

# Étude comparative de l'altération microbienne des différents minéraux constituants d'une diabase

R.M. RIBEIRO\*, Claude MOUREAUX\*\*, André NOVIKOFF\*\*\*

\* Institut de Géosciences, Université Fédérale de Bahia, Brésil

\*\* ORSTOM, Services Scientifiques Centraux, Bondy, 93140, France

\*\*\* Mission ORSTOM, Institut de Géosciences, Université Fédérale de Bahia, Brésil

## RÉSUMÉ

L'étude concerne l'altération comparée par *Aspergillus niger* de trois fractions minérales (magnétite, pyroxène-amphibole et plagioclases) isolées d'une diabase de l'Etat de Bahia au Brésil.

L'attaque fongique, exercée au cours de 6 incubations successives de 25 jours, est importante sur les deux premières fractions (solubilisation du fer dépassant 30 % et 10 % respectivement du fer présent, paraissant provenir surtout de la magnétite - qui perdrait environ 45 % de son fer — et de l'augite); la solubilisation touche aussi la silice, l'aluminium, le magnésium et le potassium, tandis que le titane (ilménite), le calcium et le manganèse se révèlent stables.

La fraction plagioclases reste très peu attaquée.

## RESUMO

O estudo refere-se a alteração por *A. niger* de três frações minerais (magnetita, piroxênio-anfíbolio e plagioclases) isoladas de um diabásio proveniente do Estado da Bahia, Brasil.

O ataque microbiano, através 6 incubações sucessivas de 25 dias, aparece principalmente importante na primeira fração, sendo a lixiviação do ferro da

magnetita ao redor de 45 %. Na segunda fração, a lixiviação do ferro (cerca de 10 %) ocorre principalmente a partir da augite. Observam-se lixiviações de silício, alumínio, magnésio e potássio, mas o titânio e manganês ficam insensíveis à ação microbiana. Os plagioclases são praticamente inatacados.

Palavras-chaves : alteração microbiana, *Aspergillus niger*, diabásio, minerais, magnetita, augite, ferro.

## ABSTRACT

This study concerns the alteration by *A. niger* of three mineral fractions (magnetite, pyroxene-amphibole and plagioclases) isolated from a diabase collected in the State of Bahia, Brazil.

The fungal attack during 6 consecutive incubations of 25 days is mainly important on the first fraction, where a lixiviation reaching about 45 % of the iron of the magnetite can be evaluated. In the second mineral fraction loosing about 10 % of its iron, augite appears less resistant than amphibole. Silicon, aluminium, magnesium and potassium are also lixiviated, but titanium and manganese look stable.

The plagioclases remain practically unaltered.

Key-words : microbial alteration, *Aspergillus niger*, diabase, minerals, magnetite, augite, iron.

L'influence des activités microbiennes sur l'attaque et la transformation des minéraux et des roches a fait l'objet de nombreuses études. Parmi les groupes de microorganismes responsables de ces processus, les champignons semblent jouer un rôle particulièrement important qui résulte, d'une part, de leurs métabolites acides et, d'autre part, de leur grande extension dans la plupart des écosystèmes. *Aspergillus niger*, qui est présent dans presque tous les sols tropicaux acides, a spécialement retenu l'attention; ainsi Boyle et Voigt (1967) ont étudié l'altération qu'il provoque sur des cristaux de biotite (solubilisation partielle — du fer plus particulièrement — et destruction de l'état cristallin), par l'intermédiaire des acides produits, citrique et, surtout, oxalique; ces mêmes auteurs ont précisé, dans une étude ultérieure (1973), les mécanismes possibles de mobilisation des ions dans les réseaux cristallins (biotite, muscovite, microcline). Arrieta et Grez (1971) ont également étudié l'action d'*A. niger*, entre de nombreux autres microorganismes (88 souches), isolés de sols du Chili, sur les processus de mobilisation du fer de divers minéraux.

Le travail présenté ici concerne les transformations provoquées par le développement d'une souche d'*A. niger*, originaire d'un sol du Brésil (Bahia), sur trois fractions minérales isolées à partir d'une roche basique, provenant aussi de l'Etat de Bahia.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### Matériel géologique

La roche est une diabase provenant d'Ibitiara, Etat de Bahia, Brésil. L'analyse pétrographique montre que la roche est mésocrate à mélanocrate (indice de col. voisin de 60) et présente une structure intersertale typique; les feldspaths sont des plagioclases subautomorphes, présentant la macle de l'albite, ayant la constitution du labrador (An 53); les plagioclases, peu altérés en séricite et kaolinite, constituent 40 % de la roche.

Le minéral coloré prédominant est un pyroxène, l'augite, constituant 50 % de la roche, peu pléochroïque, grossière et à structure intersertale; cette augite est ouralitisée, principalement sur les bords.

On trouve de la biotite, associée à la hornblende provenant de l'ouralitisé de l'augite, un peu de quartz en grains épars, de la biotite, de la chlorite et des minéraux opaques.

Les minéraux accessoires sont la magnétite, la plus abondante (5 %), l'ilménite et l'apatite (1 %); la magnétite est surtout euédrique, irrégulière, poéclitique et associée à de la biotite; l'apatite est fine et euédrique.

L'analyse chimique de la roche figure dans le tableau I.

TABLEAU I

Analyse chimique de la roche (diabase). Eléments en p. 100

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
44,4	12,4	17,9	5,3	9,7	2,6	0,7	4,3	0,3	0,9

La fraction magnétite a été isolée à l'aimant. Le mélange restant a été traité au séparateur magnétique (Frantz, Modèle L1) dans le but d'isoler les minéraux clairs (fraction plagioclases) des minéraux ferromagnésiens foncés (pyroxène-augite- et amphibole-hornblende-), les inclinaisons étant de 15° pour la longitudinale et de 25° pour la latérale avec un ampérage de 0,9 à 1,0 A. Des vérifications de l'efficacité du triage ont eu lieu au cours de l'opération, des essais préliminaires ayant montré que la granulométrie finalement retenue permettrait la meilleure séparation.

Les triages ainsi effectués ont permis de scinder la roche en trois parties, désignées par les termes :

- fraction magnétite,
- fraction pyroxène-amphibole,
- fraction plagioclases.

Des diffractogrammes de rayons X ont été effectués sur les fractions minérales soumises ou non à l'action microbienne.

## Matériel biologique et méthodes

Le microorganisme mis en œuvre est le champignon *Aspergillus niger* van Tieghen, cultivé sur milieu glucose-peptone de Sabouraud, milieu gélosé, pour activation, et liquide, en présence des fractions minérales, au cours de l'expérimentation.

Les spores sont conservées à sec, dans une terre stérilisée, à la température ambiante ; ce stock permet l'ensemencement de tubes gélosés (l'inoculum étant constitué par la solution surnageante après agitation d'un mélange terre-eau stérile).

Le développement des mycéliums d'*A. niger* est effectué dans des erlenmeyers de polyéthylène contenant 1 g de la fraction minérale étudiée et 100 ml

de milieu nutritif ; après stérilisation (autoclavage à 120° pendant 15 minutes), l'inoculation est réalisée par addition de 0,5 ml d'une suspension de spores provenant des tubes gélosés incubés 7 jours. La durée totale d'incubation, à 30°, est de 150 jours avec prélèvement, pour analyses, de la totalité du milieu après chaque période de 25 jours (et remplacement par du milieu nutritif frais, stérile, à l'abri des contaminations). Six prélèvements ont été effectués pour déterminations (par absorption atomique) des teneurs en Fe, Si, Al, Ca, Mg, Na, K, Ti, Mn solubilisés, les témoins étant constitués par les traitements stériles. Les mêmes analyses ont porté sur les fractions minérales après 150 jours d'incubation avec ou sans attaque microbienne. L'action microbienne s'exprime par la différence entre le traitement microbien et le témoin stérile.

TABLEAU II

Analyse chimique des différentes fractions minérales après incubation en milieu stérile ou en milieu inoculé par *A. niger* (en %)

	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO
<i>Fraction magnétite</i>									
Milieu stérile .....	52,65	19,20	5,71	3,31	4,14	0,62	0,31	15,40	0,64
Culture .....	49,15	17,75	5,46	2,66	4,44	0,47	0,15	20,48	0,87
Action microbienne .....	3,50	1,45	0,25	0,65	-0,30	0,15	0,16	-5,08	-0,23
<i>Fraction pyroxène-amphibole</i>									
Milieu stérile .....	21,02	42,62	6,25	10,80	9,66	0,82	0,96	6,25	0,47
Culture .....	19,60	41,00	5,46	8,44	11,41	0,96	0,64	7,69	0,59
Action microbienne .....	1,46	1,62	0,79	2,36	-1,75	-0,14	0,32	-1,44	-0,12
<i>Fraction plagioclases</i>									
Milieu stérile .....	1,98	55,68	23,39	0,72	7,93	7,11	0,71	0,10	0,02
Culture .....	1,20	56,53	23,48	0,41	7,35	7,19	0,70	0,10	0,01
Action microbienne .....	0,78	-0,85	-0,09	0,31	0,58	-0,08	0,01	0,00	0,01

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats des analyses chimiques de chacune des trois fractions minérales de roche, magnétite, pyroxène-amphibole et plagioclases après incubation, soit en milieu stérile, soit en présence d'*Aspergillus niger* sont consignés dans le tableau II ; dans le tableau III, sont indiquées, pour chaque élément, les quantités totales mises en solution pour l'ensemble des 6 extractions (150 jours d'attaque). Dans tous les cas, la vitesse d'extraction diminue rapidement dans le temps comme le tableau IV en donne l'exemple pour le fer extrait de la fraction magnétite.

### Fraction magnétite

On doit remarquer, en premier lieu, que la technique utilisée n'a pas permis de réaliser un isolement rigoureux de la magnétite, puisqu'avec le fer, coexistent silice et éléments minéraux étrangers (tableau II) ; cela résulte de la présence, dans la roche, d'une magnétite finement cristallisée ; elle provient de l'altération de l'augite par ouralitisation qui donne naissance aussi à d'autres minéraux de petite taille (biotite, chlorite, quartz) qu'il est difficile de séparer de la magnétite.

On voit (tableau II) le très net appauvrissement

TABLEAU III

Solubilisation microbienne des éléments dans le milieu de culture à partir des différentes fractions minérales de la roche, mg/g fraction

	Fe	Na	K	Ca	Mg	Si	Al
<i>Fraction magnétite*</i>							
Culture .....	123,90						
Milieu stérile .....	4,50						
Solubilisation microbienne	119,40						
<i>Fraction pyroxène-amphibole**</i>							
Culture .....	52,13	160,50	121,70	4,31	—	85,46	3,89
Milieu stérile .....	35,99	159,80	115,40	8,97	—	18,73	1,11
Solubilisation microbienne	16,14	0,70	6,30	-4,66	—	66,73	2,78
<i>Fraction plagioclases**</i>							
Culture .....	10,76	—	38,08	1,44	1,85	11,82	1,83
Milieu stérile .....	8,31	—	40,12	3,73	1,56	5,05	0,92
Solubilisation microbienne	2,45	—	-2,04	-2,29	0,29	6,77	0,91
Milieu nutritif mg/600 ml	0,36	54,00	40,50	3,24	1,02	8,58	0,00

\* Isolée de la diabase à l'aimant.

\*\* Isolées par susceptibilité magnétique: 1 g de fraction minérale par expérience; granulométrie: 0,053 - 0,063 mm. Microorganisme: *Aspergillus niger*. Milieu: Sabouraud liquide, 100 ml; inoculum: 0,5 ml suspension de spores; culture sans agitation, à 30°, à raison de 25 jours pour chaque attaque, avec un total de 6 attaques (150 jours). Dosage par absorption atomique; les valeurs indiquées correspondent au total des 6 attaques. Pour le milieu nutritif (blanc, sans roche), les éléments minéraux, donnés à titre indicatif, correspondent au volume total de 600 ml mis en jeu au cours des 6 attaques.

TABLEAU IV

Evolution de la solubilisation microbienne du fer de la fraction magnétite (mg/g) et variations du pH des milieux de culture

Durée d'incubation (jours)	25		50		75		100		125		150		Fe total
	Fe	pH	Fe	pH	Fe	pH	Fe	pH	Fe	pH	Fe	pH	
Fraction magnétite + <i>A. niger</i>	45,2	5,8	34,4	8,4	22,4	5,5	10,4	5,8	6,0	5,7	5,5	5,5	123,9
Fraction magnétite stérile ....	1,9	6,1	0,7	7,0	0,5	6,9	0,7	7,0	0,3	7,1	0,4	6,8	4,5
Différence (solubilisation microbienne)	43,3		33,7		21,9		9,7		5,7		4,9		119,4

en fer, silice, alumine, magnésium et sodium à la suite de l'attaque par *A. niger*; ces pertes se traduisent dans les résultats d'analyses par une augmentation relative importante de titane (15,40 à 20,48 %), présent sous forme d'ilménite, minéral très résistant aux attaques tant physico-chimiques que biologiques.

Les diagrammes de diffraction des rayons X (fig. 1) confirment l'attaque de la magnétite et la résistance de l'ilménite. En effet, on constate, en présence d'*A. niger*, une nette diminution de l'intensité des pics de la magnétite par rapport à ceux de l'ilménite.

Cette fragilité de la magnétite par rapport à l'ilménite dans le domaine physico-chimique a été constatée par Ségalen *et al.* (1972).

La stabilité de l'ilménite permet de calculer la lixiviation réelle du fer par action microbienne, à poids de titane constant, par rapport à la fraction minérale totale (tabl. II) :

$$52,65 - 49,15 \frac{(15,40)}{20,48} = 15,7 \% \text{ Fe}_2\text{O}_3 \text{ ou } 11 \% \text{ Fe.}$$

Par rapport au fer présent (53 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ou 37 %

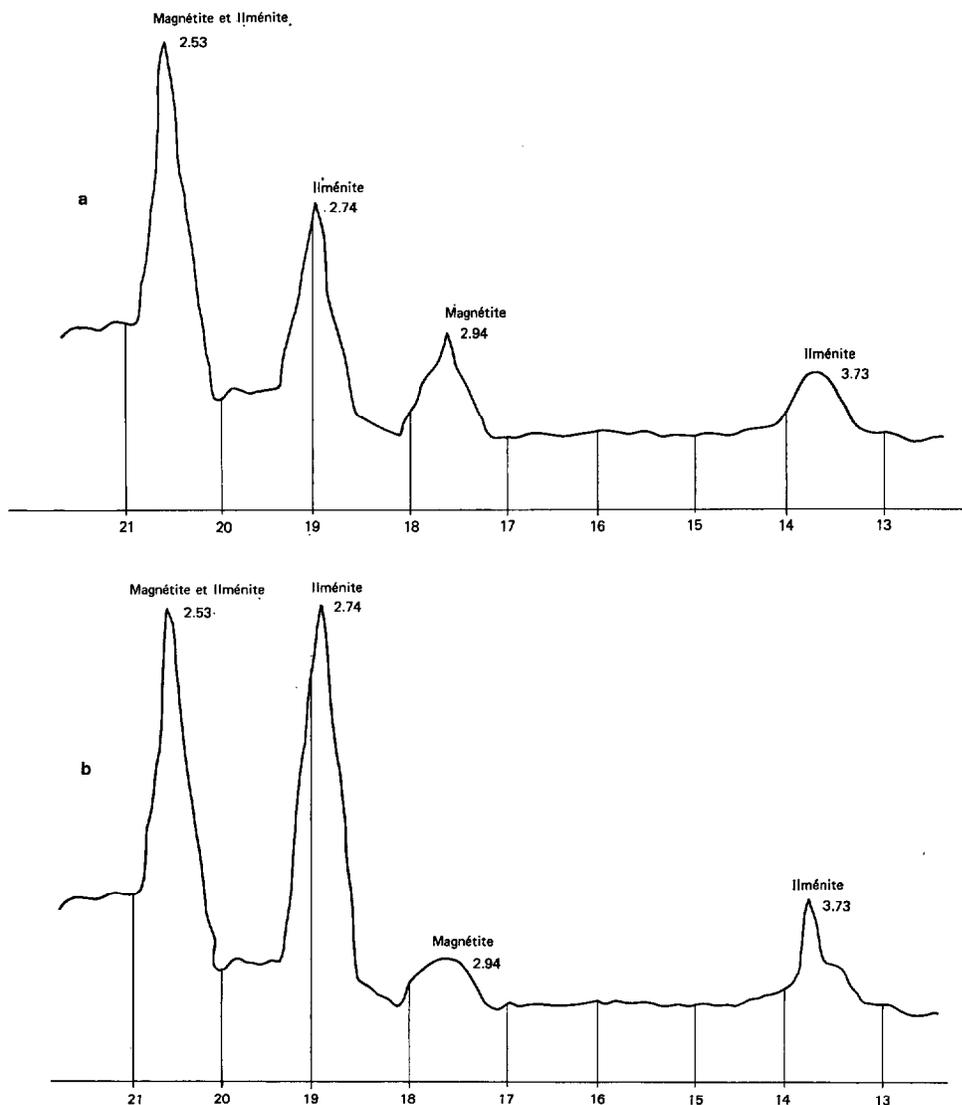


FIG. 1. — Comparaison des diffractogrammes des traitements, a : stérile (témoin) et b : microbien (avec *Aspergillus niger*), sur la fraction magnétite de la roche.

S :  $\times 80$ . I : 7,5. V :  $1^\circ/3$  mn. Ant : Co

Fe), la perte est de l'ordre de 30 % : elle est encore plus grande si on l'exprime par rapport, non plus au fer total de la fraction minérale (11 % dans l'ilménite plus 26 % dans la magnétite), mais par rapport au fer de la seule fraction magnétite ; le calcul indique alors que la proportion de fer perdu par la magnétite (11,0/26,0) est de l'ordre de 42 %.

Il est possible que l'importance de cette attaque provienne, pour partie, d'une fragilité plus grande de la magnétite qui est ici de petite taille. D'autres minéraux qui lui sont associés (biotite, chlorite) sont dans le même temps partiellement détruits (perte de 6 % pour la silice et de 1,5 % pour l'alumine à poids de titane constant) ; ils contiennent et peuvent,

certes, perdre un peu de fer (ce qui pourrait fausser légèrement le calcul précédent par excès). Le calcium ainsi que le manganèse restent stables.

La lixiviation du fer est confirmée par les analyses du milieu de culture (tabl. III) avec 119 mg de Fe solubilisé (ou 170 mg  $Fe_2O_3$ ) représentant une perte de 32 % du fer total par rapport au témoin stérile et de 46 % par rapport au fer de la magnétite seule. On peut noter aussi (tabl. IV) que la solubilisation est surtout importante en début d'attaque microbienne, sa vitesse variant dans la proportion de 10 à 1 entre la première et la dernière période d'incubation; la solubilité relative (exprimée par rapport au fer présent ou restant dans la fraction) s'abaisse assez doucement jusqu'au 75<sup>e</sup> jour (12 à 8 %), puis brusquement ensuite (à 4 %, puis 2 %); le pH reste généralement plus acide dans le milieu microbien, son élévation éphémère, au cours de la deuxième période d'incubation, pouvant correspondre à une solubilisation plus importante de bases.

#### Fraction pyroxène-amphibole

Les analyses de la fraction minérale (tabl. II) accusent des pertes marquées de fer, magnésium, silice et alumine; il en résulte une augmentation relative du titane permettant de rectifier la perte de fer à 5 % par rapport à la fraction totale et 23 % par rapport au fer présent).

L'analyse des milieux de culture (tabl. III) montre aussi que les solubilisations les plus fortes concernent

le fer (le résultat n'égalant pas, cependant, la valeur précédente : 1,9 % de la fraction minérale et 13 % par rapport au fer présent) et la silice.

La comparaison des diffractogrammes des traitements stériles et microbiens (fig. 2) indique une diminution sensible des pics de pyroxène (augite), en présence de *A. niger*, par rapport aux pics de l'amphibole (hornblende), peu modifiés; il apparaît donc que l'action microbienne touche essentiellement l'augite.

L'augmentation de calcium dans la fraction minérale après l'attaque microbienne (tabl. II) et sa diminution dans le milieu de culture (tabl. III) peuvent s'interpréter par la précipitation de calcium; la précipitation de calcaire (calcite) est, en effet, possible au pH de 8,4 qui a été observé dans le milieu de culture (5,6 dans le milieu stérile) et qui correspond au pH d'équilibre de la calcite dans l'eau à la pression du gaz carbonique de l'air.

#### Fraction plagioclases

L'attaque microbienne des plagioclases se révèle très faible au vu, tant des analyses de la fraction minérale (tabl. II), que des solubilisations dans les milieux nutritifs (tabl. III). Un seul élément, le fer, présent en faible quantité (2 %) à côté des plagioclases, est lixivié dans une assez forte proportion, son indépendance du réseau cristallin des plagioclases pouvant expliquer sa fragilité.

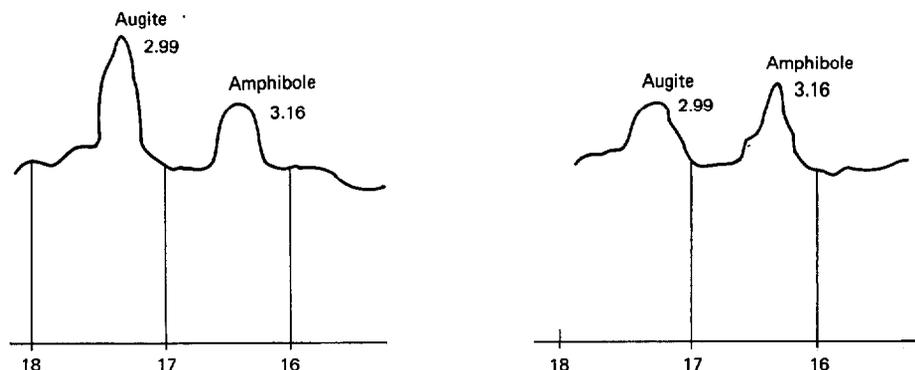


FIG. 2. — Comparaison des diffractogrammes des traitements, à gauche : stérile (témoin) et à droite : microbien (avec *Aspergillus niger*), sur la fraction pyroxène-amphibole de la roche.

S :  $\times 80$ . I : 7,5. V :  $1^{\circ}/3$  mn. Ant : Co

## EXPÉRIENCE COMPLÉMENTAIRE

Une expérience complémentaire a été effectuée de façon à comparer les fragilités relatives de minéraux aussi purs que possible et, aussi, pour la magnétite, l'influence du degré de cristallisation : on a sélectionné de grands cristaux de magnétite pure qui ont été écrasés (0,1–0,2 mm) et des poudres de pyroxène, de biotite et de magnétite provenant de roche, de même granulométrie. Une incubation de 25 jours en présence d'*A. niger* (200 mg de minéral, 100 ml de milieu) a confirmé la fragilité plus grande de la magnétite, surtout lorsqu'elle est moins bien cristallisée (tabl. V).

TABLEAU V

Fe solubilisé dans le milieu en mg/g de minéral

	Magnétite		Pyroxène	Biotite
	Crist.	Roche		
Témoin stérile . . . . .	0,5	0,3	1,3	1,0
Traitement <i>A. niger</i>	74,5	77,9	2,7	5,6

Une étude d'Ottow (1969) signale la relation inverse entre la solubilisation microbienne du fer et la cristallinité.

## CONCLUSION

L'attaque par *A. niger*, réalisée dans nos conditions expérimentales sur trois fractions minérales isolées d'une diabase, a provoqué une lixiviation importante sur la fraction magnétite, un peu plus faible sur la fraction pyroxène-amphibole et négligeable sur la fraction plagioclases.

La lixiviation la plus importante est celle du fer qui dépasse 30 % dans le cas de la fraction magnétite et 10 % dans celui de la fraction pyroxène-amphibole par rapport au fer présent.

Les résultats d'Arrieta *et al.*, (1971) sur magnétite, également en présence d'*A. niger*, sont moins élevés, mais obtenus dans des conditions différentes, les facteurs favorables provenant essentiellement dans notre étude, semble-t-il, de la granulométrie plus fine et de la durée supérieure d'incubation avec

renouvellement du milieu de culture et peut-être de la présence de magnétite moins bien cristallisée.

Dans le cas de la fraction pyroxène-amphibole, la solubilisation du fer se produit surtout à partir du pyroxène ; quoique d'intensité plus faible que dans le cas de la magnétite, elle doit jouer un rôle plus important, si l'on considère l'altération globale de la diabase, qui contient 50 % de pyroxène contre 5 % de magnétite.

Des solubilisations, plus importantes que celles observées ici, ont été obtenues par Silverman et Munoz (1970) à partir de roches attaquées par *Penicillium simplicissimum* (plus de 50 % du fer, en particulier, au cours d'incubations de 7 jours, pour des roches basiques), mais en utilisant une fraction granulométrique plus fine (poudre passant au tamis de 75 microns).

Dans les conditions naturelles, l'attaque fongique préférentielle, exercée sur certains minéraux, est un facteur de délitage des roches qui augmente les surfaces et, par conséquent, la rapidité d'altération. Les champignons, particulièrement abondants dans les sols tropicaux acides des régions humides, peuvent ainsi contribuer efficacement à la digestion, soit des débris rocheux (qui s'y trouvent assez fréquemment inclus, sur pente), soit éventuellement, des roches pulvérisées qui peuvent y être apportées dans le but d'améliorer le niveau minéral.

Manuscrit reçu au S.C.D. de l'ORSTOM le 12 mai 1976

## REMERCIEMENTS

Les auteurs expriment leur gratitude à Madame Adélaïde Mussi Santos dont l'appui personnel constant a rendu possible la réalisation de ce travail avec le concours financier des Organismes brésiliens suivants : Coordination du Perfectionnement du Personnel Supérieur, Conseil National de la Recherche, Ministère du Plan, Superintendance du Développement Economique du Nord-Est ; au Professeur R.J.B. Froes de l'Université Fédérale de Bahia, pour l'analyse pétrographique de la roche ; à Madame Théodora Maria Luz Conceição de l'UFBA pour la séparation des minéraux ; à Monsieur Pinta et à ses collaborateurs du laboratoire de Spectrographie (S.S.C. Bondy) pour les analyses chimiques de la roche, de ses fractions minérales et une partie des diffractogrammes ; à Madame Marialva Andréa Santos Peirera de l'UFBA pour l'analyse des éléments en solution.

## BIBLIOGRAPHIE

- ARRIETA (L.), GREZ (R.), 1971. — Solubilization of iron containing minerals by soil microorganisms. *Appl. Microbiol.*, Vol. 22, n° 4 : 487-490.
- BOYLE (J.R.), VOIGT (G.K.), 1967. — Biotite flakes : alteration by chemical and biological treatment. *Science*, Vol. 155 : 193-195.
- BOYLE (J.R.), VOIGT (G.K.), 1973. — Biological weathering of silicate minerals. *Plant and Soil*, 38 : 191-201.
- OTTOW (J.C.), 1969. — Der Einfluss von Nitrat, Chlorat, Sulfat, Eisenoxidform und Wachstum-bedingungen auf das Ausmass der bakteriellen Eisenreduction. *Z. Pfl. Ernähr.*, 124 : 238-253.
- SEGALEN (P.), PARROT (J.F.), ICHTERZ (M.N.), VERDONI (P.), 1972. — Effet de méthodes d'extraction cinétique utilisées pour la détermination de produits ferrugineux sur quelques minéraux purs. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, Vol. X, n° 3 : 251-271.
- SILVERMAN (M.P.), MUNOZ (F.), 1970. — Fungal attack on Rock : Solubilization and Infrared Spectra. *Science*, n° 3949 : 985-987.