

Dispersion et accumulation du cuivre au cours de l'altération supergène au Brésil

J.C. Parisot (1), M.C. Toledo-Groke (2), M. Creach (3),
A.J. Melfi (4), J.J. Trescases (3)

INTRODUCTION

Le comportement du cuivre au cours de l'altération supergène a fait l'objet de travaux qui concernent essentiellement :

- la prospection géochimique (CHAFFE, 1975, DAVY, 1979, WARNANT *et al.*, 1981, GOVETT, 1987, PARISOT *et al.*, 1989),
- les minéraux secondaires spécifiques du cuivre tels que les sulfures de cémentation (SERKIES *et al.*, 1966, SILLITOE et CLARK, 1969, THORNER, 1979), les oxydes, les silicates ou les carbonates (NEWBERG, 1969, GASTUCHE VAN OOSTERWYCK, 1970, 1977, NICKEL, 1984, WOODS et GARRELS, 1986),
- les minéraux susceptibles de fixer le cuivre comme les chlorites (BANK, 1974, NOTEBAART, 1978), les vermiculites (BASSET, 1958, MC BRIDE, 1976, ILDEFONSE *et al.*, 1986), les smectites (McLAREN *et al.*, 1983, HARSH ET DONER, 1984, MOSSER *et al.*, 1989), les kaolinites (MOSSER et ZEEGERS, 1988) et les oxydes de fer (NOWLAN, 1976, LAVILLE-TIMSIT *et al.*, 1976, LEARNED *et al.*, 1981, VEIGA et SHORSHER, 1982).

Pendant, les études concernant le comportement du cuivre sur l'ensemble des profils d'altération latéritique sont moins fréquentes (NICKEL, 1984, KOUD, 1985, TOLEDO-GROKE, 1986, CREACH, 1988, PARISOT *et al.*, 1989, PARISOT, 1989).

1) ORSTOM, UR1G, 213 rue La Fayette 75480 PARIS.

2) Universidade de Sao Paulo, IG, CP 20899, 01498 SAO PAULO.

3) Université de Poitiers, lab. pétr. de la surface - 40 av. recteur Pineau, 86022 POITIERS.

4) Universidade de Sao Paulo, IAG, CP 30627, 01051 SAO PAULO.

Au Brésil, une part importante du potentiel minier est associée aux formations précambriennes du bouclier sud-américain qui occupent 45 % du territoire du pays. D'autre part, environ 65 % de la surface du Brésil sont recouverts par un important manteau d'altération latéritique.

Dans les trois gisements et indices qui ont été sélectionnés au Brésil (figure 1), le comportement du cuivre dans les horizons d'altération est différent.



Figure 1 : Localisation des sites étudiés.

A Chapada-Grande, le cuivre est progressivement lixivié de la base vers le sommet du profil ; à Santa Blandina, des minéraux secondaires spécifiques du cuivre s'accumulent dans certains faciès ; à Salobo 3A, la saprolite présente des teneurs en Cu comparables à celles de la roche-mère sans

qu'aucun minéral spécifique du cuivre ne soit identifié. Dans ce dernier gisement la saprolite est donc un minerai potentiel. La recherche des facteurs qui engendrent des comportements aussi différents est menée par une étude géochimique détaillée des différents faciès d'altération.

MÉTHODES

Dans les trois sites, un échantillonnage complet et représentatif des différents faciès d'altération est effectué depuis la roche fraîche jusqu'aux faciès les plus altérés. Les échantillons proviennent de puits, de sondages et de galeries d'exploration (Chapada et Salobo 3A) et d'une carrière d'exploitation artisanale (Santa Blandina).

Les échantillons, ainsi que les fractions granulométriques $< 2 \mu$ de certains d'entre eux, sont analysés par spectrométrie d'absorption atomique (AAS) (Fe, Al, Mg, Mn, Na, Ca, K, Cu), colorimétrie (Ti) et gravimétrie (Si). Sont également dosées par AAS les solutions d'extractions sélectives des oxydes de fer par le réactif de Tamm sous U.V. (de Endredy, 1963) ainsi que les solutions obtenues après saturation par le BaCl_2 (bases échangeables).

Parallèlement l'étude pétrologique et minéralogique est réalisée par :

- l'observation d'échantillons, représentatifs des différents faciès, par microscopie optique de lames minces polies indurées et par microscope électronique à balayage (MEB),
- diffraction de rayon X (DRX),
- microanalyses par microsonde électronique.

PRÉSENTATION DES SITES ÉTUDIÉS

Chapada-Grande

Situé à 250 km au nord-ouest de Brasilia, la minéralisation cuprifère de Chapada est associée à des formations métasédimentaires protérozoïques.

Dans la zone minéralisée, des plateaux cuirassés qui correspondent à une surface d'aplanissement pléistocène sont entaillés, sur 20 à 30 m, par le réseau de drainage actuel.

La région est soumise à un climat tropical à saisons contrastées, avec une saison sèche bien marquée de juin à septembre. 80 % des 1 800 mm annuels tombent entre décembre et février. La température moyenne est de 23 °C.

La roche fraîche minéralisée est un micaschiste constitué dans des proportions variables de quartz, phlogopite, plagioclases, amphiboles, muscovite, paragonite, disthène et calcite. Elle est recouverte par un épais manteau d'altérite qui dépasse 50 m d'épaisseur. Dans les profils de plateaux, six horizons d'altération dont l'évolution minéralogique est schématisée (figure 2), sont décrits de bas en haut :

- dans la roche altérée cohérente (RAC), épaisse de 15 à 20 m, l'altération progresse à partir des diaclases et des fractures pour former un horizon arénisé friable. Un plasma essentiellement smectitique, avec des traces de kaolinite et de vermiculite, se développe aux dépens des minéraux primaires.
- L'horizon gris-vert (HGV), appelé ainsi à cause de sa couleur, épais de 7 à 10 m, se caractérise par le développement de la kaolinite qui est soit associée à de petites quantités de smectite dans le plasma argileux, soit seule dans les pseudomorphoses des derniers minéraux altérés, les micas blancs.
- L'horizon d'argile bariolée (AB), épais d'environ 15 m, présente un plasma essentiellement kaolinitique à la base (roche altérée cohérente) qui est progressivement envahi par la goethite. Vers le sommet, on note un début de nodulation ferrugineuse.

Dans ces trois horizons, la structure de la roche mère est conservée.

- Dans l'horizon d'argile tachetée (AT), épais d'environ 1,5 m, la structure de la roche-mère est effacée. Outre la kaolinite et la goethite, apparaît de la goethite alumineuse (15 moles % d'ALOOH) et des traces de gibbsite. La nodulation ferrugineuse s'accroît.
- La cuirasse ferrugineuse (CUR), épaisse de 0 à 1,5 m, est massive à la base, fragmentée en blocs vers le sommet. Dans cet horizon on note surtout de la kaolinite et de la goethite alumineuse (22 moles % d'ALOOH) avec des traces de gibbsite et d'hématite.

La présence, dans un puits, d'un filon de quartz qui traverse sans perturbation apparente ces deux derniers horizons, laisse supposer que le volume initial de la roche est peu ou pas modifié.

- Un sol (SO) peu épais, d'environ 0,3 m, riche en nodules et gravillons ferrugineux ($0,5 < \varnothing < 3$ cm), hérités de la cuirasse, recouvre ces horizons.

Salobo 3A

Situé à 550 km au sud de Belém, dans la province minérale de Carajás, le gisement de Salobo 3A est associé à des schistes archéens d'origine volcano-sédimentaire (FARIAS et SAUERESSIG, 1982). Les schistes présentent des variations de faciès selon les teneurs en magnétite, biotite (*anite*), amphibole (*grunérite*), grenat (*almandin*). La paragenèse est donc très ferri-fère. On note que les faciès riches en magnétites sont plus riches en sulfures (teneur Cu > 0,8 %), alors que ceux à biotites sont considérés comme stériles (teneur Cu < 0,8 %).

La zone minéralisée se situe sur la pente abrupte (30 %) d'une colline et on note que les plans de schistosité présentent des pendages subverticaux, nord-est à sud-ouest, et sont perpendiculaires à la direction de la pente topographique.

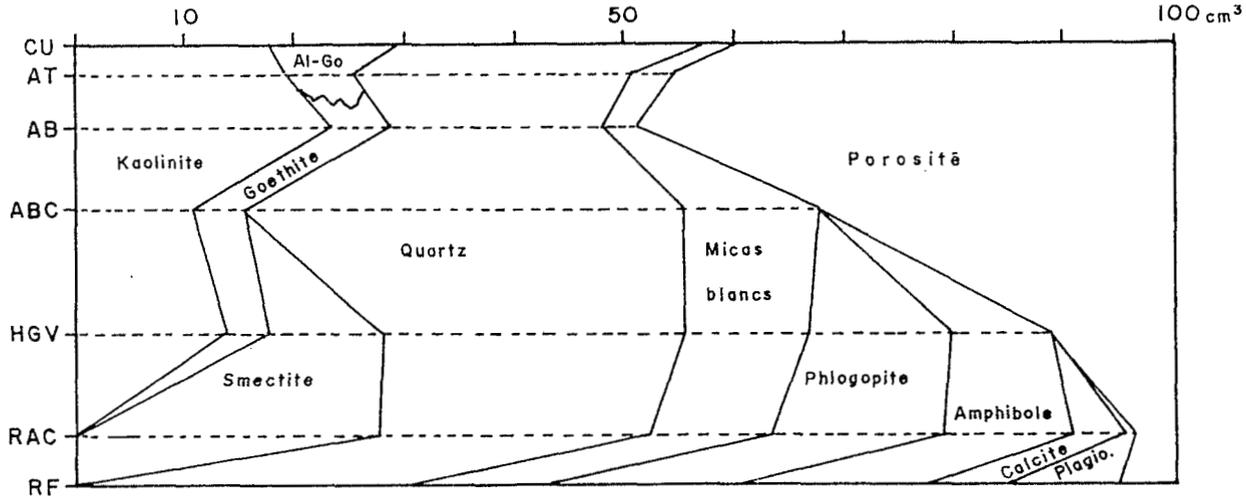


Figure 2 : Chapada Grande : Bilan minéralogique en cm^3 pour 100 cm^3 de roche.

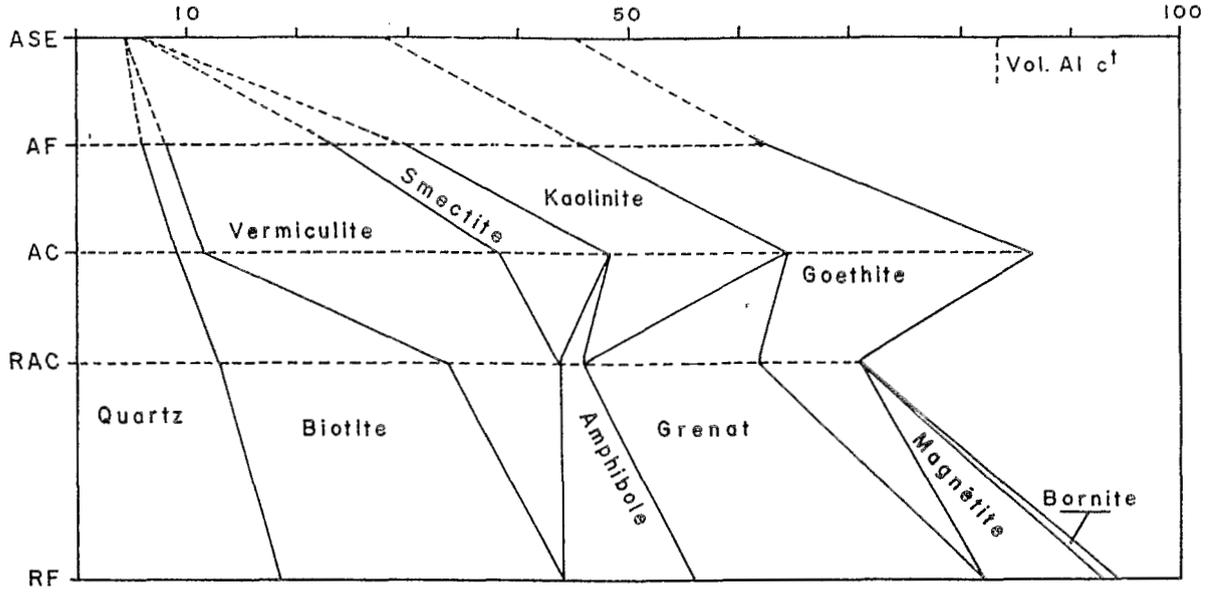


Figure 3 : Salobo 3A : Bilan minéralogique en cm³ pour 100 cm³ de roche.

Le climat est caractérisé par l'alternance d'une saison sèche de juin à octobre et d'une saison humide de novembre à mai qui reçoit 90 % des 2 200 mm annuels. La température moyenne est de 24°.

La roche-mère est recouverte par un manteau d'altération épais d'environ 65 m, dans lequel on distingue cinq horizons dont l'évolution minéralogique est représentée sur la figure 3.

- Le niveau de transition (TR), de 65 à 62 m, se caractérise par une importante fracturation et l'apparition de sulfures de cimentation (covellite et digénite). Dans certaines fissures on note la présence de malachite ou de nontronite.
- Dans la roche altérée cohérente (RAC), de 62 à 41 m, on note l'altération des biotites en interstratifiés biotite-vermiculite (ILDEFONSE *et al.*, 1986, TOLEDO-GROKE *et al.*, 1990). La goethite et l'hématite apparaissent comme produits d'altération de la magnétite, de l'amphibole et du grenat (PARISOT *et al.*, 1983, TOLEDO-GROKE, 1986).
- La saprolite que l'on sépare en deux horizons, l'altérite cohérente (AC) de 41 à 16 m et l'altérite friable (AF) de 16 à 6 m, se caractérise par l'augmentation de la proportion d'interstratifiés biotite-vermiculite et l'apparition de smectite et de kaolinite. La goethite devient la principale phase ferri-fère. La proportion de kaolinite augmente vers le sommet de l'horizon aux dépens de la smectite et de l'interstratifié.
- Dans l'altérite à structures de roche-mère effacées (ASE), de 6 à 2 m, la smectite a totalement disparu et il ne reste que des traces de vermiculite. La goethite et la kaolinite constituent l'essentiel des phases supergènes.

Santa Blandina

Le site de Sta Blandina est localisé à 250 km à l'ouest de Sao Paulo. La minéralisation primaire est constituée par des poches et des filons de sulfures massifs (pyrite, chalcopyrite, bornite) inclus dans un skarn à grenats (grossulaire-andradite). Le skarn qui se présente comme un corps allongé de 400 m sur 150 m, est formé d'un faciès riche en grenats (67,3 % de grossulaire-andradite, 16,3 % de quartz et 16 % de diopside) avec, en son milieu, une lentille décamétrique de marbre.

La région est sous l'influence d'un climat tropical humide. Les précipitations annuelles varient de 1 500 à 2 000 mm et les températures de 18 à 20°.

Au cours de l'altération, la dissolution du marbre entraîne la formation d'un karst rempli par les produits d'altération du skarn. Les poches et les filons à sulfures massifs forment des chapeaux de fer.

Les principales étapes de l'altération du skarn à grenats peuvent être suivies à la base de la carrière au fur et à mesure que l'on s'approche du karst. L'altération se caractérise par l'importance des phénomènes de dissolution

et par la formation de peu de produits secondaires (figure 4). Deux ensembles d'altération sont décrits (CREACH, 1988) :

- dans l'ensemble I, un réseau de fractures découpe la roche en polyèdres. Au cœur de ces polyèdres, dans l'ensemble Ia, le quartz est épigénisé par le chrysocolle. Dans l'ensemble Ib, en bordure des polyèdres, le grenat s'altère à son tour et apparaissent des produits cuprifères d'aspect argilomorphe qui épigénisent quartz et grenats ;
- dans l'ensemble II, les phénomènes de dissolution s'accroissent, entraînant la formation de faciès "pain d'épice" où la porosité dépasse 70 %. Le chrysocolle qui n'apparaît plus dans l'ensemble IIa où seuls les produits argilomorphes sont présents réapparaît dans l'ensemble IIb ;
- vers la surface, la kaolinite et la goéthite s'individualisent alors que les proportions de chrysocolle et de produits argilomorphes cuprifères diminuent.

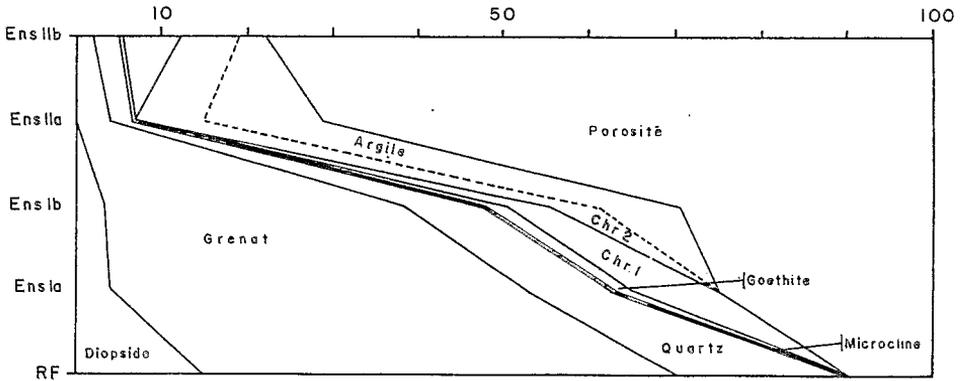


Figure 4 : Santa Blandina : Bilan minéralogique en cm^3 pour 100 cm^3 de roche.

IDENTIFICATION DES PHASES CUPRIFÈRES ET LEUR ÉVOLUTION DANS LES PROFILS

Chapada Grande

A Chapada, la minéralisation, disséminée à chalcopryrite et traces de bornite, est pauvre (0,4 % Cu). Le cuivre est progressivement lixivie de la base vers le sommet du profil. Cette lixiviation est particulièrement importante dans l'argile bariolée et surtout dans l'argile tachetée et dans la cuirasse où il ne reste que 10 % du CuO initial (tableau 1). Dans ces horizons aucun minéral spécifique du cuivre n'est identifié.

A la base du profil d'altération, dans la roche altérée cohérente, la chalcopirite est uniquement affectée par des phénomènes de dissolution. Une partie du cuivre libéré ($\approx 8\%$) se distribue de manière aléatoire dans le plasma d'altération smectitique de tous les minéraux.

La teneur moyenne de ce plasma est donc faible (0,06 % CuO) et sur l'ensemble des microanalyses le cuivre ne présente de corrélation avec aucun élément.

Tableau 1

	1	2	3
Cuirasse	0,11	0,08	<u>-87,9</u>
Arg. tachetée	0,12	0,07	<u>-88,8</u>
Arg. bariolée	0,15	0,08	<u>-87,6</u>
Arg. bar. cohérente	0,25	0,16	<u>-75,0</u>
Hor. gris-vert	0,34	0,29	-55,8
R. alt. cohérente	0,49	0,45	-31,2
Roche fraîche	0,65	0,65	0

1 = teneur en CuO en g %,

2 = teneur en CuO en g pour 100g de roche fraîche

3 = % pertes en CuO par rapport à la roche fraîche

(caractères soulignés = différence significative au seuil de 1 %).

Les valeurs des colonnes 2 et 3 sont calculées à volume constant.

Cependant deux groupes de points présentent une corrélation Fe-Cu significative au seuil de 1 % (figure 5).

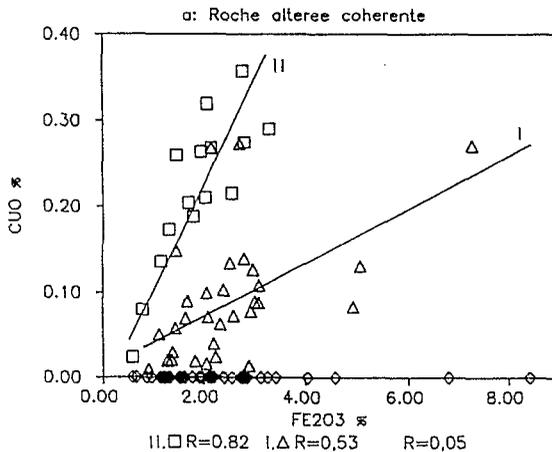


Figure 5 : Corrélation Fe_2O_3 -CuO dans l'horizon de roche altérée cohérente de Chapada Grande.

Dans le premier groupe on note un coefficient de corrélation Fe-Cu de 0,53 mais également Na-Cu ($r = 0,77$) et Ti-Cu ($r = 0,56$) ; ce groupe peut être interprété comme une phase micacée (phlogopite) altérée en vermiculite puis en smectite. Dans le deuxième groupe, seule la corrélation Fe-Cu ($r = 0,82$) apparaît. La smectite qui représente 23 % de la RAC, renferme donc 3 % du CuO de l'horizon. 97 % du CuO sont encore sous forme de chalcopyrite.

Entre les microanalyses des produits d'altération de l'horizon gris-vert, seule la corrélation Fe-Cu ($r = 0,46$) est significative au seuil de 1 %. Dans cet horizon la chalcopyrite est encore abondante et les calculs de bilan permettent d'estimer que ce sulfure renferme 85 % du CuO de l'horizon.

Dans les horizons de surface, des extractions sélectives des oxydes de fer ont été réalisées avec le réactif de Tamm sous UV sur la fraction $< 2 \mu$. Cette attaque affecte surtout la goethite, qui est le principal oxyde de fer identifié, mais également une faible proportion de kaolinite. Quel que soit l'horizon, les courbes cumulatives d'extraction du fer et du cuivre sont similaires, indiquant une association entre ces deux éléments (figure 6).

Dans l'argile bariolée, comme dans l'argile tachetée, l'essentiel du cuivre est extrait (respectivement 74 et 86 %) avec le fer. Les analyses à la microsonde montrent effectivement une bonne corrélation Fe-Cu dans l'argile bariolée ($r = 0,87$) ; cependant celle-ci disparaît dans l'argile tachetée. En effet dans cet horizon, la distribution du cuivre dans le plasma d'altération devient aléatoire et on note l'apparition d'oxydes de fer d'où le cuivre est absent, et ceci indépendamment de leur taux de substitution en aluminium. Dans ces horizons la goethite est la principale phase ferrière.

Dans la cuirasse, les microanalyses montrent également une distribution du cuivre aléatoire avec, comme dans l'argile tachetée, des oxydes de fer sans cuivre, mais également la présence de concentrations en CuO (0,1 à 0,3 %) dans des plasmas peu ferrugineux (2 à 5 % de Fe_2O_3).

Ces teneurs en CuO sont comparables à celles dosées dans les goethites "cuprifères". Lors de l'attaque sélective, seul 45 % du CuO de l'horizon est extrait avec les oxydes de fer. Si l'on admet que le cuivre non extrait est associé au fer restant, on obtiendrait une phase ferrière à 4 % de CuO ce qui n'a jamais été observé. On est donc amené à envisager la présence dans la cuirasse d'une phase cuprifère indépendante des oxydes de fer. Dans la cuirasse et dans l'argile tachetée, on observe donc une dissociation partielle entre le cuivre et le fer. D'autre part on note que les teneurs moyennes en CuO des goethites "cuprifères" sont plus faibles dans la cuirasse (0,3 %) que dans l'argile bariolée (1 %).

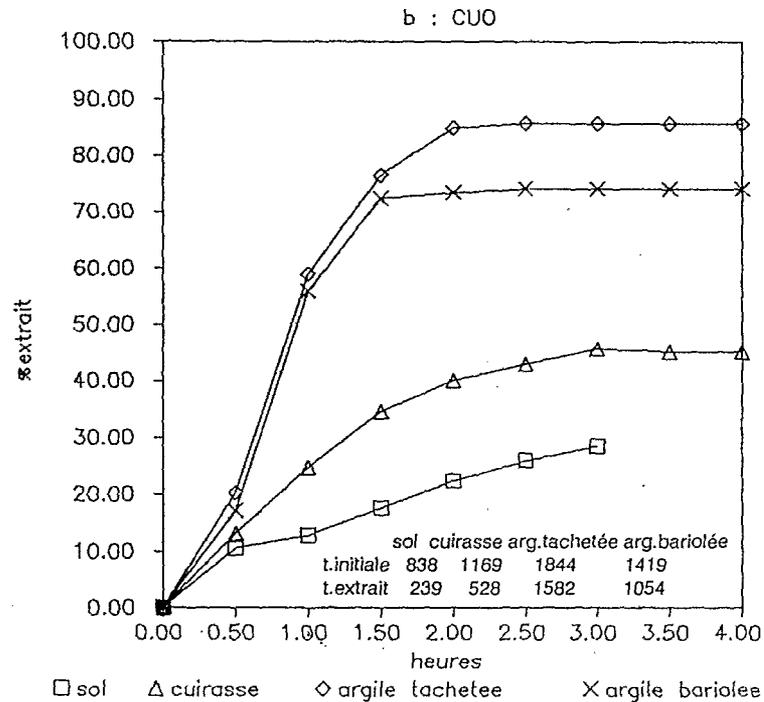
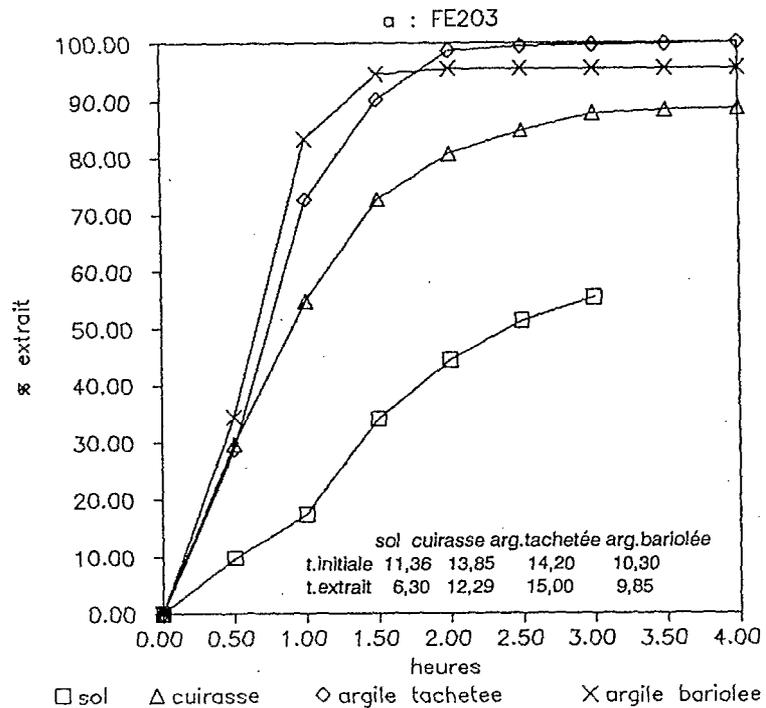


Figure 6 : Courbes cumulatives du $Fe_{2}O_{3}$ et du CuO extrait par le réactif oxalique sous U.V. 100 % = total de l'élément dans la fraction <math> < 2 \mu </math>.

Les analyses par résonnance paramagnétique électronique et microscopie électronique à transmission de fractions $< 2 \mu$ déferriées d'échantillons de cuirasse indiquent la présence de cuivre en position octaédrique dans le réseau des kaolinites (MOSSER *et al.*, 1990). Donc, dans la cuirasse, il semble qu'une partie du cuivre associé aux goethites soit libérée et intègre le réseau de kaolinites qui se forme dans cet horizon.

Salobo 3A

Seule la roche altérée cohérente à la base et surtout l'altérite à structure effacée au sommet du profil présentent des pertes en cuivre significatives par rapport à la roche-mère (Tableau 2 ci-dessous).

	1	2	3
Alt struc. effacée	0,35	<u>0,14</u>	<u>- 89,3</u>
Alt. friable	1,89	0,89	- 30,2
Alt. cohérente	1,71	1,06	- 16,3
R. alt. cohérente	0,96	<u>0,64</u>	<u>- 49,9</u>
Roche fraîche	1,27	1,27	

1 - teneur CuO en g %

2 - teneur CuO en g pour 100 g de roche fraîche

3 - pourcentage de perte par rapport à la roche fraîche

Les valeurs des colonnes 2 et 3 sont calculées à volume constant sauf pour l'altérite à structure effacée où l'aluminium est supposé constant entre cet horizon et l'altérite friable.

Les rares minéraux spécifiques du cuivre (malachite, cuprite), présents dans les horizons à structures conservées, ne peuvent pas expliquer des teneurs en cuivre comparables à celles de la roche fraîche.

Au sommet de la roche fraîche et dans l'horizon de transition, des sulfures de cémentation (covellite, chalcocite, digénite) sont identifiés comme produits de transformation de la chalcopirite et de la bornite. Ce dernier minéral dont la proportion augmente vers le sommet de la roche fraîche pourrait également être en partie d'origine supergène. On note à ce niveau la présence sporadique de malachite dans les fissures.

Dans les horizons sus-jacents, les minéraux spécifiques du cuivre ont disparu et quatre phases porteuses de cuivre sont identifiées (TOLEDGROKE *et al.*, 1985) (tableau 3).

Tableau 3 : Minéraux supergènes de Salobo 3A.

	Goethite			Vermiculite			Smectite		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
A. str. effacée	42,2	0,8	64,2	2,9	6,7	35,8			
A. friable	24,8	1,8	23,0	20,7	6,7	70,9	7,8	1,5	6,1
A. cohérente	19,2	1,8	15,1	27,3	6,7	78,9	9,2	1,5	6,0
R. alt. cohé.	13,0	0,9	12,6	9,7	8,6	87,4			

1 : Pourcentage poids

2 : Teneur moyenne en CuO

3 : Pourcentage du cuivre de l'horizon

• Les oxydes de manganèse malgré leurs teneurs en CuO parfois élevées (3 à 25 %) restent une phase cuprifère accessoire.

• Les smectites qui présentent des teneurs moyennes d'environ 1,5 % en CuO, renferment 6 % du CuO de la saprolite.

• Les goethites dont les teneurs moyennes varient de 1 à 2 % en CuO, renferment 12 à 20 % du CuO des horizons à structures de roche mère conservées (saprolite et roche altérée cohérente) et 64 % de celui de l'altérite à structures effacées. On note que la goethite est beaucoup plus abondante dans ce site qu'à Chapada.

• Les interstratifiés biotite-vermiculite qui avec des teneurs moyennes en CuO de 6 à 8 % renferment 70 à 80 % du CuO des horizons à structures conservées et 35 % de celui de l'horizon à structures effacées. ILDEFONSE *et al.* (1986) montre que le cuivre est lié à la vermiculite en position interfoliaire, non échangeable, sous forme bivalente et en position hexacoordonnée.

Donc, le cuivre qui dans la roche-mère est principalement associé aux faciès à magnétites est redistribué dans les produits d'altération des différents faciès et en particulier dans ceux des faciès à biotites, les interstratifiés biotite-vermiculite. Ce faciès est considéré comme stérile dans la roche fraîche.

L'interstratifié fixe efficacement le cuivre puisque seule sa destruction dans l'altérite à structures effacées permet la libération et la lixiviation de cet élément. Dans la roche altérée cohérente, la faible proportion d'interstratifiés, alors que tous les sulfures sont altérés, entraîne une perte en cuivre, notamment par rapport aux deux horizons sus-jacents (tableau 2). Deux hypothèses peuvent être formulées :

• la roche altérée cohérente est soumise actuellement à une altération différente de celle qu'ont subi l'altérite cohérente et l'altérite friable. Dans ces deux horizons, l'interstratifié se serait formé en quantité suffisante, simultanément à la libération du cuivre des sulfures.

● le cuivre libéré de l'altérite à structures effacées par la lixiviation des goethites et l'altération de l'interstratifié en kaolinite s'accumule *per descensum* dans les horizons sous-jacents simultanément à la formation d'interstratifiés. Cette hypothèse est étayée par la présence, dans un horizon donné, de teneurs en CuO plus élevées à l'aval qu'à l'amont.

Santa Blandina

A Santa Blandina, l'altération des poches à sulfures va libérer d'importantes quantités de cuivre qui vont s'accumuler à la base du profil dans les différents faciès d'altération du skarn à grenats (tableau 4). Plusieurs cas vont alors se présenter (CREACH, 1988).

Tableau 4

Skarn à grenat			Sulfures massifs			
	1	2		1	2	3
Ens. IIb	23,07	13,8				
Ens. IIa	11,95	8,0				
Ens. Ib	5,00	10,8				
Ens. Ia	3,96	10,1	Chapeau de fer	37,37	24,26	39,0
R. fraîche	0	0	Poches sulfures	39,78	39,78	

1 - Teneur CuO en g %

2 - Teneur CuO pour 100 g de roche fraîche

3 - Pourcentage de gain

(Les valeurs des colonnes 2 et 3 sont calculées à volume constant)

Dans les fissures de la roche, alors qu'aucun minéral primaire n'est altéré, le cuivre libéré par l'altération des poches à sulfures, précipite sous forme de malachite.

Lors de l'altération du skarn, le quartz s'altère en premier, les concentrations en silice et en cuivre dans les solutions d'altération sont alors suffisamment élevées pour permettre la formation de chrysocolle qui épigénise le quartz.

Lorsque le grenat s'altère à son tour, l'aluminium et la silice ainsi libérés, plus le cuivre provenant de l'altération des sulfures permettent la formation de produits cuprifères d'aspect argilomorphe qui épigénisent les quartz et les grenats. Une étude cristallochimique de ces produits argilomorphes montre qu'ils sont constitués d'une phase argileuse, composée de smectite et d'interstratifiés smectite-kaolinite, qui s'associe intimement au chrysocolle (CREACH *et al.*, à paraître). Le chrysocolle est alors sous la forme de fines particules de taille inférieure à 0,5 μ .

En bordure du karst, la lixiviation s'intensifie, la phase argileuse est déstabilisée. Mais, l'apport de cuivre provenant de l'altération des phases cuprifères des horizons sus-jacents, permet la stabilité du chrysocolle qui se développe aux dépens des produits argilomorphes.

DISCUSSION

La fixation du cuivre dans les profils d'altération dépend :

- de la nature et de la quantité des phases supergènes qui se forment,
- de la nature des solutions d'altération, du pH, des concentrations en Cu, Si...

A Sta Blandina, l'altération des poches à sulfures massifs libère d'importantes quantités de cuivre et entraîne des concentrations élevées en Cu dans les solutions d'altération. D'autre part, la dissolution de la lentille de marbre favorise, dans les solutions d'altération, des pH peu acides (> 6). De tels pH favorisent l'immobilisation du cuivre sous forme de carbonates, de silicates ou d'oxydes (SERKIES *et al.*, 1966, WOODS et GARRELS, 1985, 1986). DECARREAU (1983) montre, lors d'expériences de synthèse de smectites cuprifères, que lorsque le rapport molaire $Cu/(Cu + Mg)$ est supérieur à 0,5 le cuivre précipite sous forme de chrysocolle et ne rentre plus dans la structure du phyllosilicate.

A la base du profil d'altération, dans les zones où le drainage est ralenti, les concentrations en cuivre et le pH sont suffisamment élevés pour que le cuivre s'associe à la silice, libérée par l'altération des quartz et des grenats. Il se forme du chrysocolle qui représente la principale phase cuprifère d'origine supergène.

Donc, dans ce contexte particulier, le cuivre s'accumule à la base du profil d'altération.

A l'opposé, la minéralisation de Chapada est disséminée à faibles teneurs en Cu, ce qui entraîne de faibles concentrations en Cu dans les solutions d'altération. Dans les horizons d'altération la goethite est la principale phase qui fixe le cuivre, la kaolinite n'apparaissant comme phase porteuse de cuivre que dans la cuirasse. La capacité de la goethite à fixer le cuivre est limitée, et elle est peu abondante puisqu'elle représente moins de 15 % de la cuirasse.

Donc, à Chapada le cuivre est lixivié, ce qui est le cas le plus fréquemment rencontré lors de l'altération latéritique.

A Salobo 3A, les plans de schistosité subverticaux perpendiculaires à la direction de la pente topographique tendent à freiner le drainage latéral. D'autre part, le colmatage de la porosité par les smectites d'une précédente phase d'altération (TOLEDO-GROKE, 1986, TOLEDO-GROKE *et al.*,

1990) accentue le confinement en ralentissant également le drainage vertical. Cette structure particulière et les teneurs en Cu de la roche fraîche plus élevées qu'à Chapada entraînent des concentrations en Cu plus élevées dans les solutions d'altération. Cependant elles restent plus faibles qu'à Sta Blandina, la formation de minéraux spécifiques du cuivre étant exceptionnelle. Cette structure et la minéralogie (abondance de biotite et de minéraux ferrifères) permet la formation d'importantes quantités de phases susceptibles de fixer le cuivre : les interstratifiés biotite-vermiculite et les goethites.

Donc, dans ce contexte, le cuivre est globalement retenu dans les horizons d'altérites à structures de roche mère conservées.

Ce gisement montre, qu'en milieu latéritique, dans un contexte structural et minéralogique particulier, les horizons d'altération représentent un minerai potentiel estimé à 10 millions de tonnes à 0,77 % en Cu. De telles concentrations ne sont donc pas le privilège des régions arides (nord du Chili) ou des milieux carbonatés (Congo, Zaïre, Sta Blandina).

Dans les matériaux de surface qui sont échantillonnés lors de prospections géochimiques, deux cas peuvent se présenter :

- A Sta Blandina, en milieu carbonaté, les teneurs en CuO des sols sont encore élevées (1 à 5 %). L'essentiel du cuivre est encore sous la forme de fines particules de chrysocolle ($< 0,5 \mu$) intimement associé aux minéraux argileux. Les fractions $< 2 \mu$ présentent des teneurs en CuO 3 à 4 fois supérieures à celles du sol total.

- A Chapada, comme à Salobo 3A, on confirme à la suite de nombreux auteurs (ZEEGERS et LEPRUN, 1979, SMITH et PERDIX, 1983, WILHELM *et al.*, 1978, WARNANT *et al.*, 1981) que les oxydes de fer et en particulier les goethites sont les phases qui conservent le mieux jusqu'à la surface la mémoire d'une éventuelle minéralisation cuprifère. En effet, l'association du cuivre avec les kaolinites à Chapada et avec les vermiculites à Salobo 3A semble être trop liée à des phénomènes locaux où ces phyllosilicates doivent se former simultanément à la libération du cuivre de sa phase porteuse pour être utilisée comme guide de prospection.

REMERCIEMENTS

Nous adressons nos remerciements aux compagnies DOCEGEO et Serrado Sul et à MM. D. Nahon, A. Decarreau et Almeida Prado qui, par leur aide matérielle et scientifique, ont permis la réalisation de ce travail.

BIBLIOGRAPHIE

BANKS N.G., 1974 - Distribution of copper in biotite and biotite alteration products in intrusive rocks near two Arizona porphyry copper deposits. Journ. Research US Geol. Survey, 2 : 2 : 195-211.

BASSET W.A., 1958 - Copper vermiculite from northern Rhodesia. The American Mineralogist, 4 : 1112-1133.

CHAFFE M.A., 1975 - Geology and Resources of copper deposits. Geochemical exploration technique applicable in the search for copper deposits. Professional paper, Geological Survey, USA, 907-B.

CREACH M., 1988 - Accumulation supergène de cuivre en milieu latéritique : étude pétrologique, cristallographique et géochimique de l'altération du skarn de Santa Blandina (Itapeva, Brésil). Thèse, université Poitiers : 128 p.

CREACH M., DECARREAU A., NAHON D., à paraître - Copper distribution in silicated weathering products of Santa Blandina skarn (Itapeva, Brazil). Clays and Clay Minerals, soumis.

DAVY R., 1979 - A study of laterite profile in relation to bed rock in the Darling Range near Perth. W.A. Geological survey of western Australia, Report 8.

DECARREAU A., 1983 - Etude expérimentale de la cristallisation des smectites. Mesures des coefficients de partage smectite trioctaédrique solution aqueuse pour les métaux M^{2+} de la première série de transition. Sci. Geol. Mém., 74 : 185 p.

ENDREY A.S. de, 1963 - Estimation of free iron oxides in soils and clays by photolytic method. Clay Min. Bull., 29 : 209-217.

FARIAS N.F., SAUERESSIG R., 1982 - Jazida de cobre Salobo 3A. I simposio de Geologia da Amazonia : 39-45.

GASTUCHE Van OOSTERWYCK M.C., 1970 - La structure de la chrysocolle. C.R. Acad. Sci. Paris, 271 : 1837-1840.

GASTUCHE Van OOSTERWYCK M.C., 1977 - Sur les processus de silicification des calcaires dans le milieu supergène avec mention au processus de genèse des silicates de cuivre. Bull. Soc. belge de géologie, 86 : 67-90.

GOVETT G.J.S., 1987 - Exploration geochemistry in some low latitude areas. Problems and techniques. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Sect. B, Appl. Earth Sci., 96 : 97-116.

HARSH J.B., DONER H.E., 1984 - Specific adsorption of copper on a hydroxy-aluminium-montmorillonite complex. Soil Sc. Soc. Am. J., 48 : 1034-1039.

ILDEFONSE Ph., MANCEAU A., PROST D., TOLEDO-GROKE M.C., 1986 - Hydroxy-Cu vermiculite formed by the weathering of Fe-biotites at Salobo 3A, Carajás, Brazil. *Clays and Clay Min.*, 34 : 338-345.

KOUD J.M., 1985 - Pétrologie, minéralogie, métallogénie et géochimie des gîtes de cuivre de Niari au Congo. Thèse 3^e cycle, Strasbourg : 174 p.

LAVILLE-TIMSIT L., LELEU M., WILHELM E., 1976 - Note préliminaire sur le comportement des éléments Cu, Pb, Zn, Ag, Mn, As, Bi lors de l'altération supergène d'une minéralisation sulfurée. *Bull. Soc. Geol. Fr.*, XVIII, 1 : 101-105.

LEARNED R.E., CHAO T.T., SANZOLONE R.F., 1981 - The partitioning of copper among selected phases of geologic media of two porphyry copper districts, Puerto Rico. *J. Geochemical Exploration*, 15 : 563-581.

McBRIDE M.B., 1976 - Hydratation structure of exchangeable Cu²⁺ in vermiculite and smectite. *Clays and Clay Min.*, 24 : 211-212.

McLAREN R.G., WILLIAMS J.G., SWIFT R.S., 1983 - The adsorption of copper by soil samples from Scotland at low equilibrium solution concentrations. *Geoderma*, 31 : 97-106.

MOSSER C., MESTDAGH M., DECARREAU A., HERBILLON A., 1989 - Spectroscopic (ESR, EXAFS) evidence of Cu for (Al-Mg) substitution in octahedral layers of smectites. IX Int. Clay Conf., Strasbourg.

MOSSER C., PETIT S., PARISOT J.C., DECARREAU A., MESTDAGH M., 1990 - Evidence of Cu in octahedral layers of natural and synthetic kaolinite. IAGC, GWD 5-2, Aix-en-Provence : 4 p.

MOSSER C., ZEEGERS H., 1988 - The mineralogy and geochemistry of two copper-rich weathering profiles in Burkina-Faso, West Africa. *J. Geochemical Exploration*, 30 : 145-166.

NEWBERG D.W., 1967 - Geochemical implications of Chrysocolla bearing alluvial gravel. *Economic Geology*, 62 : 932-956.

NICKEL E.H., 1984 - The mineralogy and geochemistry of weathering profile of the tectonic bore Cu-Pb-Ag sulphide deposit. *J. Geochemical Exploration*, 22 : 239-264.

NOTEBAART C.W., 1978 - Cupriferous micas from the Chingola area. *Zambian copperbelt. Inst. Min. Metall. Trans.*, 87 : 74-78.

NOWLAN G.A., 1976 - Concretionary manganese-iron oxides in streams and their usefulness as a sample medium for geochemical prospecting. *J. Geochemical Exploration*, 6 : 193-210.

PARISOT J.C., 1989 - L'altération latéritique de protores cuprifères au Brésil. Thèse, université de Poitiers : 177 p.

PARISOT J.C., DELVIGNE J., GROKE M.C.T., 1983 - Petrological aspect of the supergene weathering of garnet in Serra dos Carajás (Pará, Brazil). *Sci. Geol., Mem* 72 : 141-148.

PARISOT J.C., SOUBIES F., AUDRY P., ESPOURTEILLE F., 1989 - Some implications of lateritic weathering on geochemical prospecting. Two Brazilian examples. *J. of Geochemical Exploration*, 32 : 133-147.

SERKIES J., LETOWSKI F., NIEMIEC J., 1966 - Application of the potential-pH diagrams to characteristics of some zechstein copper deposits. *Economic Geology*, 61 : 1266-1271.

SILLITOE L.G., CLARK A.H., 1969 - Copper iron sulfides as the initial products of supergene oxidation. *Amer. Miner.*, 54 : 1684-1700.

SMITH R.E., PERDRIX J.L., 1983 - Pisolithic laterite geochemistry in the golden grove massive sulphide district, Western Australia. *J. Geochemical Exploration*, 18 : 131-164.

THORNER M.R., 1979 - Supergene alteration of sulphides. V. Laboratory studies on the dispersion of Ni, Cu, Co and Fe. *Chemical Geology*, 26 : 135-149.

TOLEDO-GROKE M.C., 1986 - Intemperismo das rochas mineralizadas em cobre de Salobo 3A, Serra dos Carajás. Mecanismos de alteração dos minerais primários e localização do cobre nos produtos secundários. These Doutorado, Sao Paulo : 173 p.

TOLEDO-GROKE M.C., BOULANGE B., PARISOT J.C., MELFI A.J., 1990 - Altération des biotites dans les roches cuprifères de Salobo 3A, Serra dos Carajás (Brésil). I - Formation des phyllosilicates secondaires. *Géodynamique*, à paraître.

VEIGA M.M., SHORSHER H.D., 1982 - Caracterização tecnológica da relação cobre-óxidos hidratados de ferro no minério "oxidado" de cobre de Carajás, Marabá, PA, Brazil. I encontro do hemisfério Sul sobre a tecnologia mineral : 606-613.

WARNANT F., MARTIN H., HERBILLON A.J., 1981 - Kinetics of the selective extraction of iron oxides in geochemical samples. Association between Fe and Cu in acid brown soils. *J. Geochemical Exploration*, 15 : 635-644.

WILHELM E., LAVILLE-TIMSIT L., LELEU M., CACHA-HERREILLAT F., CAPDECOMME H., 1978 - Behaviour of base metals around ore deposits : application to geochemical prospecting in temperate climates. *Geoch. Explor., Proc. 7th Int. Geoch. Explor., Colorado* : 185-199.

WOODS T.L., GARRELS R.M., 1985 - Use of oxidized copper minerals as environmental indicators. *Applied Geochemistry*, 1 : 181-187.

WOODS T.L., GARRELS R.M., 1986 - Phase relations of some cupric hydroxy-minerals. *Economic Geology*, 81 : 1989-2007.

ZEEGERS H., LEPRUN J.C., 1979 - Evolution des concepts en altérogénologie tropicale et conséquences potentielles pour la prospection géochimique en Afrique occidentale soudano-sahélienne. *Bull. BRGM*, 2, 2 : 229-239.