Etude de la ferrallitisation par la technique des cinétiques de dilution isotopique (application au cas du fer)

Christiane THOMANN

Société du Canal de Provence
Le Tholonet - 13100 Aix-en-Provence

RÉSUMÉ

La méthode des cinétiques de dilution isotopique appliquée au cas du fer peut contribuer à préciser les conditions de « mobilité potentielle » du fer dans les sols, sous l'action de trois facteurs: humidité, temps d'incubation et apport de matière organique.

La comparaison entre les horizons de surface de trois sols tropicaux : sol ferrugineux tropical lessivé, sol rouge faiblement ferrallitique et sol ferrallitique, montre que dans le processus de ferrallitisation, le sol rouge faiblement ferrallitique se situerait entre les deux autres types de sols, avec une mobilité maximum du fer. Cette mobilité diminue quand le taux de matière organique diminue, conduisant alors au sol beige (ferrugineux tropical lessivé), et quand le taux d'hydroxydes augmente, ce qui mène au sol ferrallitique. Dans le podzol (horizon A_1), pour un même taux de matière organique, la mobilité potentielle du fer est plus grande que dans le sol ferrallitique, car ce dernier renferme dix fois plus de fer libre que le podzol.

ABSTRACT

Isotopic dilution kinetic technic applied to iron may contribute to make clear the conditions of « potential » mobility of iron in soils, under the action of three factors: moisture, incubation period and organic matter imputs.

Comparison between surface horizons of three tropical soils: leached ferruginous tropical soil, weakly ferrallitic red soil and ferrallitic soil shows that in the ferrallitisation process, weakly ferrallitic soil would take place between the two other types of soils with a maximum mobility of iron. This mobility lessens when organic matter rate decreases leading then to « beige » soil (ferruginous leached tropical soil), and when hydroxydes rates increases, which leads to ferrallitic soil. In podzol (A_1 horizon), for the same rate of organic matter, potential mobility of iron is higher than in ferrallitic soil, because it contains ten times more free iron than the podzol.

1. INTRODUCTION

Le problème du fer en pays tropical est particulièrement important, et bien des inconnues restent à préciser, notamment dans le domaine des conditions de mobilité de ce fer.

D'une manière générale, Duchaufour (1972) précise « le rôle capital que jouent les complexes organo-minéraux dans la formation des sols, leur étude devant être l'objectif fondamental de la pédologie en tant que science s'intéressant essentiellement à la dynamique des profils ». Mais nous avons vu précédemment (C. Thomann *et al.*, 1976) qu'il est difficile de « saisir »

les formes solubles ou pseudo-solubles du fer lié à la matière organique.

Le fer et ses complexes ont principalement été étudiés sur les sols de pays tempéré, et plus particulièrement sur les podzols, ces derniers offrant un large champ d'investigations, car la migration du fer y est assez spectaculaire. C'est pourquoi, à côté de sols tropicaux, pour la plupart forestiers et acides, nous avons dans cette étude, également travaillé sur un podzol.

Par contre, dans les sols tropicaux, c'est essentiellement sous sa forme minérale que le fer a été étudié, mais très peu de travaux ont porté sur sa forme liée à la matière organique (Ségalen, 1964).

La méthode des cinétiques de dilution isotopique peut rendre compte assez rapidement des *possibilités de migration du fer* dans un sol, conséquence de la « mobilité potentielle » de ce fer. Le point de vue le plus intéressant nous paraît être celui du fer lié à la matière organique.

Si, pour les sols tempérés Bruckert (1970) a démontré que « les anions simples (de faible poids moléculaire) à pouvoir complexant marqué, jouaient un rôle considérable dans la mobilisation du fer », par contre, pour les sols tropicaux, nous avons peu de données à ce sujet, P. de Boissezon (1973) émettant l'hypothèse « qu'il est cependant possible que le fer puisse migrer dans les sols ferrallitiques sous forme de complexes indépendamment des argiles ».

Nous pensons donc que cette technique nous permet de saisir principalement ce qu'il est convenu d'appeler les « chélates », mais ceux-ci ne représentent pas pour autant l'unique forme sous laquelle le fer puisse migrer, elle est la plus mobile vraisemblablement.

Le but d'une cinétique de dilution isotopique est de mesurer en fonction du temps, la dilution du traceur-indicateur, introduit dans notre cas sous forme de ^{55}Fe, au sein du système sol-solution. La technique Fardeau-Guiraud (1974) a été appliquée, car il est indispensable d'exécuter correctement et rapidement des mesures de la radio-activité spécifique des ions en solution (Fe^{+++} en ce qui nous concerne).

Précisons que cette étude n'aura pas la précision mathématique de celle effectuée sur le phosphore assimilable par la même technique (Fardeau J.C., 1975), et qui permet d'extrapoler ces cinétiques pour obtenir une valeur représentant la quantité de phosphore assimilable du sol par les plantes.

Cette méthode étant encore peu développée pour le fer, nous ne prétendons pas résoudre intégralement le problème de la mobilité de cet élément dans les sols par ce moyen ; elle n'est, pour l'instant, qu'une approche dans ce domaine.

II. MÉTHODE ET MATÉRIEL

1. La méthode utilisée permet donc de comparer, au cours du temps, la *mobilité apparente du fer*, dans divers types de sols. Les sols (prise d'essai : 30 g), soumis à 2 niveaux d'humidité (humidité équivalente et taux de saturation), sont mis à incuber à une t° voisine de 25°. Chacun des échantillons est traité seul ou avec un apport de matière organique, sous forme d'hydrosoluble concentré de litière tropicale.

Des prélèvements sont effectués à 0, 3, 10, 30 et 70 jours ; pour chacun de ces prélèvements, la mobilité du fer est estimée par la méthode cinétique de dilution isotopique.

Après avoir dispersé 10 g sol dans 100 ml eau, une certaine radioactivité de ^{55}Fe est introduite (10 μCi par pot environ) dans le mélange sol-eau, qui est agité en permanence. A des temps précis (1′ - 10′ - 30′ et 100′) on prélève à la seringue une petite quantité de suspension (2 à 3 ml) qu'on fait passer très rapidement sur filtre millipores (0,2 μ), afin d'obtenir un filtrat parfaitement limpide ; une aliquote connue de ce filtrat, contenant ^{55}Fe, est comptée en scintillation liquide, au SL 30.

Les résultats exprimés en % de ^{55}Fe resté en solution par rapport au ^{55}Fe introduit, montrent des différences d'un type de sol à l'autre, et pour un sol déterminé, des variations en fonction du traitement.

La suspension restante, après les prélèvements nécessaires à la cinétique, est centrifugée (à 100 000 g), puis passée sur millipores 0,2 μ ; on extrait ainsi les hydrosolubles, sur lesquels sont dosés C et Fe totaux. Le fer est mesuré à l'absorption atomique (technique du four) ; une remarque s'impose au sujet de ce dosage : les résultats varient dans d'énormes proportions pour peu que les centrifugation et filtration aient laissé passer un très léger trouble d'hydroxydes dispersés. C'est pourquoi, l'interprétation concernant les résultats du fer total en solution sera délibérément succincte.

Cet ensemble de mesures permet de préciser s'il existe effectivement une corrélation, d'une part entre ces 2 éléments C et Fe, sous la forme de complexes organo-minéraux, d'autre part entre ce fer et celui calculé par dilution isotopique, ce qui permettrait d'évaluer la mobilité potentielle du fer dans ces sols.

2. Matériel

Ce travail a porté sur les échantillons suivants :

A : sol ferrallitique fortement désaturé (Irobo - Côte d'Ivoire).
horizon A_{11} : 0-4 cm.

B : même sol - horizon A_1 : 0-35 cm.

C : sol ferrugineux tropical lessivé (Casamance - Sénégal), prélèvement : 0-15 cm.

D : sol rouge faiblement ferrallitique (Casamance - Sénégal), prélèvement : 0-15 cm.

E : modèle kaolin (20 %) + sable (78 %) + litière finement broyée (2 %).

F : modèle kaolin (20 %) + sable (74 %) + litière finement broyée (2 %) + $Fe(OH)_3$ (4 %).

G : podzol (Vosges-France) - horizon A_1 : 10-35 cm.

Le tableau I donne les principales caractéristiques physico-chimiques de ces sols.

TABLEAU I

Caractéristiques analytiques

Déterminations	A	B	C	D	G
pH eau	4,7	4,5	6,4	5,4	4,3
pH KCl	3,8	4,0	5,6	4,4	3,1
C (%)	2,70	1,08	0,50	1,18	2,65
N (‰)	2,05	0,92	0,39	0,94	0,94
C/N	13,2	11,7	12,8	12,6	28,2
granulométrie (%) argile	19,5	31,0	5,5	6,0	4,0
limon fin	10,5	11,0	4,0	4,0	2,0
limon grossier	5,0	5,5	11,5	6,8	2,6
sable fin	9,8	8,6	50,0	57,7	16,4
sable grossier	49,0	40,5	27,8	22,7	69,8
humidité	1,5	1,4	0,3	0,6	0,6
matière organique	4,7	2,0	0,9	2,2	4,6
bases échangeables (méq. %) Ca	1,60	0,50	1,75	1,60	0,10
Mg	0,95	0,52	0,80	0,56	0,20
K	0,19	0,06	0,04	0,06	0,03
Na	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01
S = somme des b. éch.	2,77	1,10	2,61	2,23	0,34
T = capacité d'échange	12,2	8,0	4,1	6,5	10,5
S/T	23 %	14 %	64 %	34 %	3 %
Fe_2O_3 % libre	2,45	4,60	0,70	0,60	0,25
Fe_2O_3 % total	2,60	4,70	0,80	0,90	0,30

III. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

Pour chaque échantillon, nous commenterons les courbes de cinétique obtenues et les résultats donnés par l'analyse des hydrosolubles. Nous avons adopté la dénomination suivante :

— X 1 : échantillon à l'humidité équivalente

— X' 1 : échantillon à l'humidité équivalente + apport d'hydrosoluble de litière.

— X 2 : échantillon au taux de saturation

— X' 2 : échantillon au taux de saturation + apport d'hydrosoluble de litière.

L'étude commence par l'analyse des 2 modèles, dans le but de faire apparaître certaines évidences applicables aux sols. Puis une comparaison entre certains types de sols est effectuée, pour souligner analogies ou différences relatives à la mobilité du fer dans les sols.

La première observation porte sur l'examen des courbes de cinétique : le ^{55}Fe resté en solution par rapport au ^{55}Fe introduit ne dépasse en aucun cas 35 % ; ce sont donc sur ces valeurs, comprises entre 0 et 35 % que nos commentaires porteront, les autres 65 % étant retenus par le sol, en majorité par la fraction minérale.

Par ailleurs, le facteur humidité n'ayant dans la plupart des cas aucune influence sur la mobilité du fer dans les conditions expérimentales décrites (excepté pour l'échantillon D), nous n'y reviendrons pas au cours de l'analyse suivante. Pour faciliter la représentation graphique, les temps sont reportés en log. sur les abscisses.

1. Modèle E : fig. 1

A. COURBES DE CINÉTIQUE : TABL. II

Sans apport de matière organique, le pourcentage de ^{55}Fe resté en solution, reflet de la mobilité du fer, n'est pas négligeable (10 à 15 %) ; pour E_1 comme pour E_2, le temps d'incubation n'a guère d'influence.

Un apport de matière organique soluble provoque un très net accroissement du taux de ^{55}Fe récupéré (jusqu'à 35 %), mais dans ce cas, le temps d'incubation agit sur la mobilité du fer : elle est maximum au jour « 3 », et diminue aux jours « 30 » et « 70 ».

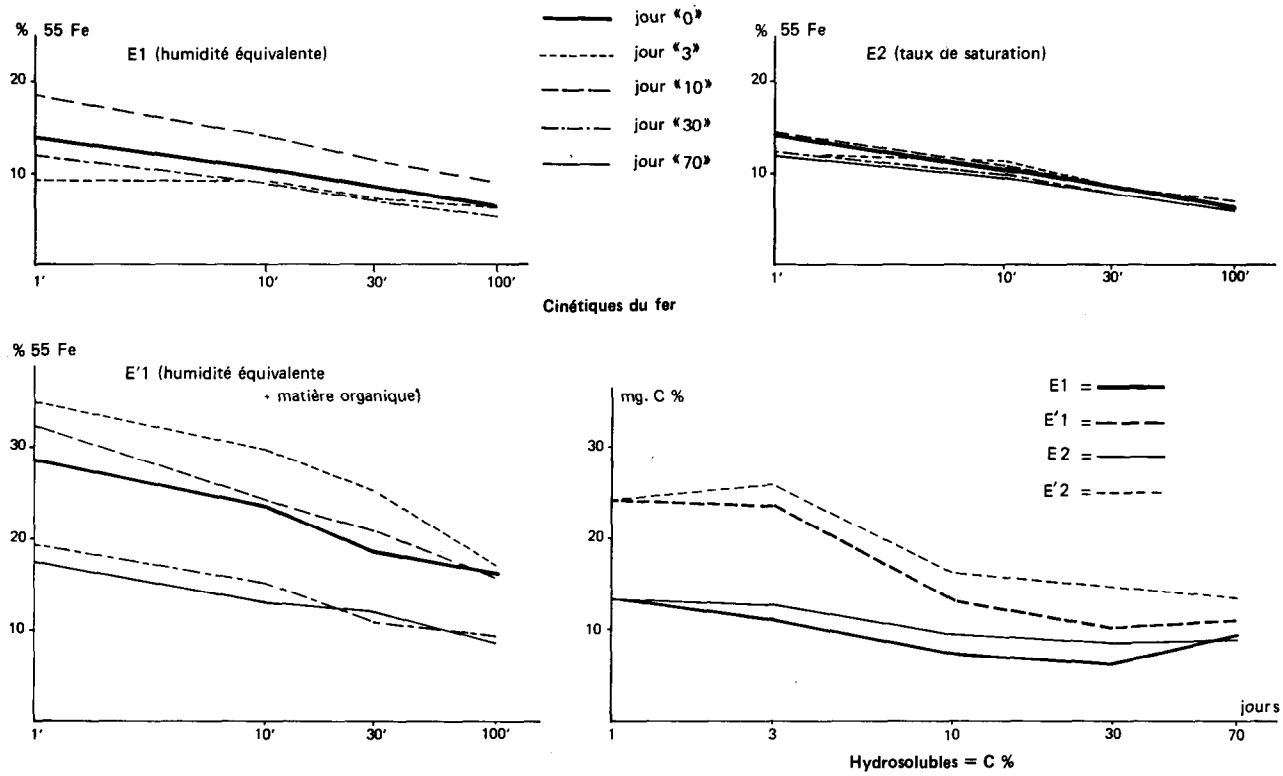


FIG. 1. — Modèle (E) = kaolin+sable+litière.

B. C ET Fe HYDROSOLUBLES

La solubilité de la matière organique pour E_1 et E_2 est faible : 13 mg C %, maximum ; elle diminue peu avec le temps. Par contre, pour E'_1 et E'_2 elle atteint le double (26 mg), et la diminution est beaucoup plus importante au cours de l'incubation. Cette différence de 13 mg entre les échantillons E et E′ est due à l'apport organique (hydrosoluble de litière) : celui-ci s'élevant à 21 mg C %, une partie de cet hydrosoluble a donc été retenue par la fraction argileuse dès le départ.

Au cours de l'incubation, 2 phénomènes ont pu jouer simultanément : minéralisation de cet hydrosoluble, et absorption par le kaolin.

Nous remarquons dans le cas de cet échantillon, que le C soluble est toujours plus important dans le traitement « taux de saturation » (courbes E_2 et E'_2 au-dessus des courbes E_1 et E'_1).

Les teneurs en fer total (tabl. III) extraites sont faibles, puisque le milieu ne contient pour ainsi dire pas de fer : 0,2 mg % pour E, et 0,3 pour E′. Les variations dans le temps sont peu importantes pour E_1 et E_2, elles le sont un peu plus pour E'_1 et E'_2. Les rapports mg Fe/g C sont par conséquent très bas : 13 en moyenne.

C. CONCLUSION

Bien que cet échantillon artificiel soit très pauvre en fer, la « mobilité potentielle » du fer s'y révèle bonne, d'autant meilleure si l'on ajoute une matière organique soluble ; car rien, dans ce milieu, n'empêche le fer de se complexer à la matière organique, même pas le kaolin.

2. Modèle F : fig. 2

A. Courbes de cinétiques : tabl. II

Ce modèle ne diffère du modèle E que par la présence de 4 % d'hydroxyde de fer(correspondant à une teneur normale d'un sol ferrallitique en Fe_2O_3), et nous observons une allure des courbes totalement différente.

Dans les 4 cas, le pourcentage de ^{55}Fe récupéré est infime : 1,5 % au jour « 0 » pour F, et près de 2 % pour F'. La présence d'hydroxyde immobilise donc entièrement le fer, et un apport de matière organique soluble ne provoque pour ainsi dire pas de mise en solution ; le temps ne fait que renforcer ce blocage.

B. C et Fe hydrosolubles

Le taux de matière organique soluble est faible, mais non négligeable (19 mg environ au jour « 0 »), il diminue encore avec le temps. Un apport de matière organique soluble ne provoque pas d'augmentation, à l'inverse de ce que nous avions observé pour E : elle subit donc une complexation avec l'hydroxyde, qui la rend insoluble.

Cet échantillon est le seul de notre étude pour lequel les 4 courbes de C hydrosoluble soient groupées et presque confondues.

Toutes les valeurs obtenues pour le fer total (tabl. III) sont très faibles, pour ne pas dire nulles, et les 3 facteurs : temps, humidité et apport de matière organique, sont absolument sans effet.

Tableau II

Cinétiques du fer

(% ^{55}Fe récupéré dans la solution)

Nos éch.	Jour « 0 »				Jour « 3 »				Jour « 10 »				Jour « 30 »				Jour « 70 »			
	1'	10'	30'	100'	1'	10'	30'	100'	1'	10'	30'	100'	1'	10'	30'	100'	1'	10'	30'	100'
A_1	13,2	8,2	6,2	3,9	10,2	5,2	3,8	3,0	13,7	7,1	4,9	3,5	12,6	8,0	6,0	4,4	6,9	5,9	4,8	3,9
A'_1	13,2	7,2	5,4	3,9	9,3	4,6	3,3	2,6	14,0	6,7	4,9	3,8	13,6	8,6	6,8	5,0	6,5	6,1	5,0	4,2
A_2	13,2	8,2	6,2	3,9	10,8	5,5	3,9	3,0	7,2	4,6	3,7	2,8	11,6	6,1	5,2	3,7	7,5	5,4	4,9	3,7
A'_2	13,2	7,2	5,4	3,9	8,8	4,8	3,1	2,5	9,5	5,7	4,8	3,9	13,6	8,2	5,7	4,0	7,9	6,0	5,6	4,6
B_1	3,8	2,2	1,4	0,9	5,5	2,0	1,4	0,9	0,3	0,2	0,2	0,1	0,4	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2
B'_1	2,3	1,4	0,9	0,6	1,1	0,6	0,4	0,3	0,6	0,3	0,3	0,2	0,8	0,4	0,3	0,2	0,5	0,4	0,4	0,3
B_2	3,8	2,2	1,4	0,9	3,2	1,6	1,1	1,0	0,4	0,3	0,2	0,1	0,5	0,3	0,2	0,2	0,4	0,3	0,3	0,2
B'_2	2,3	1,4	0,9	0,6	0,6	0,4	0,3	0,2	0,6	0,3	0,3	0,2	0,8	0,5	0,4	0,1	0,6	0,4	0,3	0,3
C_1	4,2	2,9	2,4	1,6	2,8	1,9	1,6	1,3	3,0	2,1	1,9	1,5	2,3	1,8	1,7	1,2	1,2	1,1	0,9	0,9
C'_1	18,4	13,2	10,4	6,8	11,7	8,4	6,6	4,8	8,2	5,1	3,9	3,3	5,4	3,3	2,5	1,9	2,1	1,8	1,5	1,1
C_2	4,2	2,9	2,4	1,6	3,0	1,7	1,6	1,3	3,0	2,3	1,6	1,1	2,3	1,8	1,3	1,1	1,4	1,0	1,0	1,1
C'_2	18,4	13,2	10,4	6,8	10,4	7,9	6,0	4,3	9,8	5,4	3,8	3,1	4,2	2,7	2,1	1,2	2,2	1,7	1,6	1,3
D_1	18,6	11,8	7,9	5,7	23,1	14,1	8,9	6,0	13,4	8,9	5,8	3,8	5,4	3,6	2,4	1,8	5,4	2,8	2,0	1,4
D'_1	30,1	17,2	13,4	9,6	37,4	19,8	14,8	9,0	24,6	14,9	11,0	6,8	8,1	5,4	4,1	2,4	7,1	3,7	2,5	1,7
D_2	18,6	11,8	7,9	5,7	34,8	17,6	12,4	7,1	21,3	12,0	7,5	5,0	11,2	6,5	4,3	3,0	5,3	3,5	1,9	1,5
D'_2	30,1	17,2	13,4	9,6	36,4	22,5	13,7	8,2	25,1	15,5	10,9	6,4	16,9	9,5	6,3	4,1	7,9	4,6	3,2	2,2
E_1	13,8	10,4	8,5	6,2	9,2	9,2	7,3	6,3	18,6	14,1	11,5	9,1	11,9	8,9	7,0	5,3	13,9	10,7	8,4	6,8
E'_1	28,6	23,5	18,6	16,0	34,9	29,7	25,2	17,1	32,3	24,3	20,9	15,7	19,3	15,2	10,8	9,3	17,5	13,1	11,8	8,6
E_2	13,8	10,4	8,5	6,2	12,2	11,4	8,5	6.5	14,4	10,8	8,5	6,9	12,5	10,0	7,9	6,0	11,9	9,7	7,8	6,0
E'_2	28,6	23,5	18,6	16,0	35,5	26,9	21,2	15,9	26,5	25,0	18,2	12,8	22,7	17,1	13,4	10,7	18,3	15,4	12,1	9,7
F_1	1,4	0,2	0,1	0,1	0,4	0,1	0	0	0,6	0,2	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0	0,2	0,1	0,1	0
F'_1	1,8	1,1	1,0	1,0	0,4	0,1	0,1	0,1	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1
F_2	1,4	0,2	0,1	0,1	0,6	0,1	0,1	0	0.5	0,1	0,1	0	0,2	0,1	0	0	0,1	0	0	0
F'_2	1,8	1,1	1,0	1,0	0,8	0,2	0,3	0,2	0,5	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0	0,3	0,1	0,1	0
G_1	23,3	10,0	5,7	3,3	33,1	18,3	10,8	5,2	30,7	18,5	11,8	6,1	17,1	11,3	7,3	4,5	31,9	21,9	18,2	11,6
G'_1	29,8	15,9	9,7	5,2	33,9	16,0	9,5	4,3	30.5	18,4	11,5	5,7	18,7	11,2	8,8	5,2	33,9	26,2	19,2	12,8
G_2	23,3	10,0	5,7	3,3	35,4	20,5	11,3	5,5	28,1	16,5	9,6	4,3	17,6	10,9	7,7	4,6	29,9	23,0	17,0	10,6
G'_2	29,8	15,9	9,7	5,2	30,6	15,9	7,8	4,2	29,3	15,0	7,9	4,0	17,0	10,8	8,0	4,8	32,8	21,0	14,5	10,3

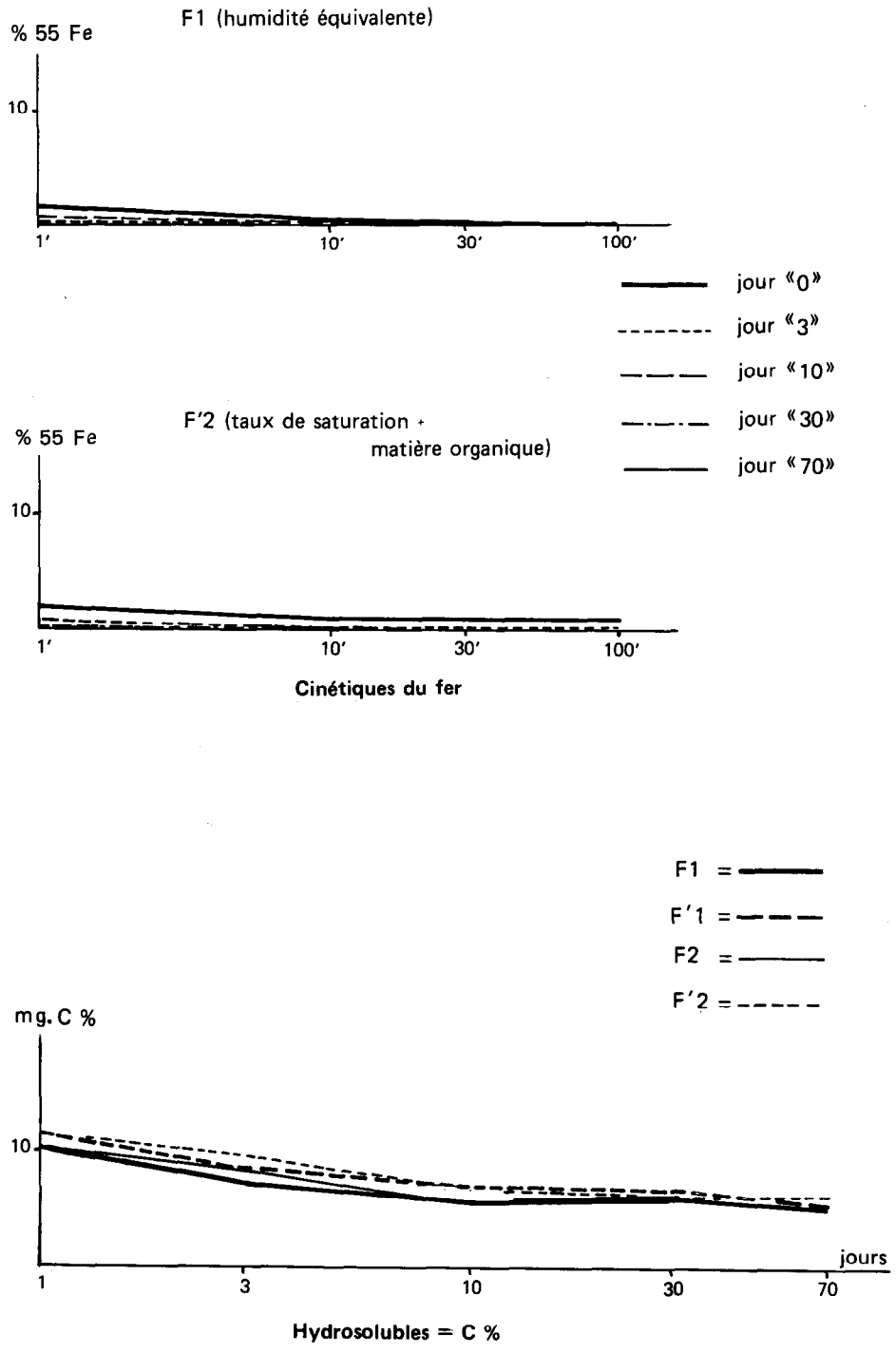


FIG. 2. — Modèle F : kaolin+sable+litière+$Fe(OH)_3$.

TABLEAU III

Hydrosolubles = Fe (mg %)

Sols	Jour « 0 »		Jour « 3 »		Jour « 10 »		Jour « 30 »		Jour « 70 »	
	0,2 μ	0,01 μ	0,2 μ	0,01 μ	0,2 μ	0,01 μ	0,2 μ	0,01 μ	0,2 μ	0,01 μ
A_1	2,38		3,43		1,97	1,86				
A'_1	1,93		2,23		2,23	—				
A_2	2,38		1,68		2,11	—				
A'_2	1,93		1,56		2,03	—				
B_1	0,02	—	0,10		(0,66)	0,03			—	—
B'_1	(0,90)	0,01	0,32		(0,63)	0,05			—	—
B_2	0,02	—	0,20		—	0,04			(1,76)	0,10
B'_2	(0,90)	0,01	0,29		—	0,09			(1,28)	0,06
C_1	0,24		0,07		(0,68)	0,10			0,25	
C'_1	0,67		0,35		(0,97)	0,11			0,42	
C_2	0,24		0,06		(0,56)	0,14			0,48	
C'_2	0,67		0,17		(0,87)	0,16			0,16	
D_1	0,46		0,35		(0,49)	0,09			0,12	—
D'_1	1,35		0,78		(0,53)	0,13			0,74	—
D_2	0,46		1,79		(0,65)	0,37			(2,40)	0,07
D'_2	1,35		2,70		(1,22)	0,49			(2,40)	0,09
G_1	0,24		—		0,21		0,17		0,35	
G'_1	0,49		—		0,63		0,19		0,56	
G_2	0,24		—		0,18		0,16		0,28	
G'_2	0,49		—		0,23		0,32		0,31	
E_1	0,19		0,18		(0,17)	0,07	—		0,26	
E'_1	0,29		0,31		(0,17)	0,12	—		0,15	
E_2	0,19		0,15		0,12	—	0,13		0,12	
E'_2	0,29		0,22		0,28	—	0,17		0,18	
F_1	0,02	—	0,02		0,04		0,02		0	
F'_1	(0,44)	0,02	0,31		0,02		0,03		0,02	
F_2	0,02	—	0,06		0,01		0,01		0	
F'_2	(0,44)	0,02	0,26		0,04		0,01		0,01	

C. CONCLUSION

La présence d'hydroxyde de fer dans ce modèle a entièrement modifié le comportement du fer, qui n'a plus aucune mobilité potentielle quel que soit le milieu. Malgré une relative solubilité de la matière organique, le fer n'a pas donné de complexes solubles ; il se produit un véritable blocage au niveau matière organique et fer, provoqué par l'hydroxyde de fer, et qui ne fait que s'accentuer avec le temps.

3. Echantillon A : horizon A_{11} (0-4 cm) du sol ferrallitique fortement désaturé (fig. 3)

A. COURBES DE CINÉTIQUE : TABL. II

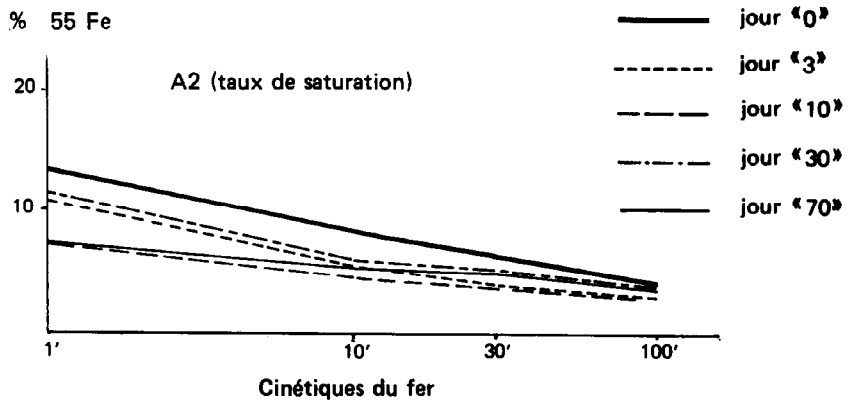
Les 4 ensembles de courbes présentent le même aspect : ces courbes sont assez aplaties, c'est-à-dire que le ^{55}Fe récupéré même à 1′ ne dépasse pas 15 % du ^{55}Fe introduit, et à 100′ il est encore de 4 %.

La variation en fonction du temps est très peu importante, les courbes se chevauchent les unes les autres sans ordre défini. On peut cependant noter une diminution générale de la mobilité potentielle au 3e jour, et une remontée au 30e jour : l'incubation ne provoque donc pas un blocage particulier du fer.

La cinétique du fer dans cet échantillon paraît également indépendante et de la teneur en eau, et de la teneur en matière organique.

B. C ET Fe HYDROSOLUBLES

Le taux de C total extrait est le plus élevé des échantillons étudiés : plus de 60 mg C % au jour « 0 ». Il diminue avec le temps, reste relativement constant entre 3 et 10 jours, mais au jour « 70 », ce taux est



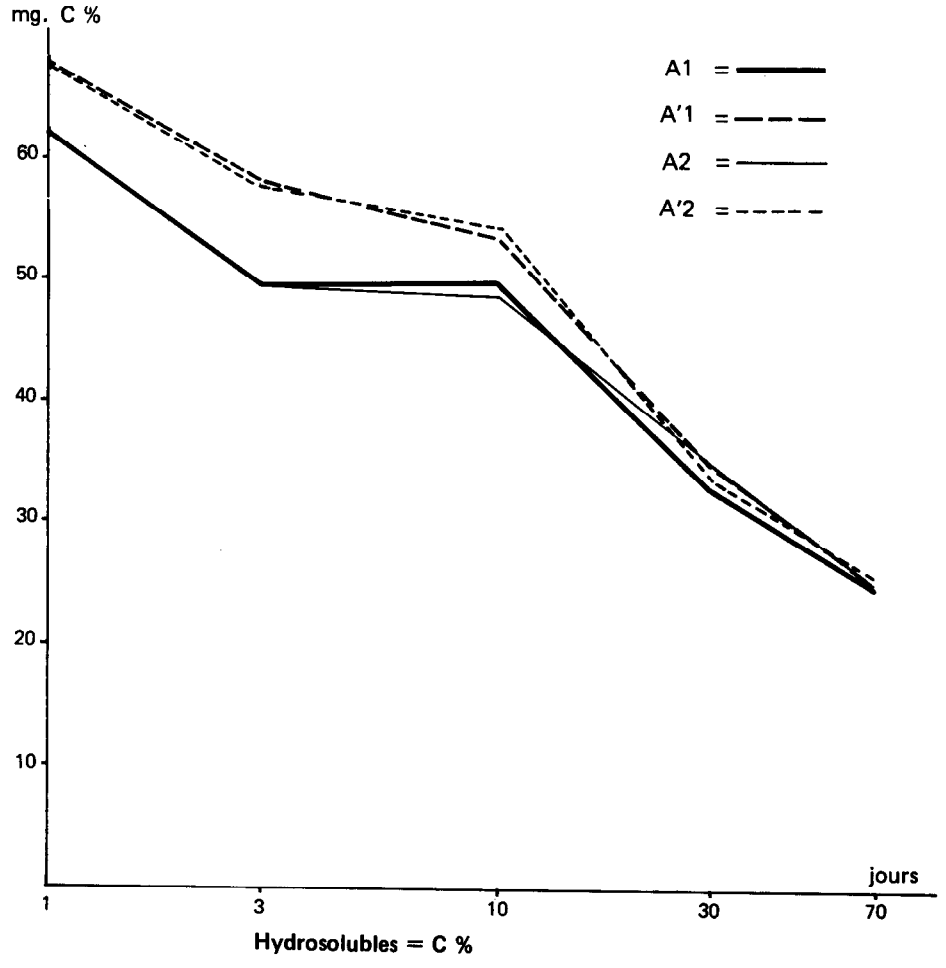


FIG. 3. — Sol ferrallitique (A) = horizon A_{11} (0-4 cm).

la moitié de ce qu'il était au jour « 3 ». La matière organique paraît donc s'insolubiliser essentiellement à partir du 10e jour. Quant à l'extrait de litière ajouté (cas de A'_1 et A'_2), on le retrouve également jusqu'au 10e jour, mais au 70e jour, les 4 courbes se rejoignent : cet hydrosoluble se serait en partie minéralisé et en partie insolubilisé.

De même que pour le carbone soluble, le taux de fer (tabl. III) mis en solution est le plus élevé que nous ayons obtenu (2 et 3 mg %) ; ce Fe est particulièrement soluble, puisque nous récupérons le même taux après passage sur millipores 0,01 μ. Les rapports mg Fe/g C sont très élevés pour des hydrosolubles : 40 environ.

On peut estimer que ces complexes très riches en fer, se trouvent à la limite de la mobilité, car nous verrons qu'un accroissement du taux de fer ou une diminution du taux de matière organique les insolubilisent, comme dans le cas de l'échantillon B.

C. Conclusion

Si l'on compare cet échantillon de sol au modèle F, on constate que dans ce cas, la mobilité potentielle du fer est effective, malgré la présence d'une teneur élevée en fer libre : 2,5 % (4 % dans le cas de F).

Un taux relativement élevé de matière organique totale (2,7 %) ayant une solubilité certaine, est vraisemblablement à l'origine de cette mobilité du fer ; nous avons vu cependant que celle-ci ne variait pas sous l'influence d'un accroissement du taux d'humidité, ou d'un apport de matière organique soluble.

Les débris végétaux de cet horizon de surface fournissent des précurseurs solubles à petites molécules, qui ont une réelle affinité pour Fe.

4. Echantillon B : horizon A_1 (0-35 cm) du sol ferrallitique fortement désaturé (fig. 4)

A. Courbes de cinétiques : tabl. II

Les courbes obtenues sont très aplaties sur l'axe des abscisses, et très voisines de celles du modèle F. Dans les premiers jours uniquement, on récupère 4 à 5 % environ du ^{55}Fe introduit, dans le cas de B_1 et B_2, mais 2,5 % seulement dans le cas de B'_1 et B'_2, pour terminer en fin de cinétique à moins de 1 %. A partir du 10e jour, presque tout le fer est bloqué, et la récupération ne porte que sur 0,5 % environ.

Nous observons peu de différences entre les traitements ; un ajout de matière organique semble bloquer un peu plus le fer, tout au moins au jour « 0 ».

B. C et Fe hydrosolubles

— Le carbone est loin d'être négligeable, et peut atteindre 25 mg % ; la proportion diminue assez régulièrement avec le temps : au jour « 70 », on en retrouve moins de la moitié. Un apport de matière organique accroît le taux de C hydrosoluble dans une faible proportion, mais pour B comme pour B', ces valeurs sont abaissées lorsque le sol est amené au taux de saturation.

Ces courbes sont donc différentes de celles du C soluble du modèle F, pour lequel les 4 courbes se confondaient plus ou moins.

— Toutes les valeurs concernant le fer sont très faibles (tabl. III), même celles mesurées au jour « 0 ». Il n'est guère possible de distinguer quelque facteur influent, que ce soit le temps d'incubation, l'humidité ou la matière organique. Bien évidemment, les rapports Fe/C sont très bas.

C. Conclusion

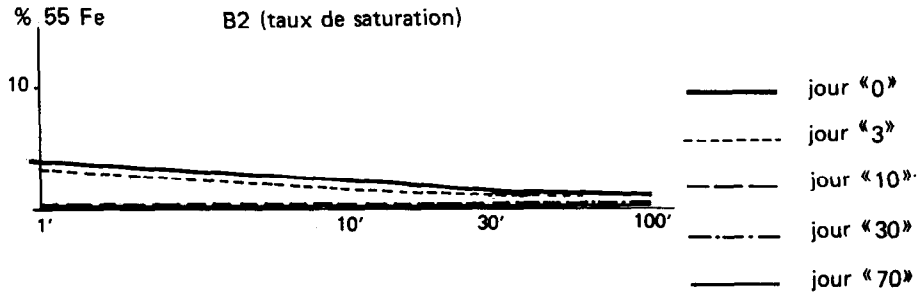
Dans cet échantillon, il y a proportionnellement peu de Fe soluble par rapport à la matière organique soluble, et les courbes de cinétique indiquent nettement une immobilité du fer quelles que soient les conditions : le fer est plus ou moins bloqué sur la fraction minérale, très riche en Fe_2O_3 libre (4,6 %). Nous avons signalé dans un article précédent (C. Thomann *et al.*, 1975) le peu de mobilité du fer après 15 jours d'incubation ; comparé à l'échantillon A, les liaisons C-Fe semblent ici différentes (complexes pseudo-solubles).

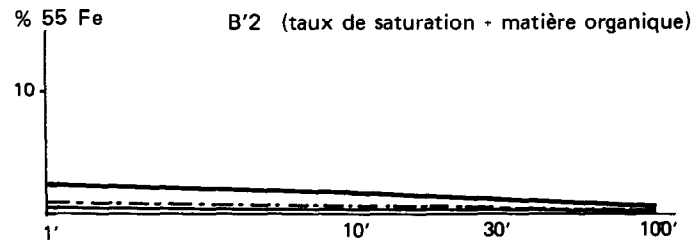
5. Echantillon C : sol ferrugineux tropical lessivé (0-15 cm) (fig. 5)

A. Courbes de cinétique : tabl. II

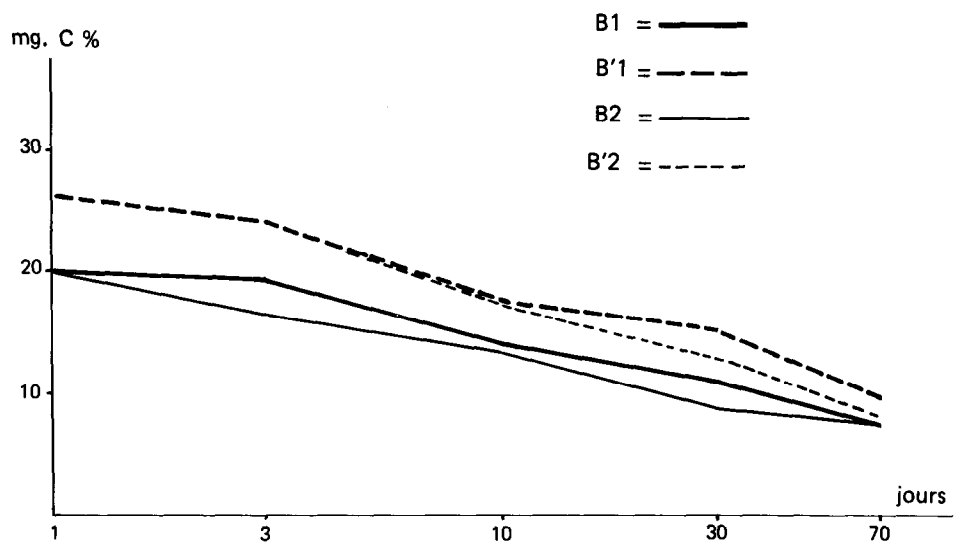
Une différence essentielle ressort à l'examen de ces courbes : un apport de matière organique modifie profondément le comportement du fer dans ce sol.

C_1 et C_2 sont très semblables : l'humidité n'a donc aucune influence sur la cinétique du fer. Les courbes sont très aplaties, débutant à moins de 5 % au jour « 0 », et 1 % au jour « 70 », et se terminant à 100' entre 1 et 2 %.



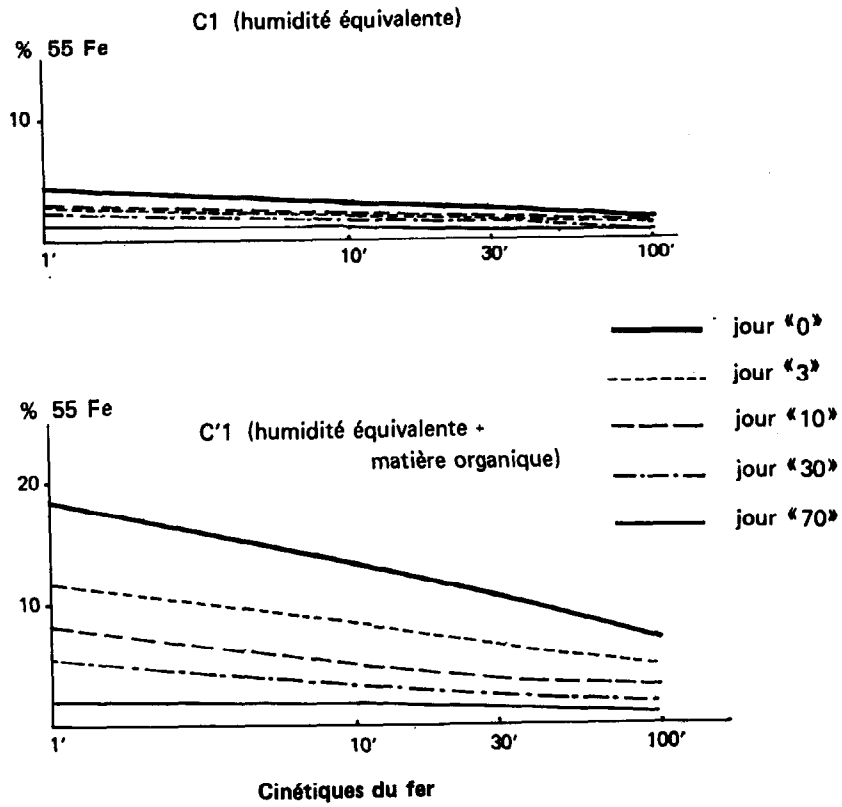


Cinétiques du fer



Hydrosolubles = C %

FIG. 4. — Sol ferrallitique (B) = horizon A, (0-35 cm).



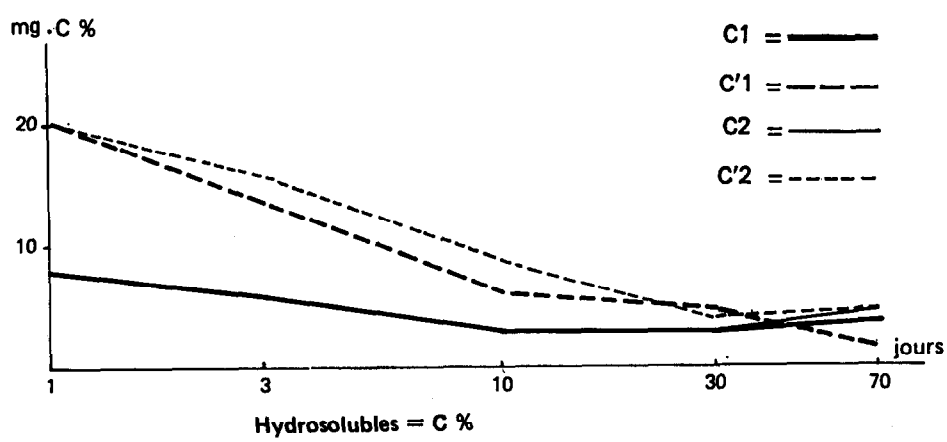


FIG. 5. — Sol ferrugineux tropical lessivé (C) = 0-15 cm.

Un enrichissement en matière organique (courbes C'_1 et C'_2) dans la proportion de 4 % par rapport au C du sol, augmente très nettement la mobilité potentielle du fer de ce sol. Les courbes débutent à plus de 18 % dans les 2 cas, et les proportions de ^{55}Fe récupéré diminuent très régulièrement lorsque les temps d'incubation augmentent. Là non plus, le facteur humidité ne joue pas.

B. C ET Fe HYDROSOLUBLES

Les valeurs obtenues pour le carbone soluble et représentées par les 2 courbes C_1 et C_2 sont très faibles : 8 mg C % au jour « 0 », elles diminuent régulièrement avec le temps. Avec C'_1 et C'_2, les valeurs atteignent 20 mg au jour « 0 » ; au cours de l'incubation, cette matière organique apportée a tendance à se minéraliser, et/ou à se fixer.

On peut donc penser que dans ce sol sableux, la matière organique soluble apportée reste en grande partie soluble provoquant la mise en solution d'une certaine quantité de fer.

Au jour « 0 », les valeurs obtenues pour le fer (tabl. III) font ressortir la différence entre C et C' : 0,25 mg % et 0,65 mg % respectivement. Ces valeurs tendent à s'égaliser avec le temps.

C. CONCLUSION

Dans ce cas, il paraît évident que la matière organique soluble est bien le facteur réel de mobilité du fer, alors que le facteur eau n'intervient pas. Il existe donc une bonne concordance entre les cinétiques de ^{55}Fe, les teneurs en fer hydrosoluble et les matières organiques hydrosolubles.

6. Echantillon D : sol rouge faiblement ferrallitique (0-15 cm) (fig. 6)

A. COURBES DE CINÉTIQUE : TABL. II

On remarque des valeurs assez élevées pour l'ensemble des 4 courbes, laissant supposer une grande mobilité du fer. D_1 et D_2 sont différents, mais D'_1 et D'_2 sont très semblables. La courbe de cinétique correspondant au jour « 3 » est toujours placée en deçà de celle du jour « 0 » : elle traduit une mobilité potentielle du fer maximum pour ce sol, qui pourrait être le reflet d'une certaine activité biologique sur les « pseudo-particules » (particules enrobées d'hydroxydes de fer), caractéristique de ce type de sol.

La courbe D_1 nous donne les valeurs les plus faibles en % de ^{55}Fe récupéré, mais néanmoins assez élevées par rapport aux autres sols : 23 % au jour « 3 », ces valeurs diminuent avec le temps.

La courbe D_2 est différente de D_1 : un excès d'eau a modifié le comportement du Fe, en le rendant beaucoup plus mobile : 35 % de ^{55}Fe récupéré au jour « 3 », puis il y a diminution progressive.

Un ajout de matière organique a nettement augmenté la mobilité potentielle du Fe de ce sol, mais guère plus qu'un excès d'eau ; ce sol est donc sensible en premier lieu à un excès d'humidité, qui peut être compensée par un ajout de matière organique.

B. C ET Fe HYDROSOLUBLES

Contrairement aux autres échantillons, les 4 courbes du carbone sont bien différenciées, faisant donc ressortir à la fois, l'influence d'un excès d'eau et de l'apport d'une matière organique soluble, sur la solubilité du carbone. Ce n'est qu'au 70e jour, que les 4 courbes s'entrecroisent.

Le sol maintenu au taux de saturation conserve au cours de l'incubation une matière organique beaucoup plus soluble à l'eau, que dans le cas du sol à l'humidité équivalente.

Bien qu'il ne faille pas accorder trop d'importance aux valeurs absolues obtenues pour le fer (tabl. III), on remarque cependant qu'au jour « 0 » le fer soluble est nettement augmenté par un apport de matière organique ; puis cette tendance diminue avec le temps, pour faire place à une différence entre la série 1 et la série 2, montrant ainsi l'influence d'un excès d'humidité sur la mise en solution du fer.

C. CONCLUSION

D'après toutes ces données, ce sol paraît être un milieu très favorable à la mobilité du fer, accrue par un excès d'eau et par un apport de matière organique soluble.

Dans ce cas également, cinétiques et dosage des éléments hydrosolubles aboutissent aux mêmes conclusions, en faisant ressortir la liaison étroite existant entre la mobilité du fer et la solubilité de la matière organique.

Fauck (1972) précise en effet que dans ces sols, il n'y a pas de phénomènes d'appauvrissement (portant sur le fer et l'argile) sans présence de matière organique.

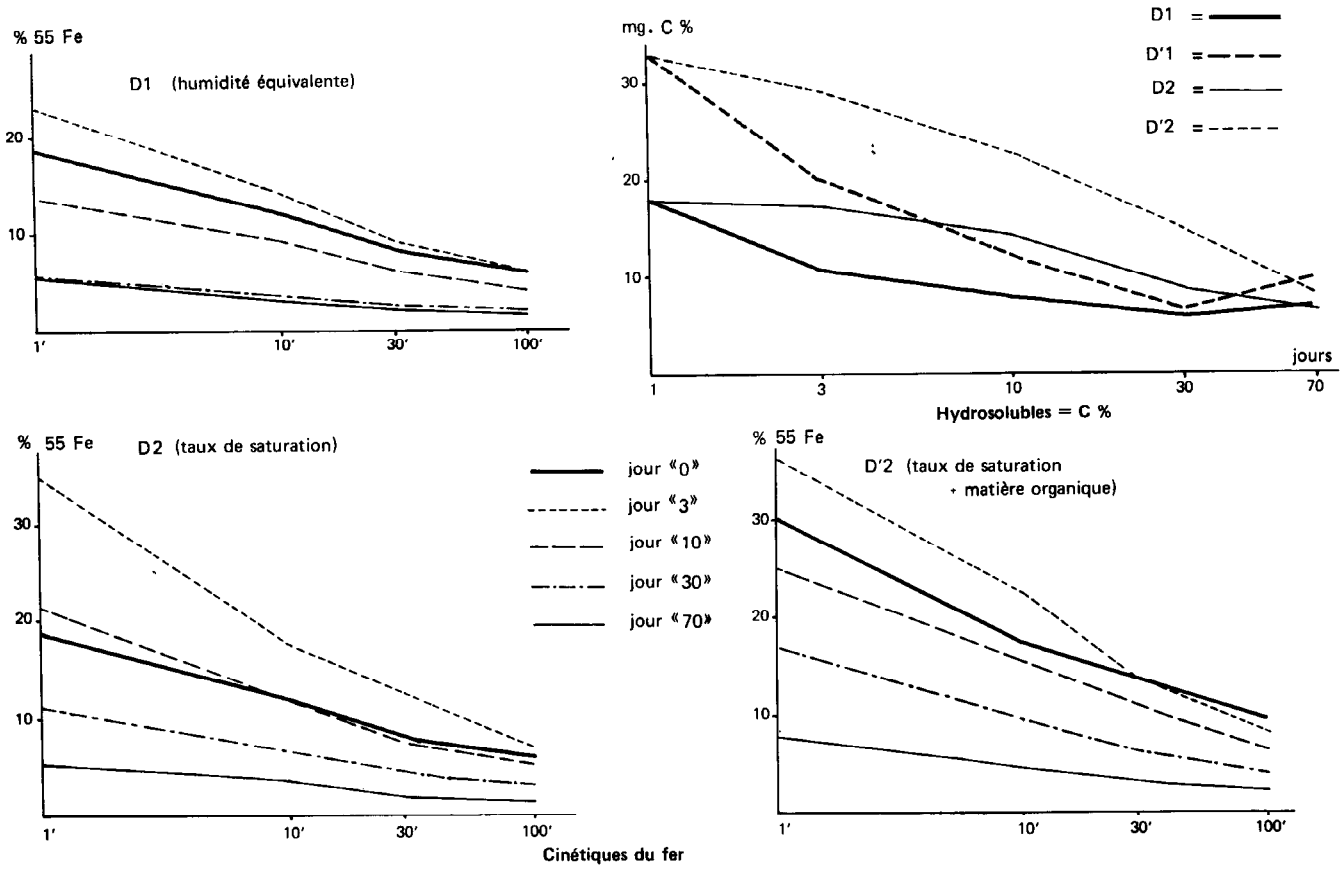


FIG. 6. — Sol rouge faiblement ferrallitique (D) = 0-15 cm.

Comparé à l'échantillon C, et bien qu'ayant la même texture et le même taux de Fe_2O_3, ces 2 sols présentent des cinétiques très différentes.

7. Echantillon G : horizon A_1 (10-35 cm) de podzol (fig. 7)

A. Courbes de cinétique : tabl. II

Les courbes sont, dans l'ensemble, assez groupées pour chacun des graphiques, et très peu différentes dans les 4 cas. Seule la courbe correspondant au jour « 70 » se retrouve au-dessus des autres d'une façon générale : phénomène que nous n'avons observé pour aucun autre échantillon. La cinétique du fer dans ce sol n'est pas sensible à un apport de matière organique, mais on peut remarquer un meilleur regroupement des courbes dans le cas de G'_1 et G'_2.

Toutes ces courbes débutent à un pourcentage élevé : 25 à 35 % de ^{55}Fe récupéré ; seule la courbe jour « 30 » est au-dessous des autres, lesquelles se situent au-dessus de la courbe jour « 0 ».

Dans ce sol, la mobilité du fer paraît importante, mais avec le temps elle subit des fluctuations, correspondant sans doute aux phases de solubilisation et d'insolubilisation signalées par Berthelin (1970).

B. C et Fe hydrosolubles

Les courbes obtenues pour le carbone sont très aplaties, témoignant d'une solubilité constante en fonction du temps. G_1 et G_2 se superposent, tout comme G'_1 et G'_2 ; les courbes restent parallèles, alors que pour les autres sols, elles se recoupent entre 30 et 70 jours. Comme pour l'échantillon A, on

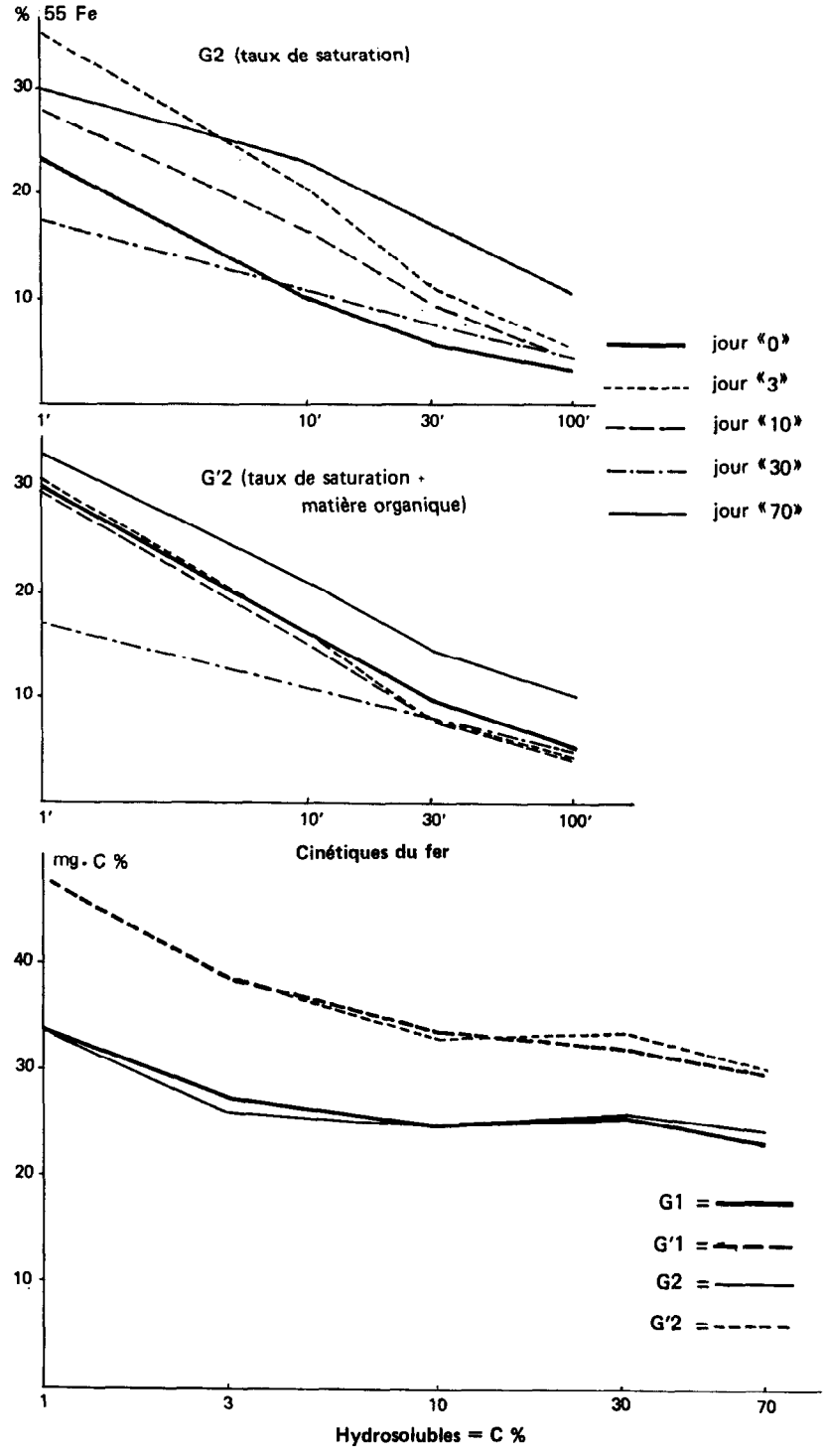


FIG. 7. — Podzol (G) = horizon A_1 (10-35 cm).

retrouve encore 25 à 30 mg C soluble % après 70 jours d'incubation, ce qui est important.

L'hydrosoluble de litière ajouté s'est donc comporté différemment dans ce sol : soit en ne se minéralisant que faiblement, soit en s'insolubilisant très peu.

Les valeurs obtenues pour le fer sont faibles (0,25 mg % pour G, et 0,50 pour G′ au jour « 0 ») tabl. III. Compte tenu des erreurs inévitables pour cette mesure, il semble que les variations au cours du temps soient minimes. Comparé à l'échantillon A, les rapports Fe/C sont très faibles, de l'ordre de 10 mg Fe/g C.

C. Conclusion

Les courbes de cinétique laissent prévoir une grande mobilité du fer dans ce sol, bien que les hydrosolubles en révèlent très peu. Cette mobilité est indépendante de la variation du taux d'humidité, du taux de matière organique, et du temps d'incubation : il semble que dans cet horizon, le fer soit libre de se mouvoir, lié à une certaine fraction de C organique.

A taux égal de matière organique totale, l'échantillon A renferme plus de Fe complexé que G, mais la mobilité du fer dans G est supérieure à celle de A : les chélates de A seraient à la limite de saturation en fer, freinant alors leur mobilité.

IV. CONCLUSION

Les résultats relatifs à la mobilité du fer ainsi exposés pour chacun des sols, nous permettent d'établir des comparaisons entre certains d'entre eux, qui présentent par ailleurs quelques analogies du point de vue pédologique :

— horizons A_{11} et A_1 du sol ferrallitique

— sol ferrugineux tropical lessivé et sol faiblement ferrallitique

— horizon A_{11} du sol ferrallitique et horizon A_1 du podzol.

Nous passons ainsi du domaine ferrallitique au domaine ferrugineux tropical, et le podzol de la zone tempérée sera opposé à la zone tropicale.

Nous rappellerons tout d'abord un point très important que la comparaison des 2 modèles nous a permis de préciser : la présence d'hydroxyde de fer, dans une certaine proportion, immobilise le fer en solution, alors que l'argile apparemment n'intervient pas sur cette mobilité potentielle du fer.

1. Comparaison entre l'horizon A_{11} et l'horizon A_1 du sol ferrallitique

Dans le cas de l'échantillon de surface, malgré un taux de Fe_2O_3 très élevé (2,5 %), une mobilité potentielle certaine du fer existe ; C et Fe extraits dans la fraction hydrosolubles sont en assez fortes proportions, et les rapports mg Fe/gC sont les plus élevés qu'on ait obtenus parmi les sols étudiés.

Par contre pour l'horizon A_1, la teneur moins élevée en matière organique totale, et l'accroissement important du taux de Fe_2O_3 (4,6 %) ont pour conséquence une très faible mobilité potentielle du fer, qui devient nulle dès le 10e jour d'incubation. D'après les courbes de cinétique, la variation du taux d'humidité et un apport de matière organique soluble, ne modifient en rien la solubilisation du fer. Les valeurs de C et Fe des hydrosolubles sont faibles: pour Fe par exemple, les quelques chiffres obtenus pour le jour « 3 » indiquent une teneur 10 fois moindre que pour l'échantillon de surface.

Si donc, une mobilité apparente des complexes C - Fe existe en surface, très rapidement ces complexes diminuent d'importance ou se modifient, reflétant un certain blocage dans le profil, tout au moins à l'état soluble.

Nous ne nous étonnerons donc pas des résultats obtenus lors de l'expérience avec le maïs marqué et ^{55}Fe sur cet horizon A_1 (C. Thomann *et al.*, 1975) : après 75 jours d'incubation, nous ne pourions guère retrouver dans la fraction hydrosoluble du fer lié à la matière organique. L'échantillon de surface nous aurait certainement donné des résultats différents et peut-être plus intéressants.

En domaine ferrallitique, l'importance de la teneur en hydroxydes de fer libres, qui augmente avec la profondeur du profil, limite donc la migration du fer soluble ; celle-ci n'existe réellement qu'en surface, là où la matière organique est en quantité suffisante pour entraîner et/ou complexer ce fer.

2. Comparaison entre le sol ferrugineux tropical lessivé et le sol rouge faiblement ferrallitique

Ces 2 sols de Casamance (Sénégal), bien que soumis aux mêmes conditions climatiques, formés sur une même roche-mère, présentent une morphologie très différente. Les résultats analytiques relatifs à la granulométrie, aux bases échangeables et au fer libre sont tout à fait analogues, seuls le pH, la capacité d'échange et le taux de matière organique sont différents : le sol

rouge étant plus acide que le sol beige (ferrugineux tropical lessivé), et 2 fois plus riche en matière organique.

Les courbes de cinétique du fer sont très différentes : pour le sol beige, les taux de récupération du ^{55}Fe sont minimes dans le cas du sol soumis soit à la capacité de rétention, soit au taux de saturation : la mobilité du fer apparaît donc comme presque nulle, et l'humidité n'a aucune influence. Mais il en est tout autrement si ce sol est enrichi en matière organique (accroissement de 4 % par rapport au C préexistant) ; les courbes de solubilisation de ^{55}Fe débutent à 20 %, et diminuent très régulièrement au fur et à mesure que les temps d'incubation augmentent. Dans ce cas, il semble bien que le fer soit « débloqué » par un apport de matière organique ; les valeurs obtenues pour C et Fe solubles semblent concorder parfaitement avec la cinétique : ces valeurs sont nettement accrues avec un apport de matière organique. Ce phénomène se produirait donc en début de saison des pluies, alors que les produits organiques solubles de la litière seraient entraînés par l'eau de pluie ; si ces composés organiques diminuent avec la pénétration dans le profil, le fer complexé aura tendance à précipiter. Maignien (1961) avait déjà souligné que « les tendances à l'immobilisation du fer sont plus marquées en sols ferrugineux tropicaux ».

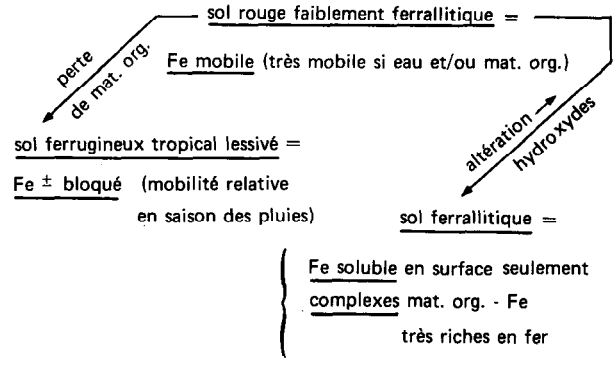
Pour le sol rouge, les courbes de cinétique du Fe donnent des valeurs très élevées, laissant supposer une grande mobilité du fer. Ce sol est sensible aux variations d'humidité : le fer potentiellement mobile augmente lorsque l'on passe de la capacité de rétention au taux de saturation ; un enrichissement en matière organique produit le même effet. Les valeurs de C et Fe solubles sont à peu près le double de celles obtenues pour le sol beige, et la variation soulignée dans les courbes de cinétique se retrouve pour ces valeurs : la teneur en matière organique hydrosoluble de l'échantillon soumis à une humidité voisine de la saturation diminue beaucoup moins vite avec le temps que celui soumis à la capacité de rétention.

Le sol rouge possède donc une mobilité potentielle du fer très forte, accrue encore s'il est soumis à saturation, donc au plus fort de la saison des pluies, ou s'il est enrichi en matière organique. C'est dire que ce sol aura à chaque saison des pluies une remise en circulation du fer, s'effectuant sans doute par l'intermédiaire des matières organiques, tout au moins pour cet horizon de surface. Si nous imaginons maintenant que ce sol vienne à perdre la moitié de sa teneur en matière organique totale (cas d'un sol forestier tropical défriché, après 2 ans de culture), on peut supposer que les relations C-Fe auraient le même comportement que celles du sol beige, et que ce serait peut-être là, un des facteurs d'évolution du sol rouge en sol beige.

Nous citerons Fauck (1972) à ce sujet : « il est probable que de nombreux sols ferrugineux tropicaux beiges lessivés à concrétions, dérivent d'anciens sols « rouges », peut-être par simple modification du couvert végétal (savanisation ou actions culturales) ».

Ce sol rouge faiblement ferrallitique, du point de vue mobilité potentielle du fer, paraît donc être en équilibre entre 2 pôles, représentés par le sol ferrallitique (échantillons A et B) *et le sol ferrugineux tropical lessivé* (échantillon C). Une diminution du taux de matière organique le ferait basculer vers le domaine ferrugineux tropical, et une augmentation du taux d'hydroxydes de fer (résultat d'une altération plus poussée, conséquence d'un milieu plus humide) diminuerait également la mobilité du fer, le faisant évoluer vers le domaine ferrallitique proprement dit, pour lequel les facteurs humidité et taux de matière organique sont secondaires par rapport au facteur teneur en hydroxydes.

Autrement dit, le problème de la mobilité du fer dans le processus de ferrallitisation (définie par Maignien, 1961, comme « un ensemble de processus naturels d'hydrolyses intenses et extrêmement poussées qui provoquent la rupture du réseau cristallin des minéraux primaires-alumine-silicates-des roches. ») peut être schématisé de la manière suivante :



Il nous reste à envisager le cas du podzol, que l'on peut comparer à l'horizon de surface du sol ferrallitique.

3. Comparaison entre l'horizon A_{11} du sol ferrallitique et l'horizon A_1 du podzol

Ces 2 échantillons ont la même teneur en C total (2,7 %), mais le podzol contient 10 fois moins de Fe_2O_3 libre que le sol ferrallitique, et 5 fois moins d'argile.

Pour le podzol, la cinétique du fer étant indépendante à la fois de l'humidité, du taux de matière organique et du temps d'incubation, on ne voit donc pas ce qui pourrait entraver la migration du fer. Les complexes matière organique-fer du podzol, sont riches en C, mais pauvres en Fe ; même si au cours de la migration dans le profil le taux de fer complexé augmente, il n'y aura pas insolubilisation, car les mélocules organiques pourront encore adsorber du fer. L'insolubilisation ne se produira que dans l'horizon B, où la présence d'hydroxydes provoquera la précipitation du fer.

Dans le sol ferrallitique, on note que pour une quantité double de C soluble, l'horizon A_{11} contient 10 fois plus de fer que le podzol, et ceci pour un horizon de surface de 4 cm. L'insolubilisation du fer se produira donc assez vite dans ce profil, vue la forte proportion d'hydroxydes présente. Le taux de C diminuant, et le taux de Fe augmentant, les complexes très riches en fer précipiteront, et les phénomènes de mobilité du fer dans un sol ferrallitique n'auront lieu que tout en surface. Pour le sol ferrallitique, comme pour le podzol, le blocage des complexes avec le temps n'a pour ainsi dire pas lieu, et le taux d'humidité ne semble pas intervenir.

En résumé, ce phénomène de complexation matière organique fer plus est important quantitativement dans le sol ferrallitique, mais serait limité à la partie superficielle du profil. Par contre, dans le podzol, cette complexation moins intense, laisse apparaître une plus grande mobilité potentielle du fer. Ces différences de comportement sont à relier à la nature de l'humus de chacun de ces 2 sols. L'humus du podzol est du type « mor » à faible activité biologique, ce qui permet la persistance des agents solubles complexant Fe et Al et leur migration dans le profil. L'humus du sol ferrallitique, comme celui des autres sols tropicaux, est du type « mull », à activité biologique importante, avec biodégradation rapide d'une partie de la litière, ce qui limite la migration des composés organiques complexants, l'insolubilisation s'effectuant très vite.

En conclusion, cette méthode des cinétiques de dilution isotopique, appliquée au cas du fer, fournit des renseignements très intéressants sur les possibilités de mobilité du fer dans les sols. Elle fait apparaître, à ce niveau, des différences fondamentales entre les types de sols, d'autant plus si l'on fait agir quelques facteurs tels l'humidité, la matière organique ou le temps d'incubation.

Nous avons souligné les difficultés rencontrées pour effectuer un dosage correct et précis de fer total dans les solutions aqueuses, alors qu'une mesure de radioactivité est bien plus simple, rapide et précise.

Appliquée au profil entier, horizon par horizon, cette méthode pourrait éclairer encore davantage ce problème, qu'il s'agisse du podzol, ou du sol ferrugineux tropical lessivé et du sol rouge faiblement ferrallitique.

De plus, notre étude ne se basant que sur le comportement de complexes hydrosolubles, on pourrait éventuellement envisager de l'étendre aux complexes humiques (après élimination des hydrosolubles, de la fraction légère, et dispersion par des réactifs alcalins), afin de préciser le rôle du fer dans ces complexes.

REMERCIEMENTS

Nous exprimons notre profonde gratitude et nos très vifs remerciements à M. J.C. Fardeau, qui nous a intéressé et initié à cette technique.

Manuscrit reçu au Service des Publications le 19 septembre 1977

BIBLIOGRAPHIE

BERTHELIN (J.), 1971. — Altération microbienne d'une arène granitique. *Science du Sol*, n° 1.

BOISSEZON (P. DE), 1973. — Les matières organiques des sols ferrallitiques. *Init. Doc. Tech.*, n° 21, ORSTOM, Paris.

BRUCKERT (S.), 1970. — Influence des composés organiques solubles sur la pédogenèse en milieu acide. Fac. Sci. Nancy. Thèse 72 p.

DUCHAUFOUR (Ph.), 1972. — Processus de formation des sols. Biochimie et Géochimie. C.R.D.P. de Nancy.

FARDEAU (J.C.), GUIRAUD (G.), 1974. — Utilisation des filtres millipores en chimie du sol : application à la caractérisation des cinétiques de dilution isotopique des ions dans le sol. *Ann. Agron.*, 25 (I).

FARDEAU (J.C.), JAPPÉ (J.), 1975. — Nouvelle méthode de détermination du phosphore du sol assimilable par les plantes : extrapolation des cinétiques de dilution isotopique. A paraître dans *C.R. Ac. Sci.*, Paris.

FAUCK (R.), 1972. — Les sols rouges sur sables et sur grès d'Afrique Occidentale. *Mém. ORSTOM*, n° 61, 257 p., 2 pl. photogr. couleur.

MAIGNIEN (R.), 1961. — Le passage des sols ferrugineux tropicaux aux sols ferrallitiques dans les régions sud-ouest du Sénégal. *Sols Africains*, vol. VI, n° 2 et 3.

THOMANN (Ch.), LESPINAT (P.A.), 1975. — Evolution de la matière organique et du fer dans un sol ferrallitique (incubation en présence de ^{14}C et ^{59}Fe). A paraître dans les *Cahiers ORSTOM, série Pédologie.*

SÉGALEN (P.), 1964. — Le fer dans les sols. *Init. Doc. Tech.* n° 4, ORSTOM, Paris.