

Étude sur l'altération géochimique des itabirites du Brésil

Dissolution du quartz et instabilité de l'hématite primaire en conditions tropicales hydrolysantes

A.J. MELFI (1), Georges PÉDRO (2), Ljubisa NALOVIC (3)
et J.P. de QUEIROZ NETO (4)

(1) Institut de Géosciences, Université de São Paulo, C.P. 20899 São Paulo (Brésil)

(2) Institut National de la Recherche Agronomique, Département de Science du Sol,
C.N.R.A., 78000 Versailles (France)

(3) O.R.S.T.O.M., BP 165, Cayenne (Guyane française)

(4) Institut de Géographie, Université de São Paulo, C.P. 8500, São Paulo (Brésil)

RÉSUMÉ

L'altération géochimique des itabirites en conditions tropicales hydrolysantes (Brésil) se traduit tout d'abord par une intense dissolution du quartz. Quant au fer, il est globalement maintenu sur place et tend donc à se concentrer dans les horizons de surface ; toutefois, l'hématite primaire, qui est de grande dimension au sein de la roche de départ, devient instable et soit il se fragmente, soit il se réorganise sous la forme de goethite microcristalline α -FeOOH.

ABSTRACT

The first consequence of the geochemical weathering of itabirite under hydrolyzing tropical conditions (Brazil) is an intense dissolution of the quartz. The iron is maintained « in situ » which leads to its accumulation in the upper horizons. However, the primary haematite, which crystals are large inside the bed rock, become unstable and either reorganize as a microcrystalline goethite α -FeOOH or break up into smaller crystals.

INTRODUCTION

L'étude de l'altération en conditions tropicales humides des itabirites, c'est-à-dire de roches constituées de quartz et l'hématite à l'exclusion de tout autre minéral silicaté, présente un certain intérêt et ceci grosso-modo pour deux raisons essentielles :

— Tout d'abord, du fait que leur intense altération peut donner naissance à des gisements de fer d'une très grande richesse ; c'est le cas par exemple du gisement de Minas Gerais au Brésil où la teneur en fer du minerai exploité peut atteindre 68 %.

— D'autre part, pour des motifs plus théoriques : l'absence totale de silicates alumineux et ferro-

magnésiens, liée à une richesse exceptionnelle en minéraux considérés habituellement comme stables dans les conditions hydrolysantes (quartz et hématite), conduit à placer de telles roches du point de vue des phénomènes de la géochimie de surface dans un ensemble *spécial*, qu'on peut dénommer « E. siferrique ». Dans cet ensemble en effet, il est clair que toute néoformation d'argiles alumineuses et d'argiles magnésiennes, qui constituent les produits géochimiques *normaux* de l'altération (1), est au départ exclue.

(1) Ces deux types d'argiles se forment lors de l'altération des roches appartenant respectivement aux ensembles sial-ferrique et sifémique.

C'est ce qui nous a amené à entreprendre une étude détaillée sur l'évolution des itabirites en conditions tropicales. Notons qu'un certain nombre de travaux ont déjà été réalisés, soit dans une optique métallogénique, soit même dans un but strictement géochimique. C'est ainsi que W. Fickel (1963), J. Van Dorr (1964), R. Thienhaus (1964), J. Nicolas et J. Verdier (1964), J. Eichler (1967), A.P. Barbour (1970), S. Pavlovich et D. Nicolich (1973) ont tenté d'expliquer la genèse de certains gisements latéritiques de fer à partir des itabirites de Minas Gerais ou de formations analogues localisées dans d'autres régions tropicales du globe. En outre, on peut aussi faire état dans ce domaine des recherches de G. Millot et R. Fauck (1970), R. Fauck (1970) et N. Leneuf (1973) sur l'évolution du quartz au sein des formations quartzokaoliniques du Continental Terminal de l'Afrique de l'Ouest.

I. PRÉSENTATION DU CADRE PHYSIQUE

1. Nature, mise en place et caractéristique des itabirites de Minas Gerais (Brésil)

Dans l'état de Minas Gerais au Sud-Ouest de Belo Horizonte, se trouve un massif très important d'itabirites, qui est à l'origine d'une réserve considérable (de l'ordre de 27,5 milliards de tonnes) en minerai de fer, dont la teneur oscille entre 35 et 68 % de Fe. C'est ce qu'on appelle communément au Brésil le *Quadrilatère ferrifère* (fig. 1) (cf. J. Van Dorr *et al.*, 1952).

Il s'agit essentiellement de roches compactes résultant de l'action du métamorphisme sur des sédiments déposés à l'Antécambrien dans un vaste géosynclinal et qui ont subi ultérieurement, mais toujours au cours de cette dernière période, 4 phases orogéniques successives.

Du point de vue pétrographique, les itabirites sont des roches d'aspect gris argenté, caractérisées par une composition assez simple, puisque plus de 95 % du volume total est constitué par du quartz et de l'hématite (Planche I - photo 1). Le reste est occupé par des minéraux accessoires, dont le plus important est la *magnétite* et le plus caractéristique la *wavelite* : $\text{Al}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_3 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$. Quant à la texture, par suite de l'action du métamorphisme, elle est grossière, bien développée et nettement orientée. C'est ainsi que l'hématite se présente en lamelles allongées

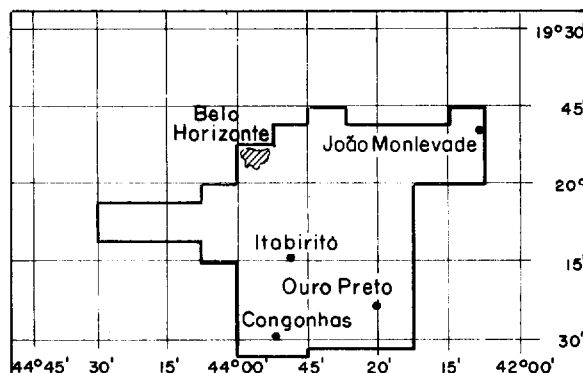
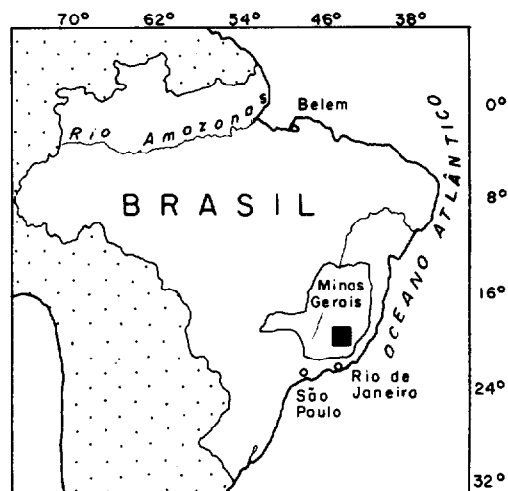


FIG. 1. — Situation géographique du Quadrilatère ferrifère.

dont la longueur moyenne est de 500 μ , mais qui peut aller jusqu'à 2 mm. Il en est de même d'ailleurs des cristaux de quartz qui sont toutefois de taille légèrement inférieure.

2. Cadre géomorphologique et son évolution

Les affleurements d'itabirite sont situés au centre d'une région montagneuse, caractérisée par un relief fortement ondulé et présentant ainsi des dénivellations accusées entre les sommets et le fond des talwegs. Il s'agit de la partie méridionale de la « Serra do Espinhaço », dont l'altitude est généralement supérieure à 800 m.

Les niveaux les plus anciens sont toujours coiffés d'une formation ferrugineuse de surface dont l'épais-

seur peut atteindre 200 m. Il est à peu près admis aujourd'hui que ce manteau d'altération date du Tertiaire inférieur (Miocène probablement) et qu'il est lié à l'importante surélévation qui a eu lieu à ce moment-là (Cycle américain de L.C. King, 1957).

Sur les niveaux plus récents, qui correspondent à la période actuelle ou subactuelle, on n'observe pas, ainsi que l'a indiqué J. Van Dorr (1964), de formations d'altération. Tout au plus, peut-on mettre en évidence une déconsolidation de l'itabirite compacte, qui résulte en fait d'un simple désengrènement des cristaux de quartz et d'hématite, sans qu'on puisse noter la moindre évolution chimique. On aboutit de la sorte à une « arène quartzohématitique », qui est désignée au Brésil sous le terme d'*Itabirite pulvérulente*.

Ces quelques considérations générales présentent un certain intérêt dans la mesure où elles nous ont guidé pour la localisation du sol retenu dans cette étude : celui-ci a donc été prélevé sur un niveau récent, de façon que l'évolution enregistrée corresponde effectivement à une altération géochimique provoquée dans les conditions climatiques actuelles ou subactuelles. Rappelons à ce propos que le climat de la région est de type tropical humide, caractérisé par une température moyenne annuelle de 19 °C et une pluviosité moyenne annuelle de 1 750 mm convenablement répartie tout au long de l'année.

II. DESCRIPTION DU PROFIL ET DES MATÉRIAUX ÉTUDIÉS

Le profil récolté est localisé dans le Município de Ouro Preto (20° 10'S et 43° 20'W) sur la route Br040 entre Itabirito et Ouro Preto, à 8 km avant d'arriver à cette dernière ville. Il est développé aux dépens d'une itabirite pulvérulente légèrement remaniée, résultant de la désagrégation d'une roche compacte et fraîche située à quelques mètres de l'endroit du prélèvement (1). La végétation est constituée par une formation arbustive secondaire. Quant au drainage interne, il est librement assuré.

Le profil se présente de la façon suivante (planche I - photo 2) :

(1) La roche compacte sera notée par la lettre (g).

A₁₁ (a), 0-20 cm, 10 YR 3/2

— Texture sableuse, structure très faible, subangulaire moyenne, consistance friable aussi bien à sec qu'à l'état humide ; ni plastique, ni collant ; pores relativement grossiers très abondants ; présence fréquente de radicelles.

Limite ondulée - Transition graduelle.

A₁₂ (b), 20-35 cm, 7,5 YR 3/2

— Texture sableuse ; peu cohérent ; consistance friable ; ni plastique ni collant.

Limite ondulée - Transition graduelle.

B (c), 35-90 cm, 5 YR 3/4

— Texture sableuse ; cohérence et consistance comme en A₁₂ ; rareté des radicelles.

Limite ondulée - Transition abrupte.

(d), 90-110 cm, 7,5 YR 3/2

— Les petites concrétions dominent dans la partie supérieure — même structure, texture et consistance de la fraction fine que dans les horizons ci-dessus — tendance à l'induration avec l'individualisation d'agré-gats cimentés de taille plus importante.

Limite ondulée - Transition abrupte.

II C1 (e), 110-200 cm, 2,5 YR 5/0

— mais présentant quelques taches (2,5 YR 3/4), petites concrétions abondantes, texture et structure identiques pour la fraction fine.

Limite plane et graduelle.

II C2 (f), 200 > 300 cm, 5, Y 4/4

— Texture sablo-argileuse plus massive, structure modérément angulaire, consistance dure à sec, mais friable à l'état humide ; ni plastique, ni collant.

Cet horizon correspond à la désignation précédente d'*itabirite pulvérulente*.

Il s'agit d'un profil relativement homogène, malgré la présence de l'horizon (d) légèrement induré et quelques indices d'apports externes dans les 20 premiers centimètres. Cette homogénéité est d'ailleurs confirmée par l'étude des courbes de fréquences granulométriques ; celles-ci, établies pour les divers horizons meubles : (a), (b), (c), (e) et (f), sont en effet tout à fait superposables (fig. 2).

III. ÉVOLUTION GÉOCHIMIQUE ET MINÉRALOGIQUE

La composition chimique des différents horizons et de la roche saine, relative aux éléments majeurs, est reportée dans le tableau I.

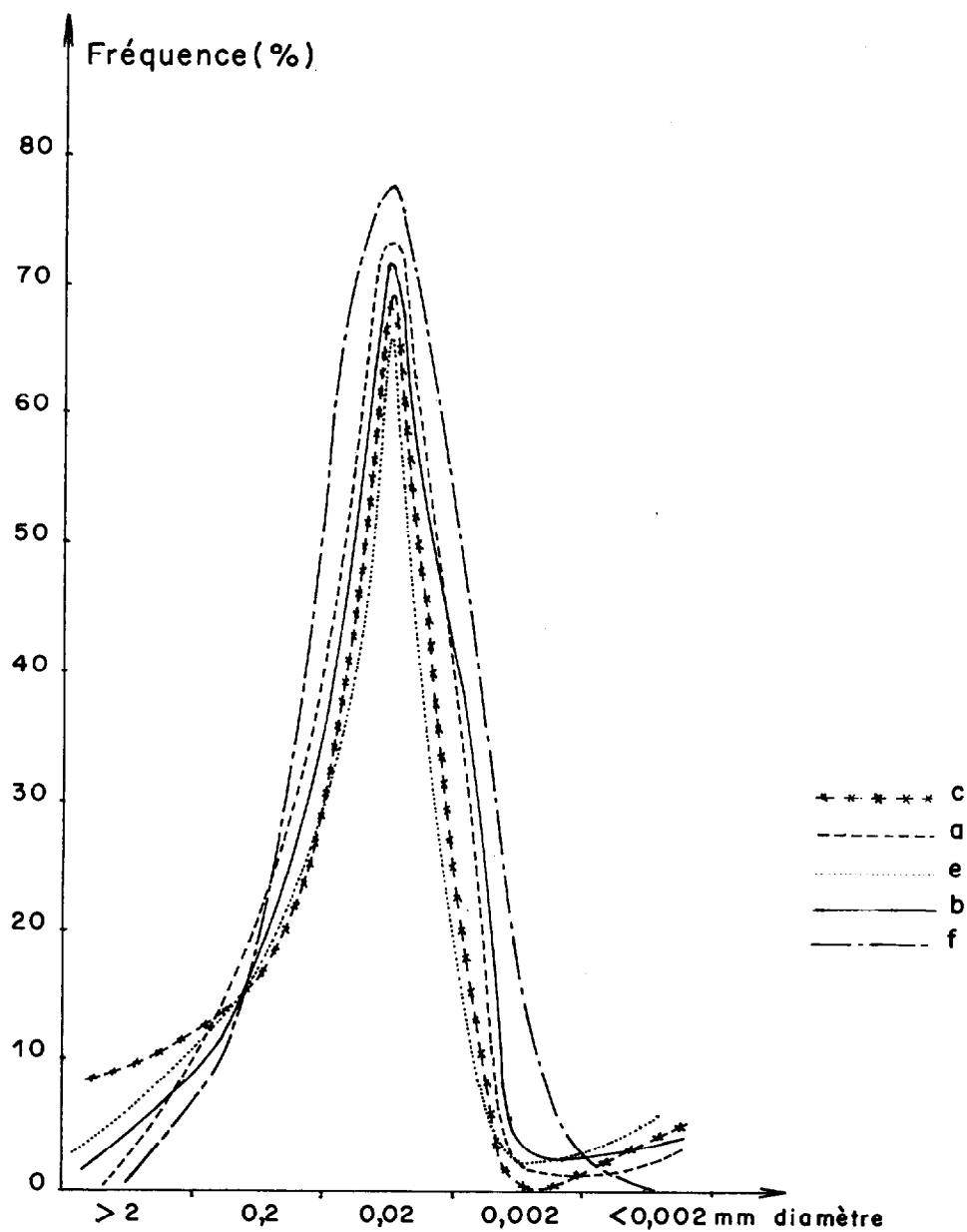


FIG. 2. — Courbes de fréquence granulométriques de divers horizons.

TABLEAU I
Composition chimique des différents horizons (%)

Horizons	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O	Somme
(a)	41,21	0,98	Tr	54,25	0,80	0,02	< 0,01	0,62	0,12	2,90	100,90
(b)	36,03	1,09	Tr	58,85	0,90	0,015	Tr	0,50	0,10	3,75	101,23
(c)	33,41	1,59	0	62,06	0,84	0,02	Tr	0,60	0,12	2,65	101,29
(d)	26,70	0,85	0	64,26	0,78	0,02	0,01	0,52	0,10	7,80	101,03
(e)	39,46	0,62	0	58,07	0,70	0,02	< 0,01	0,52	0,09	2,18	101,66
(f)	51,94	0,24	0	46,67	0,67	0,015	0,01	0,59	0,08	1,22	101,44
(g)	52,9	1,3	0	45,50	1,10	0,02	< 0,01	0,69	0,13	0,50	102,14

L'examen de ce tableau fait ressortir immédiatement :

- un accroissement de la teneur en fer accompagné d'une diminution de la quantité de silice, lorsqu'on passe de la roche aux horizons plus altérés ;
- une tendance à un appauvrissement relatif en Fe₂O₃ par rapport au quartz dans l'horizon de surface.

D'un autre côté, l'établissement d'un bilan global a pu être tenté. En effet, J. Eichler (1967) a montré que la teneur en Fe₂O₃ dans les eaux souterraines des régions itabiriques était toujours très faible (0,23 ppm en moyenne exprimés en Fe) ; aussi, avons-nous été conduit à appliquer au niveau du

profil un raisonnement de type isofer. Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau II, qui confirme l'intense élimination de la silice — celle-ci peut atteindre 54 % du matériel de départ — et fait apparaître une forte augmentation de la teneur en eau (près de 500 %).

Quant au dosage des éléments-traces du 1^{er} groupe de transition, il permet de calculer le paramètre

$$T = \frac{\Sigma M \times 10}{Fe_2O_3} \quad (L. Nalovic, 1971 \text{ et } 1974), \Sigma M$$

étant la somme : Mn, Cr, V, Co, Ni et Cu exprimés en millimoles pour cent et Fe₂O₃ la teneur en fer en grammes pour cent. Le tableau III indique ainsi que vis-à-vis du fer, la teneur en éléments-traces Σ est très faible dans tous les échantillons étudiés.

TABLEAU II
Application du raisonnement isofer au profil d'altération

Perte ou gains relatifs	Horizons					
	(g)	(f)	(e)	(c)	(b)	(a)
SiO ₂ (%)	0	-4,27	-41,50	-53,95	-47,31	-34,80
H ₂ O (%)	0	+136	+240	+286	+480	+386

— L'étude minéralogique a été effectuée en appliquant à la plupart des horizons la diffraction des rayons X (fig. 3), l'analyse thermique différentielle (fig. 4) et l'analyse thermogravimétrique (fig. 5). Toutes ces méthodes font ressortir la présence de goethite $\alpha FeO \cdot OH$ en plus ou moins grande quantité dans les divers matériaux en voie d'évolution.

En couplant ces données avec celles concernant la composition chimique, il a été ensuite possible d'établir la constitution minéralogique quantitative.

(1) D'après les évaluations de L. Nalovic (1971), le même rapport T varie entre 4,0 et 7,5 pour des roches basiques et 0,4 à 2,1 pour des grès et quartzites.

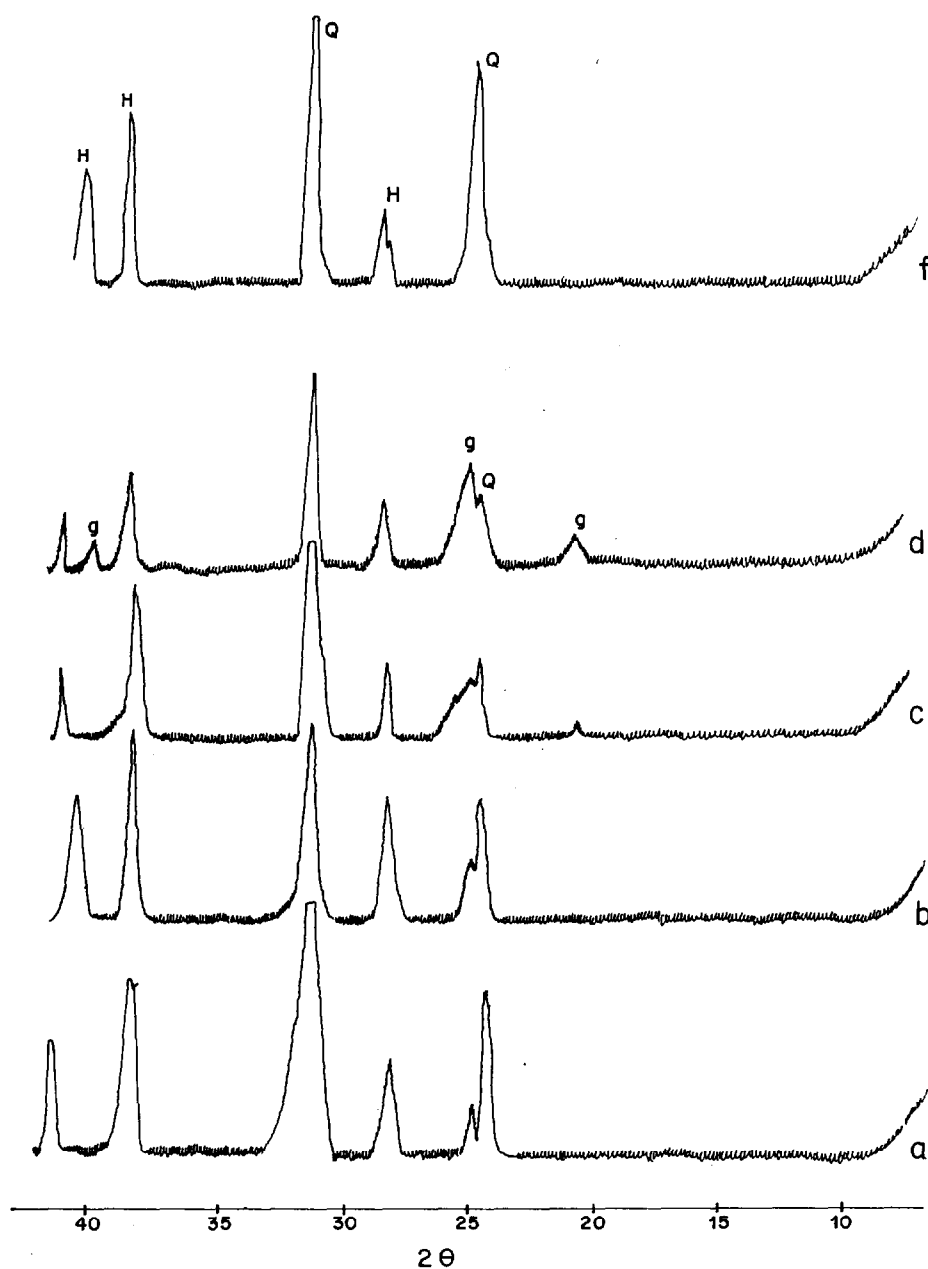


FIG. 3. — Spectres de diffraction X des principaux horizons bruts et de quelques fractions argileuses ($< 2 \mu$).

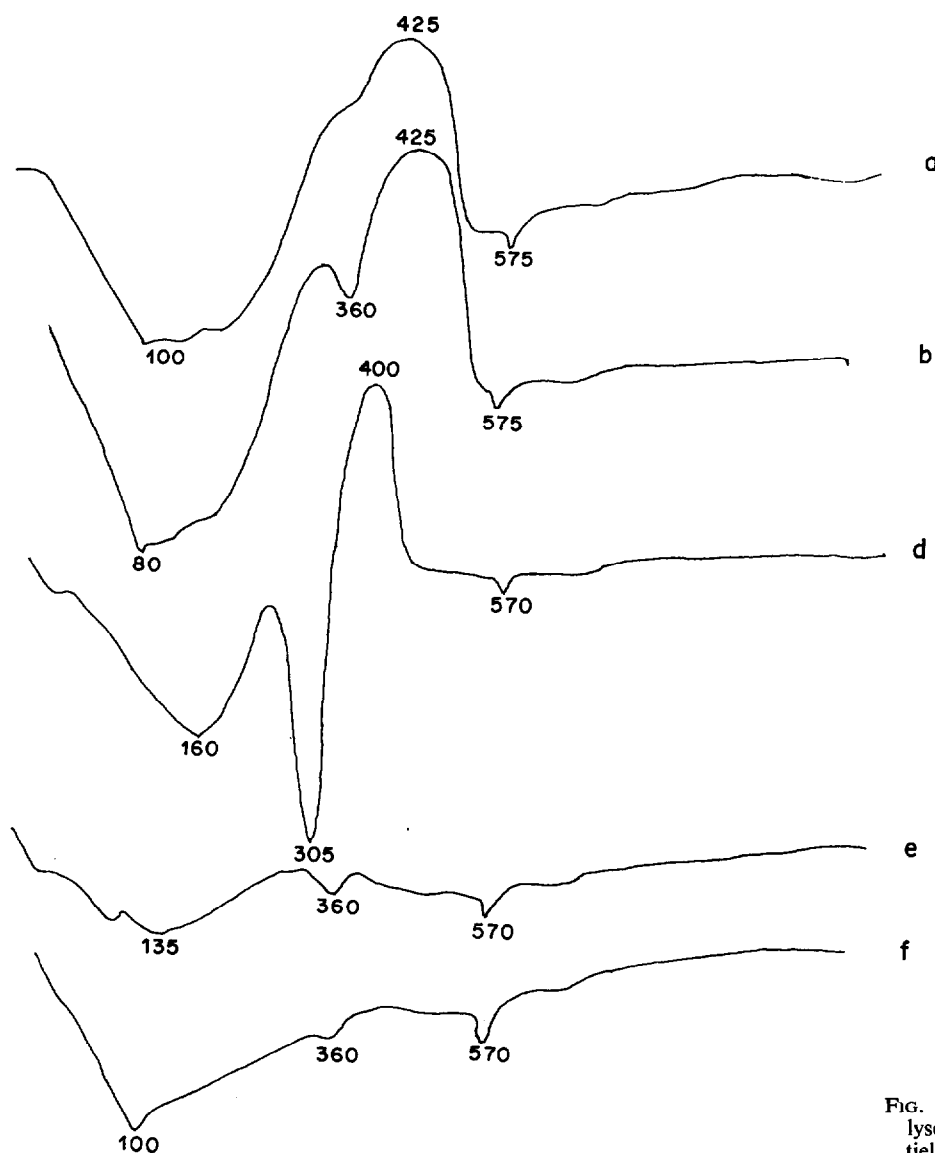


FIG. 4. — Courbes d'analyses thermique différentielle.

A cet effet, on évalue la teneur en quartz d'après la quantité de SiO_2 , la teneur en magnétite d'après la valeur de FeO , la teneur en goéthite d'après la perte de poids entre 280 et 320 °C et celle en hydrate ferrique amorphe ou mal cristallisé d'après la perte de poids avant 250 °C et en admettant que la composition du gel corresponde à la formule $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$. La quantité de Fe_2O_3 non utilisée est alors affectée à l'hématite.

En procédant de cette manière, on aboutit aux résultats consignés dans le tableau IV, dont l'examen conduit à faire plusieurs constatations :

- la *disparition* progressive du quartz est manifeste ;
- la teneur en magnétite est à peu près constante, ce qui signifie que le minéral n'est pratiquement pas altéré dans ce profil ;

TABLEAU III

Teneur des différents horizons en éléments-traces de transition (p.p.m.)

Echantillons	Mn	Cr	V	Co	Ni	Cu	T
(a)	280	47,5	0	24	68	76	0,142
(b)	164	52,5	0	24	48	82	0,108
(c)	174	65	0	20	40	260	0,146
(d)	116	55	0	16	32	380	0,168
(e)	114	55	0	26	32	660	0,332
(f)	114	50	0	26	32	276	0,177
(g)	144	72,5	0	24	24	316	0,170

TABLEAU IV

Constitution minéralogique quantitative (%)

Echantillons	Quartz SiO ₂	Hématite Fe ₂ O ₃	Magnétite FeO. Fe ₂ O ₃	Goethite FeOOH	Hydrate amorphe Fe ₂ O ₃ . 3H ₂ O
(a)	41,2	42,0	1,8	15,0	ε
(b)	36,0	42,2	2,0	19,8	ε
(c)	33,4	48,2	1,9	16,5	ε
(d)	26,7	43,2	1,7	15,4	13,0
(e)	39,5	50,3	1,6	8,6	tr
(f)	51,9	43,0	1,5	3,6	tr
(g)	52,9	44,6	2,5	tr	tr

- la quantité d'hématite reste grosso modo la même dans tous les échantillons. Mais si on examine les choses en valeur relative (tabl. V), un tel résultat correspond en réalité à une *diminution* de l'hématite depuis le bas vers le haut ;
- enfin, il apparaît de la *goethite*, dont la teneur augmente aussi bien en valeur absolue qu'en valeur relative, lorsqu'on va des niveaux inférieurs aux niveaux supérieurs (tabl. V).

Cet ensemble de données montre en définitive qu'au fur et à mesure que l'altération hydrolytique se développe :

— le quartz se dissout, ce qui confirme ce que l'on avait déjà mis en évidence précédemment.

— Le fer se concentre globalement, alors que l'hématite devient *instable* ; de ce fait, une partie de celle-ci disparaît, mais le fer tend à se réorganiser immédiatement sous une nouvelle forme cristalline (goethite).

TABLEAU V

Composition relative des horizons d'altération ne présentant pas de constituants ferri-fères amorphes

Echantillons	(a)	(b)	(c)	(c)	(f)	(g)
Hématite (%)	73,7	68,1	74,5	85,4	92,3	100,0
Goethite (%)	26,3	31,9	25,5	14,6	7,7	—

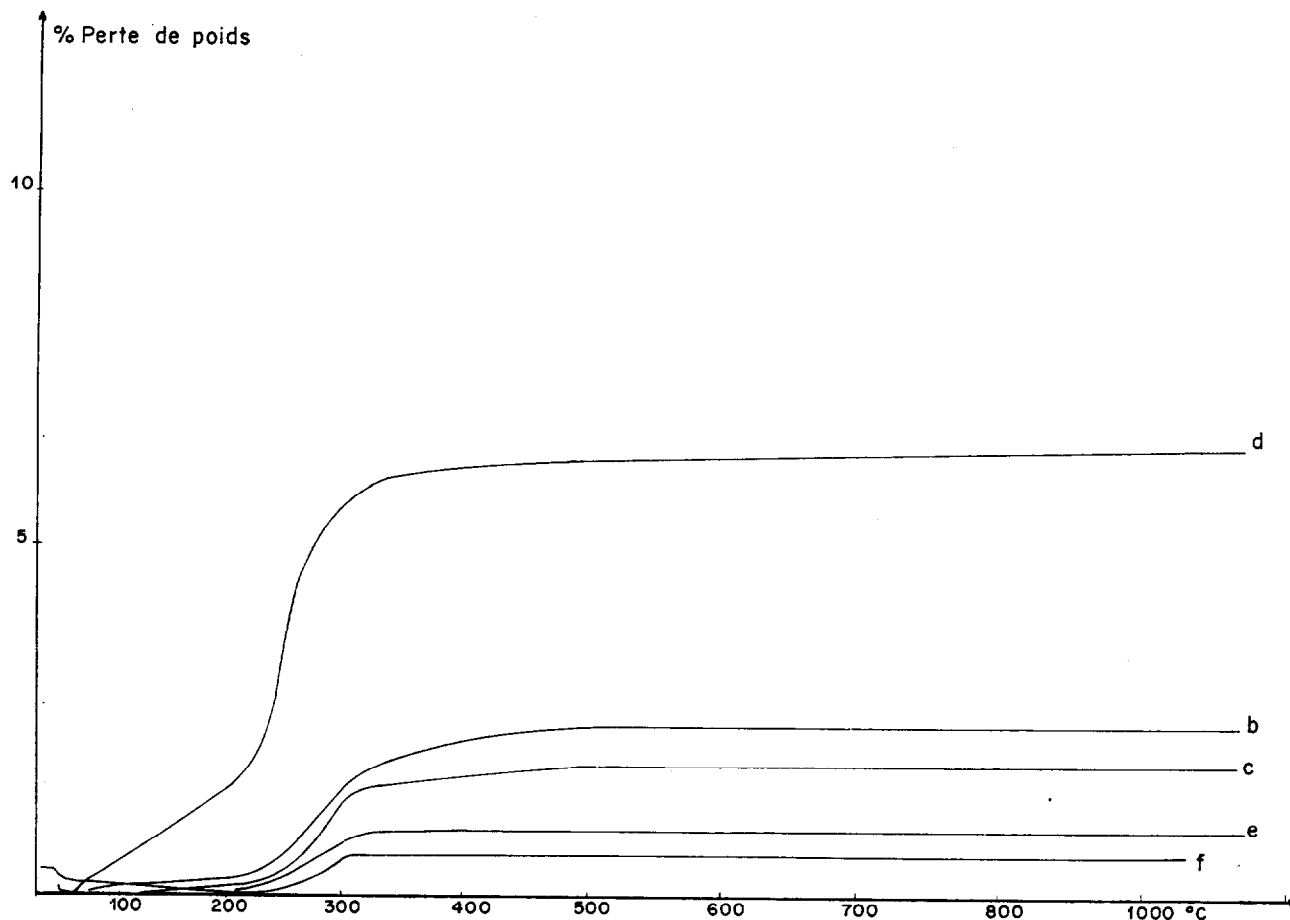


FIG. 5. — Courbes thermopondérales.

Du point de vue physique, on aurait pu s'attendre à ce que l'apparition de 20 % de goéthite microcristalline entraîne le développement d'une structure plus affirmée et même d'une certaine cimentation des minéraux primaires. En fait, les constituants minéralogiques semblent rester indépendants, puisqu'à l'exception du niveau (d), la texture demeure « particulière ». C'est ce qui nous a conduit à procéder à un examen microscopique des principaux minéraux dans les divers horizons.

IV. OBSERVATIONS MICROMORPHOLOGIQUES

Ces études ont été réalisées à l'aide de la microscopie optique et de la microscopie électronique à

balayage ; elles ont porté essentiellement sur l'état et la morphologie, aussi bien des quartz et de l'hématite primaire que des cristaux de goéthite secondaire.

Quartz

Dans l'itabirite, les cristaux de quartz sont toujours propres, limpides et possèdent des faces nettes ; de plus, ils présentent un faciès allongé (planche I - photo 1). Dans les horizons d'altération, l'évolution des quartz se traduit par l'apparition de graines plus arrondies, par le développement de fractures plus ou moins remplies immédiatement de produits ferrugineux, enfin par une nette corrosion des cristaux. Cette dernière est d'ailleurs bien marquée dans les horizons les plus élevés : planche I - photo 4 (microscopie optique) et planche II - photo 4 (microscopie

PLANCHE I

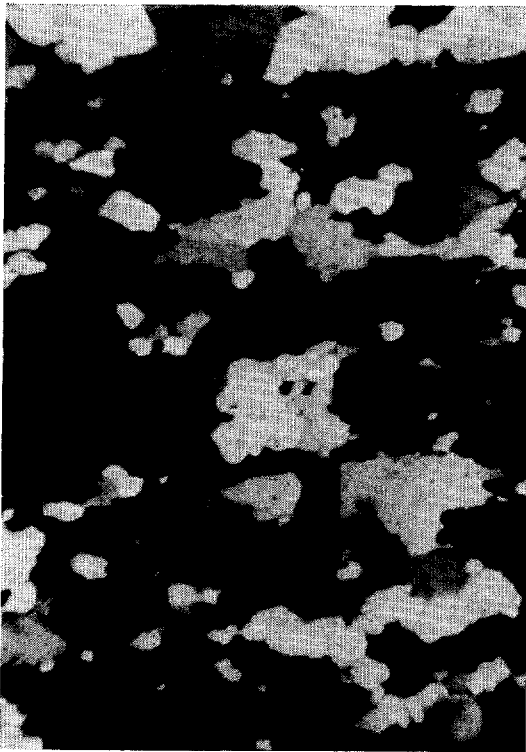


Photo 1. — Itabirite compacte (Roche-mère) - ($\times 10$).

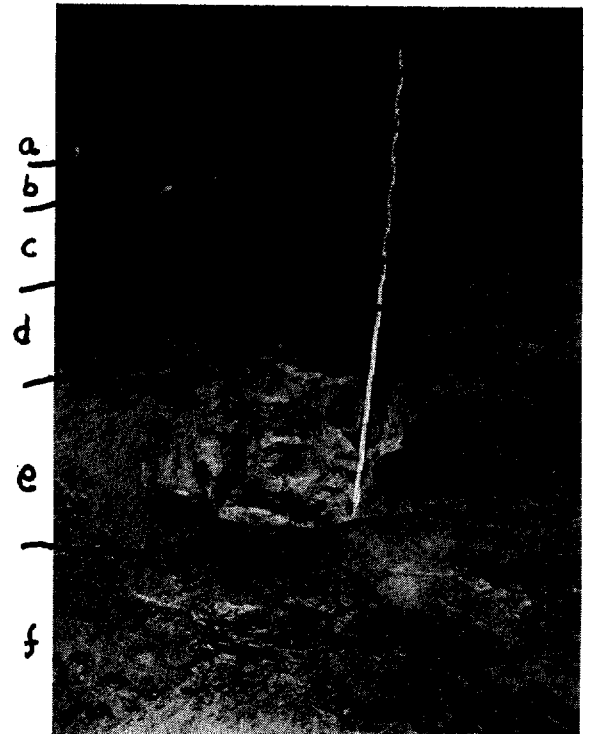


Photo 2. — Aspect du profil étudié — les horizons (e) et (f) peuvent être considérés comme l'« Itabirite pulvérulente ».



Photo 3. — Aiguilles de goéthite cristallisées perpendiculairement au noyau primaire ($\times 60$).



Photo 4. — Cristal de quartz fortement corrodé ($\times 25$).

à balayage) et rappelle les faciès observés par différents auteurs : G. Millot et R. Fauck (1970) - G. Claisse (1972) - N. Leneuf (1973).

Hématite

Les cristaux d'hématite constituant l'itabirite saine sont caractérisés par le développement de faces parfaitement polies et présentant un vif éclat : planche II - photos 1 et 2 (microscopie à balayage). En revanche, dès que l'altération se manifeste, les faces perdent progressivement leur éclat et servent bientôt de support au développement de goethite : planche II - photo 3 (microscopie à balayage).

Goethite

Elle apparaît essentiellement sous deux formes :

— La première, la plus importante quantitative-ment, est celle, dont on vient de faire état. Elle se présente sous l'aspect de particules allongées au sein d'agrégats, désordonnés et plus ou moins sphériques, constitués de *microcristaux*. Ceux-ci sont tout à fait semblables à ceux décrits par G. Bedarida *et al.* (1973) dans leur dernière publication sur la transformation en goethite des cristaux d'hématite de l'île d'Elbe. Le développement de ces particules ne résulterait pas d'ailleurs d'une épitaxie au sens strict, mais d'une réorganisation *in situ* de l'hématite en goethite.

— La seconde forme se présente sous un faciès *aciculaire* se développant perpendiculairement aux cristaux primaires et les entourant complètement (planche I - photo 3). Comme ces cristaux peuvent être aussi bien du quartz que de l'hématite, il est clair que ce dernier faciès provient d'une redistribution du fer qui s'est développée sur une plus grande distance. Ce n'est d'ailleurs que dans ce cas, et dans ce cas seulement, que la cristallisation de goethite coïncide avec un développement de la cimentation.

V. CONSIDÉRATIONS SUR LA DISSOLUTION DU QUARTZ ET L'INSTABILITÉ DE L'HÉMATITE PRIMAIRE EN CONDITIONS TROPICALES HYDROLYSANTES

1. Caractéristiques générales de l'évolution

L'ensemble des données concernant l'évolution des itabirites du Quadrilatère ferrifère du Brésil, nous

conduit tout d'abord à faire un certain nombre de remarques aussi bien sur les phénomènes d'altération que sur ceux relatifs à la néoformation.

a. SUR LE PLAN DE L'ALTÉRATION DES MINÉRAUX PRIMAIRES

La disparition du quartz : celle-ci résulte de la dissolution hydrolytique de ce composé ; en effet, par suite de l'absence d'autres silicates, la silice contenue dans les eaux phréatiques (7,55 ppm en moyenne - J. Eichler, 1970) ne peut provenir que de l'altération du quartz. Ainsi est confirmée de la façon la plus catégorique l'intense dissolution, qui peut caractériser ce type de minéral dans certaines ambiances tropicales.

L'instabilité de l'hématite primaire, sur laquelle nous reviendrons.

b. SUR LE PLAN DE LA NÉOFORMATION DE CONSTITUANTS SECONDAIRES, il est bon de rappeler :

L'absence d'une néogénèse d'argiles ferrifères : c'est là un résultat tout à fait attendu, bien que par rapport aux autres types d'argiles alumineuses et magnésiennes, la genèse des phyllites ferrifères et de la nontronite en particulier, nécessite des milieux relativement dilués (Y. Tardy *et al.*, 1974 - J.-P. Carmouze, 1976). Mais ici, du fait de l'existence d'un milieu filtrant et de la présence de minéraux résistants, les concentrations rencontrées au sein des solutions de lessivage sont encore beaucoup trop faibles ($\text{SiO}_2 = 7,55 \text{ ppm}$ et $\text{Fe} = 0,23 \text{ ppm}$ en moyenne - J. Eichler, 1967).

L'absence d'individualisation d'hydrates ferriques amorphes ou mal cristallisés. On aurait pu penser à première vue que la disparition d'une certaine quantité d'hématite liée à un maintien global du fer dans le profil se traduise au moins au cours des phases initiales, par une production massive d'hydrates amorphes ou mal cristallisés. Il n'en a rien été, sauf dans le niveau (d) qui, comme nous l'avons vu, constitue un horizon un peu spécial. Or, ce résultat s'accorde parfaitement aujourd'hui avec les conceptions qui ont été émises récemment sur le sujet et qui relient les phénomènes de cristallo-genèse des oxydes de fer à la présence ou l'absence d'éléments traces de transition (L. Nalovic, 1974) : l'édification des oxydes et hydroxydes cristallisés étant d'autant plus nette que le milieu est plus pauvre en éléments traces, ce qui est justement le cas ici.

PLANCHE II

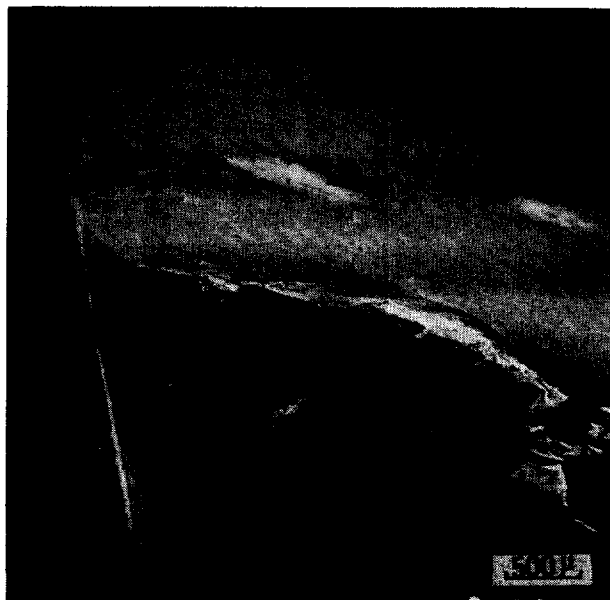


Photo 1. — Surface parfaitement polie d'un cristal d'hématite saine.

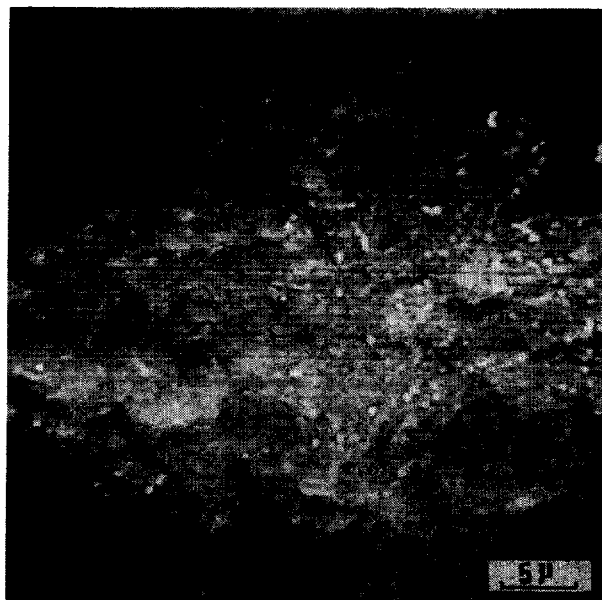


Photo 2. — Détail de la surface précédente.

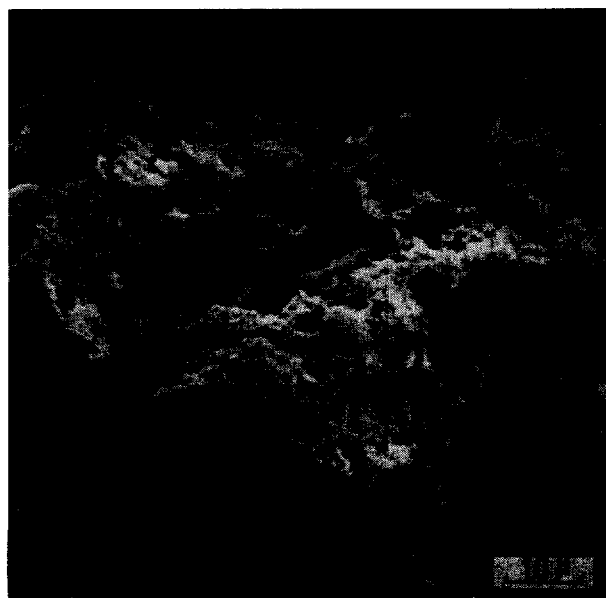


Photo 3. — Hématite de l'horizon B = disparition des surfaces polies et recouvrement de microcristaux de goéthite.

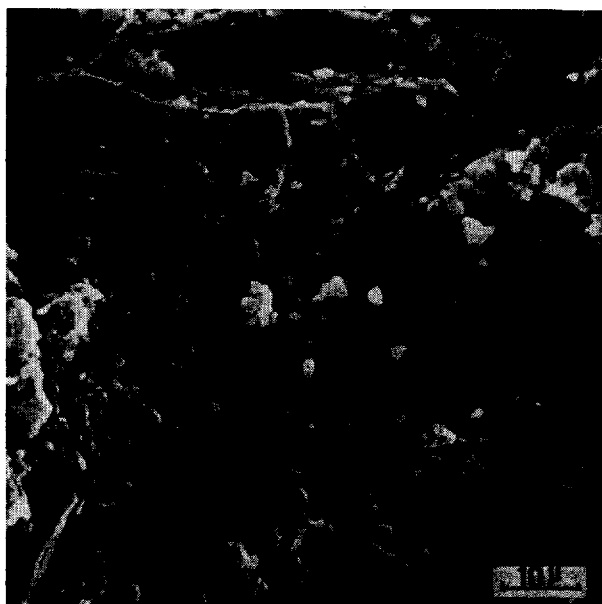


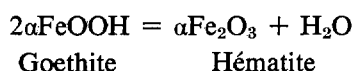
Photo 4. — Aspect extérieur d'un grain de quartz fortement corrodé de l'horizon B.

— Enfin, un développement caractéristique de goethite α FeOOH dans les horizons d'altération. C'est le problème que nous allons examiner maintenant, conjointement avec la disparition de l'hématite primaire.

2. Instabilité de l'hématite primaire et genèse de la goethite

Dans les sols des régions tempérées froides et humides, la transformation de l'hématite en goethite au sein des horizons supérieurs des profils constitue un phénomène relativement banal. Elle résulte, comme l'a expliqué U. Schwertmann (1971), de la dissolution de l'hématite sous l'influence de réactifs organiques complexants, puis de la réprécipitation d'hydrate ferrique qui cristallise alors directement en goethite. L'évolution enregistrée résulte donc de la réalisation d'une transformation physicochimique bien définie.

Il n'en est pas de même apparemment dans les régions superficielles où le processus dominant de l'altération est de nature hydrolytique. Dans ce cas en effet, il est reconnu depuis toujours que l'hématite constitue la phase la plus stable, étant donné l'irréversibilité de la réaction de déshydratation dans les conditions ordinaires :



Toutefois, les études expérimentales de A. Ferrier (1966), puis celles de D. Langmuir (1971) ont mis l'accent sur l'importance de la taille des particules dans le développement de ce genre de transformation. Il a été constaté, par exemple que l'enthalpie libre de la réaction dépendait ici non seulement de la température, mais aussi de l'état de division du matériau initial. C'est ainsi qu'A. Ferrier a montré qu'à température fixe, la réaction de déshydratation était exothermique, donc la plus probable pour les petits cristaux ($\varnothing < 1 \mu$) ; à l'opposé, c'est la réaction de rehydratation qui est la plus vraisemblable pour les

gros cristaux, car l'énergie superficielle de la goethite devient alors supérieure à celle de l'oxyde ferrique.

Or, dans les itabirites, nous savons qu'au départ l'hématite se trouve en cristaux de grande taille ; on comprend de ce fait qu'au contact de l'eau superficielle, celle-ci devienne instable et tende ainsi, au moins partiellement à se réhydrater.

Nous venons de voir que les paramètres physiques (état de division de cristaux - température...) jouaient un grand rôle, quant à la stabilité relative des différents types d'oxydes et d'hydroxydes de fer à la surface du globe. Mais, les paramètres chimiques interviennent aussi et appuient encore dans le sens de la transformation hématite-goethite lors de l'évolution superficielle des itabirites. En effet, comme nous parlons d'une roche de nature acide, riche en fer et totalement dépourvue de silicates primaires, la solution d'altération est caractérisée par une faible « disponibilité en OH » (cf. L. Nalovic, 1974). Or, il a été montré que dans ce cas, les ions Fe^{3+} tendent à constituer des petits polymères, qui s'agencent spontanément pour former des cristaux de goethite (1).

En conclusion, dans l'altération des itabirites en milieu tropical hydrolysant, la solubilité du quartz et la transformation de l'hématite primaire, donc en cristaux de grande dimension, sont des phénomènes qui s'expliquent aisément ; ils constituent dès lors les processus les plus caractéristiques de l'évolution géochimique de « l'ensemble siferrique » dans les conditions de la surface du globe.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé grâce au support financier de la FAPESP (Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo) et du CNPQ (Conselho Nacional de Pesquisas - Brésil) ; nous les en remercions bien vivement.

(1) Cette explication pourrait aussi intervenir dans le problème de la réhydratation partielle de l'hématite suivant la réaction $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{FeO OH}$.

Manuscrit reçu au S.C.D. de l'ORSTOM le 13 octobre 1976.

BIBLIOGRAPHIE

- BARBOUR (A.P.), (1970). — Oxidação do Mineirio de ferro de Itabira M.G. Min. Met. vol. LI, 302 : 73-79.
- BEDARIDA (G.), FLAMINI (F.), GRUBESSI (O.) et PEDEMONTE (G.M.), (1973). — Hematite to goethite surface weathering scanning electronmicroscopy. *Am. Min.*, 58 : 794-795.

- CARMOUZE (J.P.), (1976). — La régulation hydrogéochimique du lac Tchad. Contribution à l'analyse biogéodynamique d'un système lacustre endoréique en milieu continental cristallin. Thèse Univ. Paris VI. 418 p. *Multigr.*
- CLAISSE (G.), (1972). — Etude sur la solubilisation du quartz en voie d'altération. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.*, vol. X, n° 2 : 97-122.

- VAN DORR (J.), GUILD (Ph.) et BARBOSA (A.L.M.), (1952). — Origin of the Brazilian iron ores. Symposium sur les gisements de fer. XIX^e Cong. Int. Geologie : 286-298.
- VAN DORR (J.), (1964). — Supergene iron ores of Minas Gerais, Brazil. *Econ. Geol.*, 59: 1204-1240.
- EICHLER (J.), (1967). — O enriquecimento residual e supergenico do Itabirito através de intemperismo. Institut do Geosciences. Rio de Janeiro. *Geologie*, 1: 29-40.
- FAUCK (R.), (1972). — Evolution des quartz dans les sols rouges ferrallitiques développés sur les roches sableuses et gréseuses de l'Afrique Occidentale. *C. R. Acad. Sci.*, 271: 2273-2276.
- FERRIER (A.), (1966). — Influence de l'état de division de la goethite et de l'oxyde ferrique sur leurs chaleurs de réaction. *Revue de chimie minérale*, 3: 587-615.
- FICKEL (W.), (1963). — Der laterit in Sud-Ghana; seine Verwitterung, seine Entstehung und seine Bodenmechanischen. *Arb. Geol. Palaeont. Inst.* 38.
- KING (L.C.), (1957). — A geomorphologia do Brasil oriental. I.B.G.E. Rio de Janeiro, 256 p.
- LANGMUIR (D.), (1971). — Particle size effect on the reaction goethite = hematite + water. *Amer. J. Sc.*, 271: 147-156.
- LENEUF (N.), (1972). — Aspects stéréoscopiques de la surface des grains du Continental Terminal en Côte d'Ivoire. *Cah. ORSTOM, Sér. Géol.*, vol. IV, n° 1: 53-65.
- MILLOT (G.) et FAUCK (R.), (1970). — Sur l'origine de la silice, des silicifications climatiques et des diatomites quaternaires du Sahara. *C. R. Acad. Sci.*, 272: 4-7.
- NALOVIC (L.), (1971). — Comportement du fer en présence des éléments de transition dans la nature. *C. R. Acad. Sci.*, 273 D: 1664-1667.
- NALOVIC (L.), (1974). — Recherches géochimiques sur les éléments de transition dans les sols. Etude expérimentale de l'influence des éléments traces sur le comportement du fer et l'évolution des composés ferrifères au cours de la pédogenèse. Thèse Doct. Paris, 289 p. *Multigr.*
- NICOLAS (J.) et VERDIER (J.), (1964). — Sur l'altération des quartzites ferrugineux et des roches basiques de la Sierra de Imataca (Rio Caroni, Guyane Vénézuélienne). *C. R. Acad. Sci.*, 259: 4077-4078.
- PAVLOVIC (S.) et NICOLIC (D.), (1973). — Formation des latérites sur les quartzites aux environs de Baniey (Guinée). Trans. 3^e Cong. Int. ICSO Bauxites. Nice: 233-235.
- SCHWERTMANN (U.), (1971). — Transformation of hematite to goethite in soils. *Nature*, vol. 232: 624-625.
- TARDY (Y.), TRESCASES (J.J.) et FRITZ (B.), (1974). — Evaluation de l'enthalpie libre de formation de montmorillonites ferrifères. *C. R. Acad. Sci.*, D: 1665-1668.
- THIENHAUS (R.), (1964). — Verwitterungsprofile über Itabiriten von Afrika und Indien. *Schriften Ges. Deutsch Metallhütten und Bergleute*. 14: 88-97.