau et des mouvements d'eau dans les profils pendant un temps suffisamment long pour que l'on ait effectivement un appauvrissement de la terre en fer.

*Manuscrit reçu au Service des Publications de l'ORSTOM le 30 janvier 1978*

## BIBLIOGRAPHIE

- AOMINE (S.), 1962. — A review of research on redox potentials of paddy soils in Japan. *Soil Sci.*, vol. 94, 1 : 6-13.  
 DAE YOUNG CHO, PONNAMPERUMA (F.N.), 1971. — Influence of soil temperature on the chemical kinetics of flooded soils and the growth of rice. *Soil Sci.*, vol. 112, 3 : 184-194.

DIDIER DE SAINT-AMAND (R.), 1967. — Dynamique des sols hydromorphes organiques malgaches en relation avec la riziculture. IRAT, Paris, 195 p.

D'YAKONOVA (K.V.), 1962. — Iron - humus complexes and their role in plant nutrition. *Soviet Soil Sci.*, 7.

- FOKIN (A.D.), 1968. — Investigation of dynamic movement of ferrous and fulvate iron ion of podzolic soils (experiment with 59 Fe). *Izv. Timiryazev sel' khoz Akad.*, 3 : 142-148 - (résumé anglais dans *Soils and Fertilizers*, vol. 32, 1, réf. 61).
- MEEK (B.) MCKENZIE (A.), GRASS (L.), 1968. — Effect of organic matter flooding time and temperature on the dissolution of iron and manganese from soil in situ. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, vol. 32, 5 : 634-638.
- MOTOMURA (S.), 1962. — Effect of organic matter on the formation of ferrous iron in soil. *Soil Sci. and Plant Nutr.*, vol. 8, 1 : 20-29.
- PONNAMPERUMA (F.N.), TIANCO (E.M.), LOY (T.), 1967. — Redox equilibria in flooded soils. I. The iron hydroxydes systems. *Soil Sci.*, vol. 103, 6 : 374-382.
- PONNAMPERUMA (F.N.), 1972. — The chemistry of submerged soils. In : *Advances in agronomy*, vol. 24 : 29-96.
- RIQUIER (J.), 1959. — Le bilan hydrique des sols calculé d'après les données météorologiques courantes. *Doc. du Serv. Géol.*, Tananarive, 105 p. *multigr.*
- VIZIER (J.F.), 1970. — Etude des phénomènes d'hydromorphie et de leur déterminisme dans quelques types de sols du Tchad. *Cah. ORSTOM, série pédol.*, vol. VIII, n° 1 : 33-47.
- VIZIER (J.F.), 1974. — Contribution à l'étude des phénomènes d'hydromorphie. Recherche de relations morphogénétiques existant dans un type de séquence de sols hydromorphes peu humifères au Tchad. 2<sup>e</sup> partie : Dynamique de l'eau et du fer dans les sols de la séquence. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XII, n° 3/4 : 211-266.
- VIZIER (J.F.), 1976. — Contribution à l'étude des phénomènes d'hydromorphie. Quelques modifications intervenant après aménagements hydroagricoles, dans des sols évoluant sous l'effet d'un excès d'eau à Madagascar. ORSTOM, 49 p. *multigr.*, rapport provisoire.