

Effet de la taille des particules sur la réduction bactérienne des oxydes de fer

J.C.G. OTTOW, J. WEBER, J.C. MUNCH *

SOMMAIRE

Quatre fractions granulométriques (125-250 μm , 63-90 μm , 20-40 μm et $< 20 \mu\text{m}$) sont soumises à l'action réductrice du fer de *Clostridium butyricum* S22a, en conditions anaérobies. Pour chaque fraction, on suit la formation de fer ferreux aux dépens des formes ferriques : Fe_0 , « fer amorphe » extrait par l'acide oxalique, et Fe_a , quantité totale de fer extraite par le réactif citrate-dithionite-bicarbonate. L'expérience est répétée sur trois types de sol : un oxisol (« Roterde »), un stagnogley et un pseudogley.

Les résultats montrent une réduction des fractions Fe_0 et Fe_a spécifique pour chaque sol, et en corrélation avec la taille des fractions granulométriques. La diminution de la taille des particules entraîne en gros une augmentation de la formation de fer ferreux, sauf dans le cas des fractions colloïdales. Le comportement des bactéries réductrices de fer envers cette dernière fraction est discuté

INTRODUCTION.

Dans les sols hydromorphes, la mise en solution par réduction des oxydes ferriques (c'est-à-dire tous les composés dans le système Fe-O-H) est assurée essentiellement par des bactéries hétérotrophes communes (BETREMIEUX, 1951 ; TAKAI et KAMURA, 1966 ; OTTOW, 1970 ; OTTOW et GLATHE, 1973 ; BERTHELIN et BOYMOND, 1978). Celles-ci utilisent Fe (III) comme un accepteur d'électrons, prolongeant ainsi les processus de conversion énergétique (HAMMANN et OTTOW, 1974 ; MUNCH et OTTOW, 1977 ; OTTOW et MUNCH, 1981).

L'ampleur et l'intensité de ce phénomène de réduction sont spécifiques du type de sol. Elles dépendent grandement de la quantité et du type de matière organique,

* Institut für Bodenkunde und Standortslehre, Universität Hohenheim, D-7000 Stuttgart 70 (Hohenheim), Allemagne Fédérale.

TABLEAU 1. — Principales caractéristiques physico-chimiques des sols et des fractions choisies

Survey of main properties of the soils and their four fractions

soil type	horizon	total soil or fractions	pH (0.02 N CaCl ₂)	CEC ¹⁾ meq/ 100g	1)		Fe _d mgFe/g soil	Fe _o	Fe _o /Fe _d	amount of ²⁾ fraction mg/tube
					C _t ‰	N _t ‰				
Red Earth (Krk, Yugo- slavia)	B	sieved soil	7.5	10.0	6.9	0.9	40.0	2.8	0.07	-
		20 μ	7.1	9.0	7.2	1.3	51.0	3.1	0.06	480
		20-40 μ	7.2	9.1	5.9	1.0	47.2	2.8	0.06	530
		63-90 μ	7.0	5.2	6.1	1.0	46.4	3.0	0.06	500
		125-250 μ	6.9	11.5	6.4	1.2	45.0	2.9	0.06	520
Stagnogley ³⁾ (Schwarzwald, Germany)	Bg	sieved soil	3.9	6.1	1.3	0.3	8.6	1.0	0.12	-
		20 μ	3.6	10.5	2.9	0.7	22.9	4.1	0.18	240
		20-40 μ	3.8	11.8	2.8	0.4	12.5	2.3	0.18	420
		63-90 μ	4.1	3.7	1.3	0.5	5.5	0.9	0.16	910
		125-250 μ	4.4	1.2	0.5	0.15	1.7	0.2	0.14	2950
Pseudogley ³⁾ (Uhlenberg, Germany)	Bg	sieved soil	4.8	10.1	0.9	0.3	12.1	4.5	0.37	-
		20 μ	3.6	17.2	3.1	1.0	16.6	7.3	0.44	300
		20-40 μ	3.8	10.7	1.9	0.3	10.4	4.7	0.45	470
		63-90 μ	3.8	9.9	1.5	0.2	10.4	4.6	0.44	480
		125-250 μ	4.3	2.5	0.4	0.05	3.4	1.4	0.41	1360

(1) Déterminés d'après Schlichting et Blume (1966).

(2) Quantités des échantillons en vue d'atteindre 25 mg de Fe_d (Red Earth) ou 5 mg de Fe_d (les deux autres sols) par tube.

(3) Gleys à nappe de surface, avec horizon supérieur marmoré.

J.C.G. OTTOW, J. WEBER, J.C. MUNCH

des conditions de pH et Eh au cours de l'engorgement par l'eau, de la présence de nitrates et d'oxydes de Mn (IV), aussi bien que du type et de la quantité des complexes de fer ferrique.

D'une façon générale, plus les oxydes de fer sont abondants, moins ils sont cristallisés, et plus intensifs sont les phénomènes de réduction dans le sol (ROBICHET, 1957 ; Mc KEAGUE, 1965 ; PONNAMPERUMA, 1972 ; TOMASSON et BULLOCK, 1975). Les oxydes ferriques sont essentiellement insolubles dans les conditions habituelles de pH (au-dessus d'un pH d'environ 3,8). Leur réduction requiert donc un contact intime entre leur surface et celle des cellules microbiennes (MUNCH et OTTOW, 1980, 1982). En conséquence, plus les dimensions des particules de sol sont petites et plus le phénomène de réduction du fer devrait être efficace. C'est cette hypothèse qui est testée dans la présente étude.

MATERIEL ET METHODES.

1. LES SOLS.

On a sélectionné trois échantillons de sols, différant par leur teneur et type d'oxydes ferriques. Ils sont broyés avec précaution dans un mortier de porcelaine et caractérisés au plan physico-chimique (tableau 1).

Chaque échantillon de sol est tamisé (Vibro-Sieb RV, Société Retsch, Allemagne) dans de l'eau distillée, et séché à l'air. Pour les besoins de l'expérimentation, les fractions $< 20 \mu$, $20-40 \mu$, $63-90 \mu$, et $125-250 \mu$ ont été choisies.

Attendu que la teneur en Fe_d (fer dithionite) dans ces quatre fractions s'accroît des plus grossières aux plus fines (tableau 1), les poids d'échantillons sont choisis de façon à ce qu'on ait, soit 25 mg de Fe_d dans chaque tube (cas de la terre rouge : « Rot Erde »), soit de 5 mg de Fe_d par tube (dans le cas des échantillons de sols à gley de surface).

2. MODELES EXPERIMENTAUX.

Les quantités appropriées d'échantillons de terre sont réparties dans des tubes à ébullition (150×25 mm) munis de bouchons à vis, puis recouverts de 25 ml d'une solution saline à 2% de glucose et sans azote (pH 7,2), et mis en stérilisateur (étuve) 1 minute à $121^\circ C$ (HAMMANN et OTTOW, 1974).

Chaque tube est inoculé avec 1 ml d'une suspension, activée par la chaleur, de spores de *Clostridium butyricum* S22a (MUNCH et OTTOW, 1977). Les tubes sont homogénéisés avec précaution (mélangeur par tournoiement) et incubés en conditions anaérobies ($N_2/CO_2 = 9/1$, $30^\circ C$). Un nombre suffisant de tubes est préparé pour qu'il soit possible de faire des analyses sur trois d'entre eux à chacun des différents intervalles de temps.

Avant de commencer les analyses chaque tube est fermé, homogénéisé à nouveau. On détermine le pH et Eh, Fe (II) en solution, ainsi que le glucose suivant les méthodes décrites par ailleurs (HAMMANN et OTTOW, 1974; MUNCH et OTTOW, 1977).

Le surnageant de chaque tube est décanté et additionné d'une solution de 0,01 N de NaOH pour déterminer son acidité titrable (m.e.q./ml).

3. CARACTERISATION DES OXYDES DE FER.

Les échantillons de terre de chaque tube sont lavés, séchés 3-4 heures à $40^\circ C$, et homogénéisés soigneusement. Des échantillons de 100 mg sont prélevés pour

déterminer les teneurs en Fe_a (fer « amorphe » extrait par l'acide oxalique, selon SCHWERTMANN, 1964) et Fe_t (quantité totale de fer extrait par le réactif citrate-dithionite-bicarbonate, selon MEHRA et JACKSON, 1960).

RESULTATS.

1. DEVELOPPEMENT BACTERIEN ET PRODUCTION D'ACIDITE.

Dans les contrôles stériles, seules de petites quantités de $Fe(II)$ (< 5 ppm en solution) sont détectées à la fin de la période d'incubation. Les tubes stériles contenant les fractions $< 20 \mu$ présentent un louche tout au long de la période d'incubation, suggérant la présence de particules colloïdales qui n'ont pas précipité dans le temps.

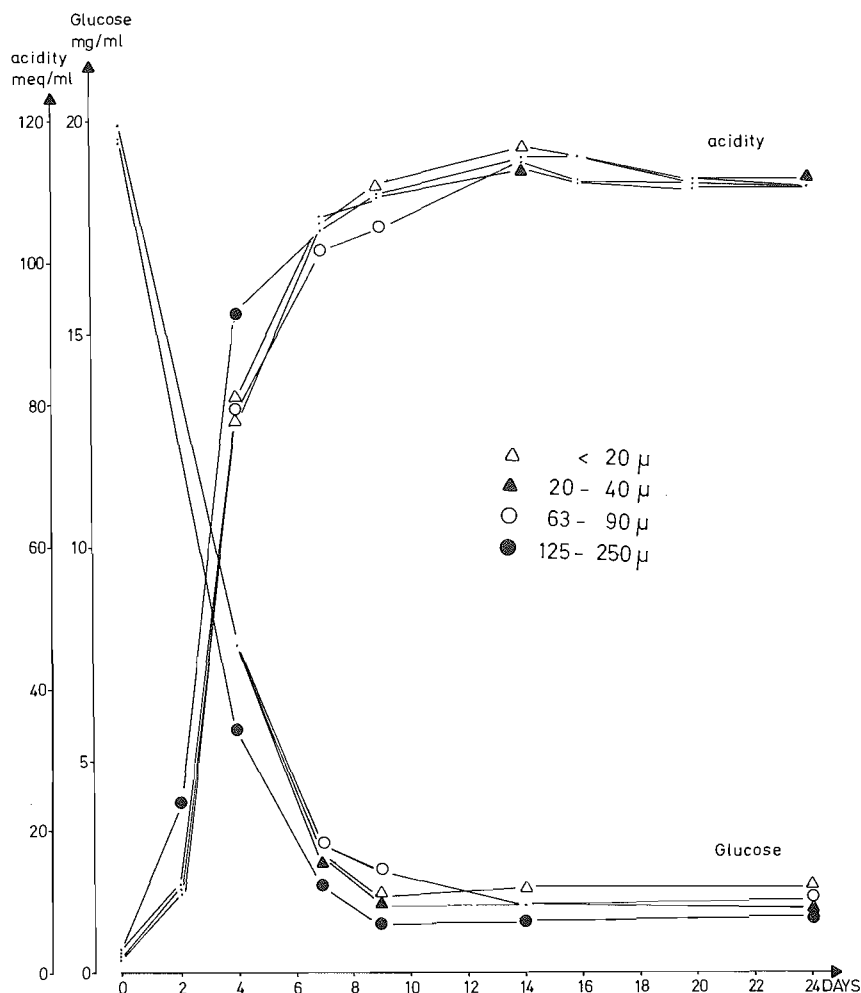


FIGURE I. — Influence de la taille de 4 fractions différentes d'un sol (terre rouge) sur la consommation de glucose et la formation d'acides par *Clostridium butyricum* S22a

Influence of 4 different particle sizes (Red Earth) on the glucose consumption and acid formation by *Clostridium butyricum* S22a

REDUCTION BACTERIENNE DU FER

Dans les échantillons inoculés, le développement bactérien et la production de gaz (accroissement de la turbidité) commencent dans les deux jours. En général, **C. butyricum** se développe légèrement plus vite dans les fractions grossières que dans les fractions fines. Dans la fraction $< 20 \mu$, en particulier, le développement commence dans un délai de un à deux jours. Après 8-10 jours, l'activité métabolique (et donc la production en gaz) décroît par épuisement du glucose.

Le développement de la fermentation glucosique et la production d'acide sont représentés dans la figure 1. On ne peut pas discerner de différences significatives dans la consommation de glucose et la production d'acide entre les diverses fractions. Ceci suggère que le métabolisme de **C. butyricum** n'est pas affecté, de façon mesurable, par les différences de taille des particules (du moins, durant les 10 premiers jours de l'incubation).

Il est à noter que la formation de fer ferreux débute au moment (10^e jour) où la plus grande part de glucose semble avoir disparu. Manifestement, la réduction du fer se poursuit par utilisation de métabolites (acides organiques, produits neutres) ainsi que de la part de glucose adsorbée sur les particules de sol. Une décroissance de l'acidité titrable apparaît en effet après 12 jours.

Cette réduction de fer « à retardement » — eu égard à la consommation de glucose — est différente de ces développements symétriquement inverses mentionnés dans des expériences plus anciennes (MUNCH et OTTOW, 1977).

Les mêmes phénomènes (consommation du glucose et production d'acidité) étant notés dans les fractions des deux autres sols, ils ne sont pas présentés ici.

2. REDUCTION DU FER.

Dans la figure II, on a représenté la production de fer ferreux à partir des quatre fractions de la « terre rouge » (oxisol), à rapport Fe_0/Fe_d extrêmement bas (0,06) et en relation avec les variations de teneurs en Fe_d et Fe_0 .

Les résultats sont évidents :

Premièrement, la réduction du fer se développe d'une façon quasi similaire dans les quatre fractions durant les 8-10 premiers jours. Des différences dans la libération de Fe (II) deviennent plus apparentes pendant les 14 derniers jours d'incubation. A la fin de la période d'incubation (24 jours), la quantité totale de Fe (II) solubilisé diminue d'une fraction à l'autre, suivant la séquence : $63-90 \mu > 20-40 \mu > 125-250 \mu > 20 \mu$ (Fig. II, terre rouge).

Deuxièmement, la quantité totale d'oxydes de fer (Fe_0) décroît continuellement jusqu'au 16^e jour, tandis que la concentration en fer des oxydes « amorphes » non cristallisés (Fe_d) reste relativement constante pendant toute la durée de l'expérience.

A en juger d'après ces paramètres chimiques, il semble que tout se passe comme si la fraction « cristalline » ($Fe_0 - Fe_d$) était réduite par **C. butyricum** de préférence aux complexes amorphes.

Dans les figures III et IV les mêmes paramètres sont représentés pour les quatre fractions des deux sols à gley de surface. On constate que les rapports Fe_0/Fe_d sont ici relativement élevés (stagnogley 0,14 - 0,18; pseudogley 0,41 - 0,45, voir tableau 1). Dans ces sols, la formation de Fe (II) s'accroît à mesure que la taille des particules s'amenuise, suivant la séquence : $20-40 \mu > 63-90 \mu > 20 \mu > 125-250 \mu$. La fraction la plus petite ($< 20 \mu$) fait donc encore exception. Dans ces deux sols à gley de surface, la teneur en Fe_d diminue continuellement, dans toutes les fractions, à mesure que la teneur en Fe (II) en solution s'accroît. Cependant, la teneur en Fe_0 qui ne décroît que légèrement dans le stagnogley (fig. III), tombe en revanche de façon nettement plus accentuée dans le pseudogley (fig. IV).

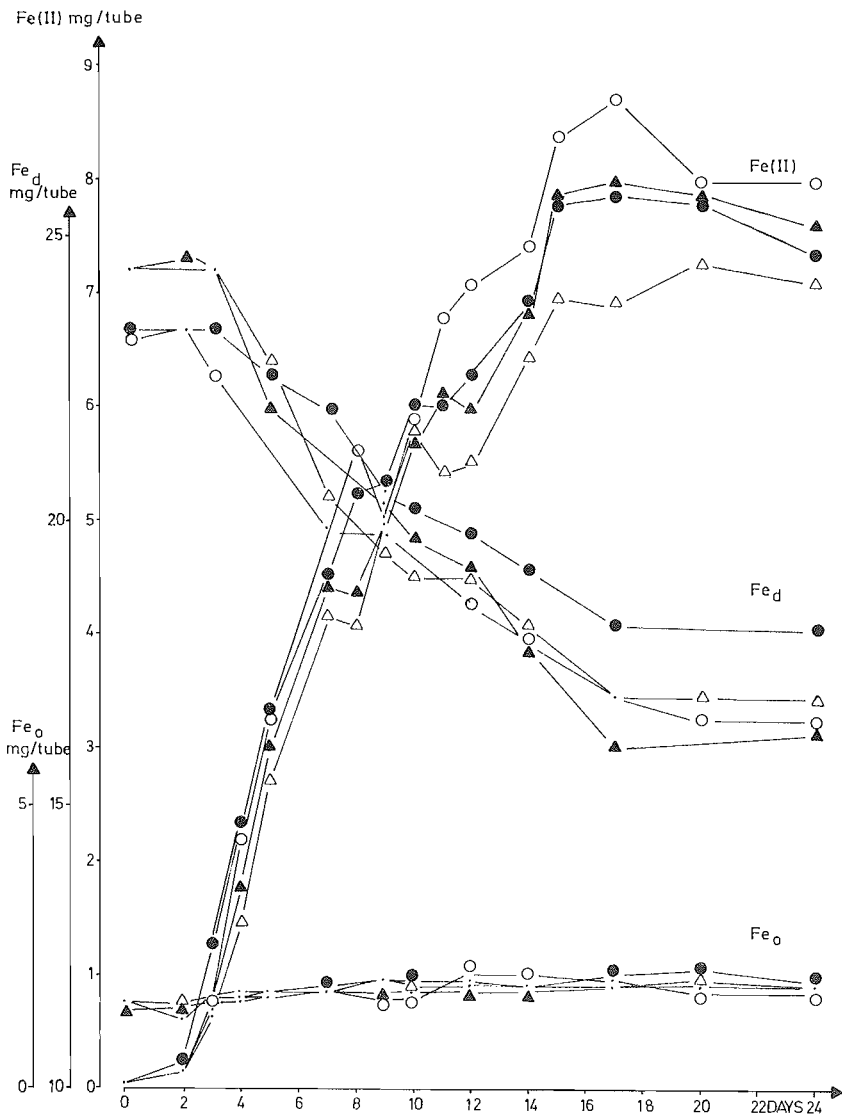


FIGURE II. — Formation de Fe (II) à partir de 4 fractions différentes ($< 20 \mu$, $20-40 \mu$, $63-90 \mu$, $125-250 \mu$) (d'un sol rouge) à rapport Fe_o/Fe_a bas (0,06), en suite à l'activité réductrice de fer de *Clostridium butyricum* S22a. Remarquez : l'échelle de l'ordonnée de cette figure est différente de celle des figures III et IV.

*Fe (II)-production from 4 different soil (red Earth) fractions ($< 20 \mu$, $20-40 \mu$, $63-90 \mu$, $125-250 \mu$) with a low Fe_o/Fe_a ratio (0,6) by the iron-reducing activity of *Clostridium butyricum* S22a. Note that the scale of this figure is different from that in figure III and IV*

Toujours sur la base de ces paramètres chimiques, il semble que la mise en solution par réduction bactérienne se fait simultanément pour les fractions cristalline ($Fe_a - Fe_o$) et « amorphe », mais dans des proportions différentes.

Le comportement des sols hydromorphes, avec un rapport Fe_o/Fe_a relativement élevé, est différent de celui enregistré pour la « terre rouge » où le même rapport est extrêmement bas (0,06).

Cette réduction préférentielle des oxydes ferriques (Fe III) cristallisés, qui apparaît dans le cas de la « terre rouge » (fig. II), a été mentionné antérieurement (MUNCH

et al., 1978). Cependant ce résultat discutable put être rejeté entre-temps, en utilisant un mélange d'oxydes ferriques « amorphes » (pas de diffraction X) et de formes achevées de cristallisation d'hématite (ou de goéthite) marquées au ^{59}Fe (MUNCH, 1980 ; MUNCH et OTTOW, 1980). Ces dernières études sur modèle confirmèrent, sans aucun doute, que les oxydes de fer amorphes aux rayons X sont utilisés par les bactéries comme des accepteurs d'électrons, **de préférence à leurs homologues cristallisés.**

En outre, les clostridiens réducteurs de fer ont en plus une « préférence » pour le Fe (III) provenant de la lépidocrocite plutôt que de l'hématite ou de la goéthite (MUNCH et OTTOW, 1982). Ce qui suggère que la réductase responsable (ferri-réductase ?) a une action suffisamment spécifique pour orienter le processus sur ces Fe (III) accepteurs d'électrons, qui sont relativement moins exothermiques, moins stables, et plus accessibles.

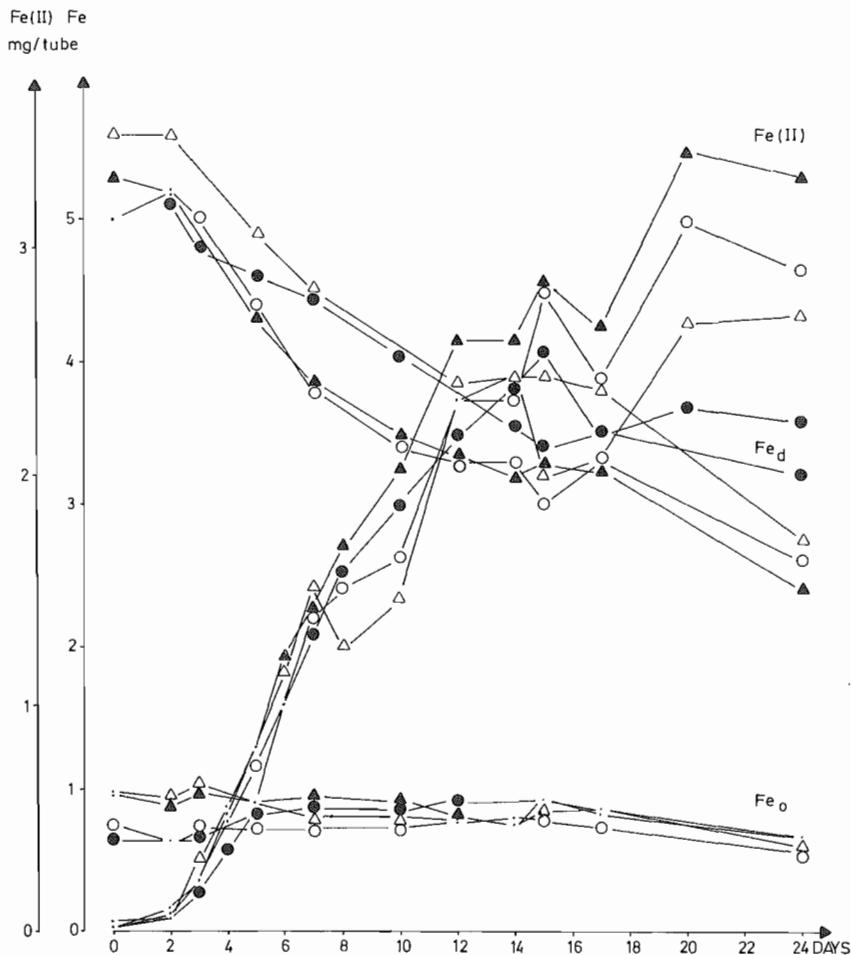


FIGURE III. — Formation de Fe (II) à partir de 4 fractions différentes ($< 20 \mu$, $20-40 \mu$, $63-90 \mu$ et $125-250 \mu$) d'un sol (stagnogley) à rapport Fe_o/Fe_a moyen (0,14-0,18) en suite à l'activité réductrice de fer de *Clostridium butyricum* S22a. Fe_o et Fe_a sont représentés à la même échelle.

Fe (II) production from 4 different soil (Stagnogley) fractions ($< 20 \mu$, $20-40 \mu$, $63-90 \mu$, $125-250 \mu$) with a medium Fe_o/Fe_a ratio (0,14-0,18) by the iron reducing activity of *Clostridium butyricum* S22a. Fe_o and Fe_a are presented at the same scale

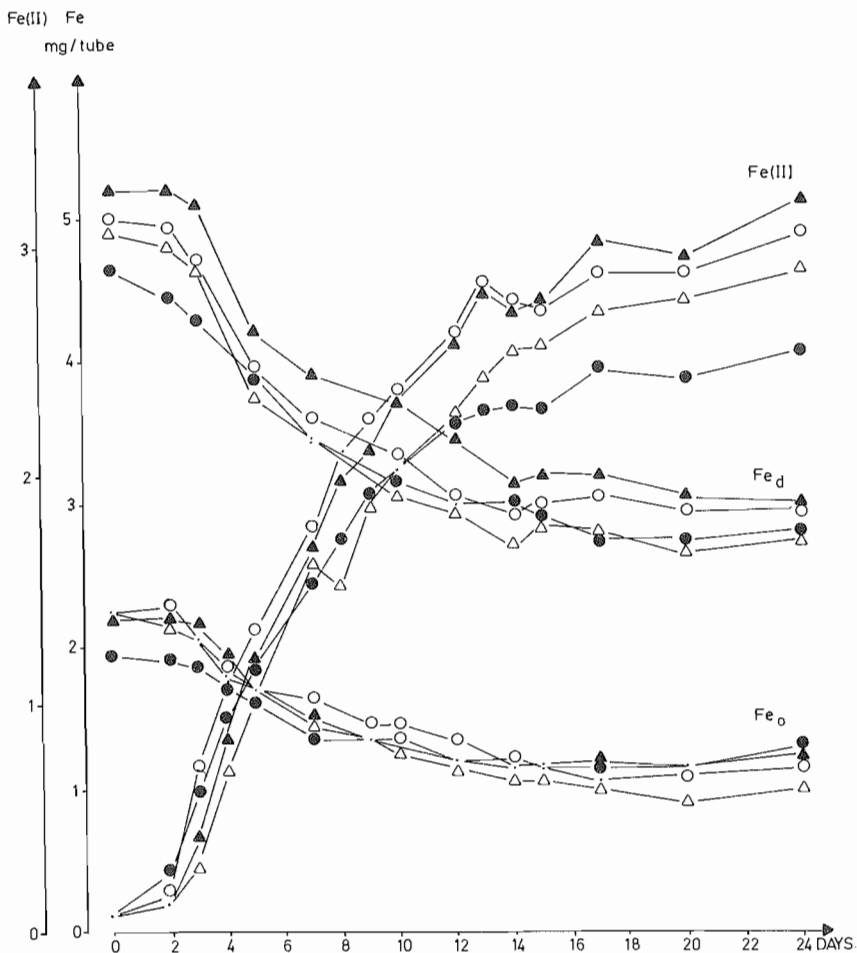


FIGURE IV. — Formation de Fe (II) à partir de 4 fractions différentes ($< 20 \mu$, $20-40 \mu$, $63-90 \mu$ et $125-250 \mu$) d'un sol (pseudogley) à rapport Fe_o/Fe_a relativement élevé (0,41-0,45) en suite de l'activité réductrice de fer de *Clostridium butyricum* S22a. Fe_o et Fe_a sont représentés à la même échelle.

*Fe (II) production from 4 different soil (Pseudogley) fractions ($< 20 \mu$, $20-40 \mu$, $63-90 \mu$ and $125-250 \mu$) with a relatively high Fe_o/Fe_a ratio (0,41-0,45) by the iron-reducing activity of *Clostridium butyricum* S22a. Fe_o and Fe_a are presented at the same scale*

A partir de ces expériences, il est important de réaliser que $Fe_d - Fe_o$ ne saurait représenter la teneur en oxydes cristallisés vrais.

Ceci est particulièrement le cas si le sol est relativement pauvre en Fe_o (comme dans la « terre rouge » ou des sols similaires; cf. MUNCH et al., 1978).

DISCUSSION.

On n'a pas pu confirmer la possibilité de **généralisation de l'hypothèse** suivant laquelle plus les dimensions de particules de sol sont petites et plus est grande la quantité de Fe (II) produite par l'action réductrice des bactéries. Encore que, dans les

REDUCTION BACTERIENNE DU FER

conditions de l'expérience, les fractions les plus petites (20-40 μ et 63-90 μ) ont libéré du Fe (II) avant une fraction nettement plus grossière (125-250 μ).

En fait, un comportement aberrant a seulement été noté pour les fractions contenant des particules inférieures à 20 μ . Les particules de cette fraction libèrent même moins de Fe (II) que la fraction 125-250 μ de la « terre rouge », ou que la fraction 63-90 μ des sols à gley de surface.

Avant d'essayer d'expliquer ce comportement aberrant de la fraction $< 20 \mu$, quelques points importants doivent être resitués.

Premièrement, on peut faire le reproche, ici, d'avoir comparé l'effet de différentes tailles de particules de sol sur la réduction bactérienne du fer, sans réaliser que ces fractions peuvent comporter des oxydes de Fe (III) dans des états bien différents de ségrégation (particules, revêtements, etc.) et d'accessibilité (même pour une teneur équivalente en Fe_a).

Ainsi, la fraction la plus petite ($< 20 \mu$) a très bien pu comporter des revêtements plus intimement liés à l'argile, tandis que les fractions de dimensions intermédiaires ont pu comporter une proportion relativement plus grande de particules libres, accessibles, d'oxydes de Fe (III).

En outre, il convient de rappeler que les poids de terre différaient notablement d'un tube à l'autre, pour parvenir à la quantité requise de fer Fe_a. (Dans le cas du stagnogley, la quantité pesée était d'environ douze fois moindre que pour la fraction 125-250 μ , et quatre à cinq fois moindre dans le cas du pseudogley.) Cette quantité plus faible de terre a pu affecter le développement bactérien en général, et la réduction du fer en particulier.

Finalement, il est important de se rappeler qu'aucune différence dans la formation de Fe (II) ne s'est manifestée dans les 8-10 jours entre les diverses fractions. Ceci suggère que la surface plus grande des petites particules a influencé la réduction du fer seulement **après qu'ait été solubilisée la masse des oxydes ferriques Fe (III) facilement accessibles et réductibles**. A ce stade les complexes Fe (III) restants ont pu se trouver être moins réductibles dans les grosses fractions que dans les petites.

L'explication du comportement inattendu des particules $< 20 \mu$ devrait être recherchée dans les propriétés colloïdales des éléments les plus fins. A mesure que leur dimension s'amenuise, les particules de sol comportent, en effet, une proportion croissante d'argiles et de minéraux colloïdaux. Cela apparaît ici dans les valeurs plus élevées de la C.E.C. des fractions les plus petites (tableau 1), et dans cette persistance d'un louche dans les tubes contenant des particules $< 20 \mu$. Ces colloïdes, de type argile, comportent probablement davantage d'oxydes de Fe (III) sous forme d'enrobages (voir le taux de Fe_a des fractions tableau 1). De tels revêtements ferrugineux se sont probablement dissous par une déferrisation en ambiance réductrice, résultant en une augmentation de la charge négative nette (non mesurée dans cette étude, mais déjà signalée par GREENLAND (1965) et ISMAIL (1970).

En conséquence, dans la balance entre forces de répulsion et d'attraction des argiles et cellules bactériennes, les forces de répulsion ont pu l'emporter, les cellules étant surtout chargées négativement (STOTZKY, 1972).

De plus, une partie du Fe (II) dissous a pu être adsorbé sur les particules chargées négativement, ce qui peut expliquer aussi la baisse du taux en Fe (II) (cf. fig. II).

Un effet global de ces processus est qu'ils ont pu gêner le contact entre particules et cellules bactériennes, condition nécessaire (MUNCH et OTTOW, 1982) pour un transfert d'électrons — provenant du métabolisme des cellules — aux Fe (III) localisés sur les surfaces accessibles.

REMERCIEMENTS.

Cette recherche a été possible grâce à un financement de la Deutsche Forschungsgemeinschaft, Bonn (R.F.A.).

EFFECT OF SOIL PARTICLE SIZE ON THE BACTERIAL REDUCTION OF
PEDOGENIC IRON OXIDES

SUMMARY

Three soils, each with 4 differently sized fractions, were collected and subjected to bacterial iron reduction (*Clostridium butyricum* S22a) in a nitrogen-free, glucose-mineral salt solution (pH 7,2) under anaerobic conditions. In the course of Fe (II) - formation the total amount of pedogenic iron oxides (Fe_a) decreased characteristically for each soil but at the same rate within the four fractions (125-250 μ , 63-90 μ , 20-40 μ and $< 20 \mu$). The amount of « amorphous » non-crystalline Fe-oxides (estimated by Fe_e), however, remained relatively constant in the soil fractions with an extremely low Fe_e/Fe_a -ratio, but decreased correspondingly to Fe_a in the two surface water gley soils with an increased Fe_e/Fe_a -ratio. Generally speaking, Fe (II) production increased with decreasing particle size. An exception was observed with the colloidal fraction ($< 20 \mu$), from which iron was reduced to a lower extent than from the largest fractions (125-250 μ). This aberrant behaviour is ascribed to an increase in net negative surface charge of the colloidal clays due to the reductive dissolution (deferration) of the Fe-oxide coatings. As a result, repellent rather than attracting forces between the colloidal particles and the negatively charged bacterial cells may have impeded the intimate contact required between cell surface and insoluble Fe (III) - electron acceptors.

Références bibliographiques

- BERTHELIN J. and BOYMOND D. (1978). — Some aspects of the role of heterotrophic microorganisms in the degradation of minerals in waterlogged acid soils. In: Environmental Biogeochemistry and Geomicrobiology. Vol. 3 : Methods, metals and assessment. P. 659-675 ; W.E. Krumbein, Edit., Ann. Arbor. Sci. Publ., Mich. (U.S.A.).
- BERNARDI R. (1951). — Etude expérimentale du fer et du manganèse dans les sols. Ann. Agron.
- GREENLAND D.J. (1965). — Charge characteristics of some kaolinite-iron hydroxide complexes. Clay Minerals 10, 407-416.
- HAMMANN R. and OTTOW J.C.G. (1974). — Reductive dissolution of Fe_2O_3 by saccharolytic *Clostridia* and *Bacillus polymyxa* under anaerobic conditions. Z. Pflanzenernähr. Bodenkd. 137, 108-115.
- ISMAIL F.T. (1970). — Oxidation-reduction mechanism of octahedral iron in mica-type structures. Soil Sci. 110, 167-171.
- McKEAGUE J.A. (1965). — A laboratory study of gleying. Canad. J. Soil Sci. 45, 199-206.
- MEHRA O.P. and JACKSON M.L. (1960). — Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. Clays Clay Min. 7, 317-327.
- MUNCH J.C. (1980). — Modelluntersuchungen zu den Mechanismen der bakteriellen Reduktion von Eisen (III) - Oxiden in hydromorphen Böden. Thèse de Doctorat, Université de Hohenheim, Stuttgart, Allemagne. In: Hochschulsammlung Naturwiss. & Biol., Band 6.
- MUNCH J.C., HILLEBRAND T. and OTTOW J.C.G. (1978). — Transformations in the Fe_o/Fe_d -ratio of pedogenic iron oxides affected by iron-reducing bacteria. Canad. J. Soil Sci. 58, 475-486.
- MUNCH J.C. and OTTOW J.C.G. (1977). — Modelluntersuchungen zum Mechanismus der bakteriellen Eisenreduktion in hydromorphen Böden. Z. Pflanzenernähr. Bodenkd. 140, 549-562.
- MUNCH J.C. and OTTOW J.C.G. (1980). — Preferential reduction of amorphous to crystalline iron oxides by bacterial activity. Soil Sci. 129, p. 5-21.
- MUNCH J.C. and OTTOW (1982). — Zellkontakt zwischen Eisen (III) - Oxiden und Bakterien als Voraussetzung für die bakterielle Eisenreduktion. Z. Pflanzenernähr. Bodenkd. 146, 66-77.
- OTTOW J.C.G. (1970). — Selection, characterization and iron-reducing capacity of nitrate reductaseless (nit-) mutants from iron-reducing bacteria. Z. Allg. Mikrobiol. 10, 55-62.
- OTTOW J.C.G. and GLATHE H. (1973). — Pedomie und Pedomikrobiologie hydromorphen Böden : Merkmale, Voraussetzungen und Ursachen der Eisenreduktion. Chem. Erde 32, 1-44.
- OTTOW J.C.G. and MUNCH J.C. (1981). — Role of bacterial enzymes in the reductive dissolution of amorphous and crystalline iron compounds. In : Colloques internationaux du C.N.R.S., Nancy ; Migrations organo-minérales dans les sols tempérés, p. 189-197. Editions du C.N.R.S., Paris.
- PONNAMPERUMA F.N. (1972). — The chemistry of submerged soils. Adv. Agron. 24, 29-96.
- ROBICHERT O. (1957). — Méthodes de dosage du fer. Ann. Agron. 8, 257-322.
- SCHLICHTING E. and BLUME H.P. (1966). — Bodenkundliches Praktikum. Verlag Paul Parey, Berlin and Hamburg.
- SCHWERTMANN U. (1964). — Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit saurer Ammoniumoxalatlösung. Z. Pflanzenernähr. Bodenkd. 105, 194-202.
- TAKAI Y. and KAMURA I. (1966). — The mechanism of reduction in waterlogged soil. Fol. Microbiol. 11, 304-313.
- STOTZKY G. (1972). — Activity, ecology and population dynamics of microorganisms in soil. Crit. Rev. Microbiol. 2, 59-137.
- THOMASSON A.J. and BULLOCK P. (1975). — Pedology and hydrology of some surface-water gley soils. Soil Sci. 119, 329-348.