

## UTILISATION DES MÉTHODES D'EXTRACTIONS CHIMIQUES SÉLECTIVES POUR LA PROSPECTION GÉOCHIMIQUE EN MILIEU LATÉRITIQUE

Francis SONDAG\*, Jean-Noël BOLLE\*, Salvator NDUWAYEZU\* et Henri MARTIN\*

RÉSUMÉ — L'étude par extractions chimiques sélectives d'échantillons latéritiques permet de montrer l'association de différents éléments en traces avec certaines phases porteuses préférentielles telles que la magnétite, l'hématite, la goéthite ou certains hydroxydes d'aluminium. Elle met également en correspondance l'évolution de la cristallinité de la goéthite dans les différents horizons d'un profil latéritique et le contenu en traces métalliques de ce minéral. Le respect de conditions cinétiques bien précises affine l'interprétation de données de prospection géochimique grâce à la prise en compte du type d'altération ayant affecté les horizons échantillonnés.

Géochimie, Prospection, Latérites, Extractions partielles

### Use of selective extraction methods for geochemical prospecting in lateritic areas

Selective extractions studies were performed on lateritic samples from Burundi using specific kinetic conditions. The procedure leads to the distinction between trace elements associated with various iron oxo-hydroxides (magnetite, hematite, goethite) or aluminium hydroxides. It is thus possible to take into account the weathering process for a more accurate interpretation of geochemical samples.

Geochemistry, Prospecting, Laterites, Partial extractions

## INTRODUCTION

L'étude des associations entre éléments dans les échantillons prélevés au cours de prospections géochimiques en contexte latéritique indique le plus souvent une liaison importante avec le fer. Cette association, tout à fait prévisible, est de peu d'utilité dans la détermination du rôle qu'ont individuellement les diverses phases constitutives des latérites dans la fixation des éléments traces.

Ce travail présente les résultats d'une étude par dissolution chimique sélective d'échantillons latéritiques ayant pour objectif une meilleure interprétation des données de prospection géochimique. Conjointement à des analyses par diffraction de rayons X, nous avons dans un premier temps tenté de définir la nature des différentes phases présentes dans les échantillons latéritiques par un contrôle rigoureux des conditions cinétiques de dissolution. L'extraction sélective de ces phases a permis par la suite de quantifier la répartition des éléments traces dans ces différents minéraux (KUHNEL *et al.*, 1978).

## I — DESCRIPTION DU PROFIL LATÉRITIQUE

Situé au Burundi dans le grand plateau central d'altitude comprise entre 1600 et 1700 m, le gisement de nickel latéritique de Musongati provient de l'altération d'un massif ultrabasique du Précambrien burundien (1350-2000 Ma). Ce gisement fut découvert en 1973 dans le cadre d'un programme gouvernemental appuyé par le

\* Laboratoires de Géologie Générale de l'Université de Louvain, Place Louis Pasteur 3, B - 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique.

PNUD. Il est évalué à 300 millions de tonnes de minerai avec une teneur moyennée de 1,5 % en nickel ; par endroit il est également minéralisé en cuivre et chrome.

Nous avons étudié les carottes provenant d'un forage (F 108) effectué pour évaluer les réserves du gisement. Les échantillons prélevés représentent une séquence d'altération latéritique complète depuis la roche-mère saine jusqu'au sol superficiel. L'ensemble d'altération est développé sur environ 70 m de profondeur et présente divers horizons caractéristiques des profils latéritiques développés sur roche ultrabasique (ORLOFF, 1968 ; TRESQUES, 1975). Il comporte de la base au sommet (fig. 1) :

Horizon	Prof. (m)	Description
VI	0	Terres rouges
	12	
V	13	Cuirasse démantelée
	20	
IV	21	Latérite rouge
	32	
III	33	Latérite jaune Saprolite fine
	63	
II	64	Saprolite grossière
	69	
I	70	Péridotite

Fig. 1 — Description du profil latéritique étudié.  
Description of the studied lateritic profile.

— la roche mère, une péridotite serpentinisée. Elle est constituée principalement de serpentine (65 %), de magnétite (15 %) et de minéraux carbonatés (10 %). Les minéraux accessoires sont le pyroxène et l'olivine, très altérés, ainsi que la chlorite. On y note également la présence de noyaux disséminés et altérés de chromite, chalcopyrite et pentlandite ;

— le niveau de saprolite grossière, développé sur environ 5 m. Cet horizon possède une granulométrie hétérogène. Il renferme de nombreux fragments millimétriques à centimétriques de roche encore cohérente à structure partiellement conservée. La matrice argileuse brunâtre enrobant les reliques de la roche devient de plus en plus abondante vers le sommet du niveau et devient violacée avec des taches verdâtres ;

— le passage de la saprolite grossière à la latérite jaune ou saprolite fine, se fait sur environ 2 m. Il est marqué par une modification progressive de la couleur et de la granulométrie des échantillons. La couleur dominante de la saprolite fine est l'ocre avec des nuances beiges, jaunes et violettes. Ce niveau a une granulométrie très fine, ce qui lui confère une certaine plasticité. Il est développé sur environ 30 m et sa densité est inférieure à celle du niveau sous-jacent. Localement, la structure initiale de la roche est encore reconnaissable. On notera cependant que les 6 m supérieurs, de couleur foncée, violacée, ont une densité supérieure ;

— le niveau de latérite rouge d'environ 10 m d'épaisseur. Sa couleur est brun-rouge et sa granulométrie est très hétérogène. La fraction grossière est constituée de concrétions ferrugineuses dispersées dans une matrice de consistance terreuse. Toutes les structures de la roche sont effacées ;

— la cuirasse, complètement démantelée. Ce niveau d'une puissance de 7 m est constitué de morceaux arrondis centimétriques très durs et d'une matrice argileuse jaunâtre. Les fragments durs ont une structure scoriacée, alvéolaire de teinte sombre enrobant des zones plus claires de teinte rouge et jaune ;

— le niveau dénommé « terres rouges » qui se distingue du niveau sous-jacent par sa couleur homogène violacée, sa consistance terreuse et sa granulométrie beaucoup plus fine. D'une puissance de 9 m, ce niveau comporte à sa base un gravillon pisolitique et au sommet un sol latéritique.

## II — MINÉRALOGIE

Au point de vue minéralogique (tabl. I), les terres rouges sont caractérisées par la présence dominante d'hématite. La goéthite est pratiquement absente dans ce niveau ; elle n'apparaît qu'à partir de 8 m de profondeur et devient progressivement prépondérante par rapport à l'hématite. L'hématite est de moins en moins abondante dans la cuirasse dégradée et disparaît au-delà de 40 m environ. On notera aussi la présence de magnétite dans plusieurs échantillons, particulièrement entre 30 et 40 m. Les hydroxydes d'aluminium (gibbsite) ne s'observent que dans les dix premiers mètres, exception faite de quelques traces à la base de la latérite jaune. La kaolinite se retrouve dans tout le sondage jusqu'à environ 60 m, profondeur à partir de laquelle on observe la présence de smectite, garniérite (série kérolite/pimélite), chlorite et serpentine.

Tableau I  
Espèces minérales présentes dans les différents horizons du profil d'altération  
Mineral species in the various horizons of the weathering profile

Horizon	Ech.	GO	HE	MT	KA	GI	OZ	AN	MC	GA	CH	SM	SP
VI	0	(+)	++	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-
	2	(+)	++	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-
	8	+	++	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-
	10	+	+	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-
V	15	++	+	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-
	20	++	+	+	+	-	+	-	+	-	-	-	-
IV	26	++	+	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-
	29	++	+	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-
	31	++	+	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-
III	33	+	+	+	+	-	+	-	+	-	-	-	-
	36	+	+	+	+	-	+	-	-	-	-	-	-
	38	+	+	+	+	-	+	-	-	-	-	-	-
	40	++	(+)	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-
	57	+	-	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-
	61	+	-	(+)	+	+	+	+	-	-	+	+	(+)
63	+	(+)	+	-	-	+	-	-	+	+	+	+	
II	65	+	+	+	-	-	+	-	-	+	+	+	+

GO: Goéthite HE: Hématite MT: Magnétite KA: Kaolinite GI: Gibbsite OZ: Quartz  
AN: Anatase MC: Mica GA: Garniérite CH: Chlorite SM: Smectite SP: Serpentine  
++: abondant +: présent (+): rare -: absent

## III — RÉSULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES

Les échantillons ont été préalablement broyés dans une jarre à anneaux en carbure de tungstène, de manière à leur assurer une granulométrie inférieure à 40  $\mu\text{m}$ . Ils ont ensuite été soumis à une décomposition acide totale et à l'extraction chimique sélective séquentielle.

### 1. Analyse totale

L'évolution des teneurs en Fe et Al (fig. 2) dans la moitié supérieure du sondage est similaire à celle décrite par NAHON *et al.* (1982) pour le plateau de Sipilou en Côte-d'Ivoire. Elle montre une diminution de Al avec une augmentation corrélative de Fe depuis la surface jusqu'à la profondeur de 40 m, base du sous-niveau violacé dense de la saprolite fine. Dans le cas de Al, cette observation peut être aisément mise en rapport avec la disparition progressive de la gibbsite avec la profondeur (tabl. I). La plus grande concentration en Al retrouvée à la profondeur de 60 m est probablement liée à un accroissement marqué de la proportion des minéraux argileux (kaolinite d'abord, smectite ensuite) par rapport à celle des oxydes de Fe.

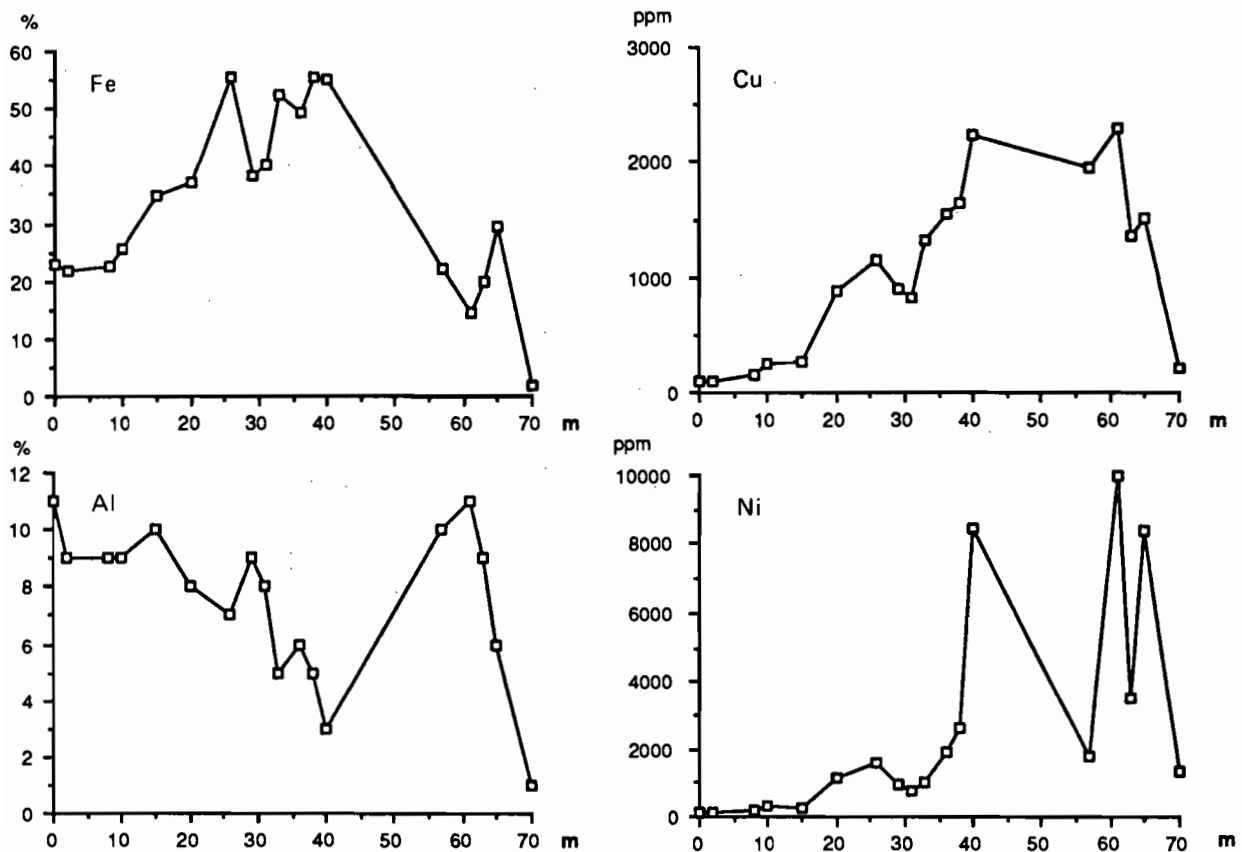


Fig. 2 — Teneurs en Fe, Al, Cu et Ni dans les différents horizons.  
Distribution of Fe, Al, Cu and Ni along the lateritic profile.

Depuis le sommet du profil jusqu'à 40 m, l'évolution des teneurs en Cu et Ni (fig. 2) est similaire. De l'ordre de 100 ppm en surface, ces teneurs atteignent respectivement 2000 et 8000 ppm pour Cu et Ni. Elles s'accroissent régulièrement pour Cu et montrent une augmentation plus marquée dans le cas de Ni à proximité du sommet de la saprolite fine. Les teneurs en Cu diminuent ensuite régulièrement dans la saprolite grossière jusqu'à la roche mère. Les variations des teneurs en Ni sont beaucoup plus irrégulières.

Au sein du profil latéritique, le contenu en éléments en traces de la latérite jaune reflète le mieux les minéralisations en Cu et Ni de la roche sous-jacente. Ce type de profil a été observé à plusieurs reprises (ZEEGERS et LEPRUN, 1979). Ces observations mettent bien en évidence la difficulté de la prospection géochimique en milieu latéritique.

## 2. Extraction chimique sélective séquentielle

### a) Caractéristiques de la séquence d'extraction

La séquence d'extractions utilisée comprend différents réactifs d'agressivité croissante susceptibles de mettre en solution des phases minérales de plus en plus résistantes (SONDAG, 1981). Ces réactifs sont présentés dans le tableau II en regard des principales phases minérales dissoutes. Les conditions opératoires propres à l'utilisation de chacun d'entre eux ( $t^\circ$ , rapport solide/solution, temps de contact, nombre d'étapes d'extraction) complètent ce tableau. Le réactif renouvelé après chaque étape d'extraction est ajouté au culot solide de l'étape précédente. Un contrôle cinétique des conditions opératoires permet d'assurer pour chacun des réactifs une sélectivité opérationnelle à l'égard des diverses phases minérales dissoutes.

Tableau II  
Réactifs utilisés en extractions sélectives, phases minérales dissoutes et conditions opératoires  
Reagents used for selective extraction, with regard to dissolved species, time and temperature

	Réactif	Phases dissoutes	Temps	Température	Ech./Solution
1	Acétate d'ammonium pH 4,5	Ions solubles et échangeables	3 X 20'	20°C	1g./10ml
2	Chlorhydrate d' hydroxylamine pH 4,5	Oxydes de manganèse	3 X 20'	20°C	1g./10ml
3	Oxalate d'ammonium pH 3,3 dans l'obscurité	Oxy-hydroxydes de Fe amorphes, (magnétite)	2, 2, 4 & 8 h.	20°C	1g./20ml
4	Oxalate d'ammonium pH 3,3 sous U.V.	Magnétite, hématite goethite	de 6 à 10 étapes de 2 heures	60°C	1g./20ml
5	HNO <sub>3</sub> -HCl-HF	Argiles, minéraux résistants	-	120°C	1g./25ml

Les résultats de ces analyses sont présentés sous deux formes différentes (fig. 3 a et b, fig. 4 a et b) : la première rapporte les teneurs absolues cumulées extraites par les différents réactifs de la séquence, la seconde représente les mêmes teneurs exprimées en valeur relative par rapport au contenu total de chaque échantillon.

L'acétate d'ammonium utilisé pour la dissolution des minéraux secondaires et la mise en solution des ions échangeables joue un rôle particulièrement limité dans le cas présent ; les teneurs extraites peu significatives ne sont pas reprises dans ces figures.

Par ailleurs, on note que le réactif de Tamm sous U.V. et l'attaque acide du résidu ont parmi les réactifs de la séquence la plus grande efficacité dans l'extraction de Fe. Seul le comportement du Tamm sous U.V. à l'égard des phases ferrifères sera envisagé par la suite.

### b) Dissolution hématite - goethite

Il est à première vue surprenant de constater que dans les échantillons de la cuirasse, constitués en grande partie de goethite, le fer est extrait en faibles quantités par le réactif de Tamm sous U.V. (fig. 3). Par contre, les échantillons plus superficiels, contenant davantage d'hématite, montrent une teneur relative en Fe extrait de l'ordre de 60 %. Ces observations suggèrent que, dans les conditions cinétiques suivies lors de l'utilisation du Tamm sous U.V., le réactif dissout entièrement l'hématite sans attaquer la goethite. Dans la logique séquentielle, la mise en solution de ce dernier minéral est reportée à l'étape suivante.

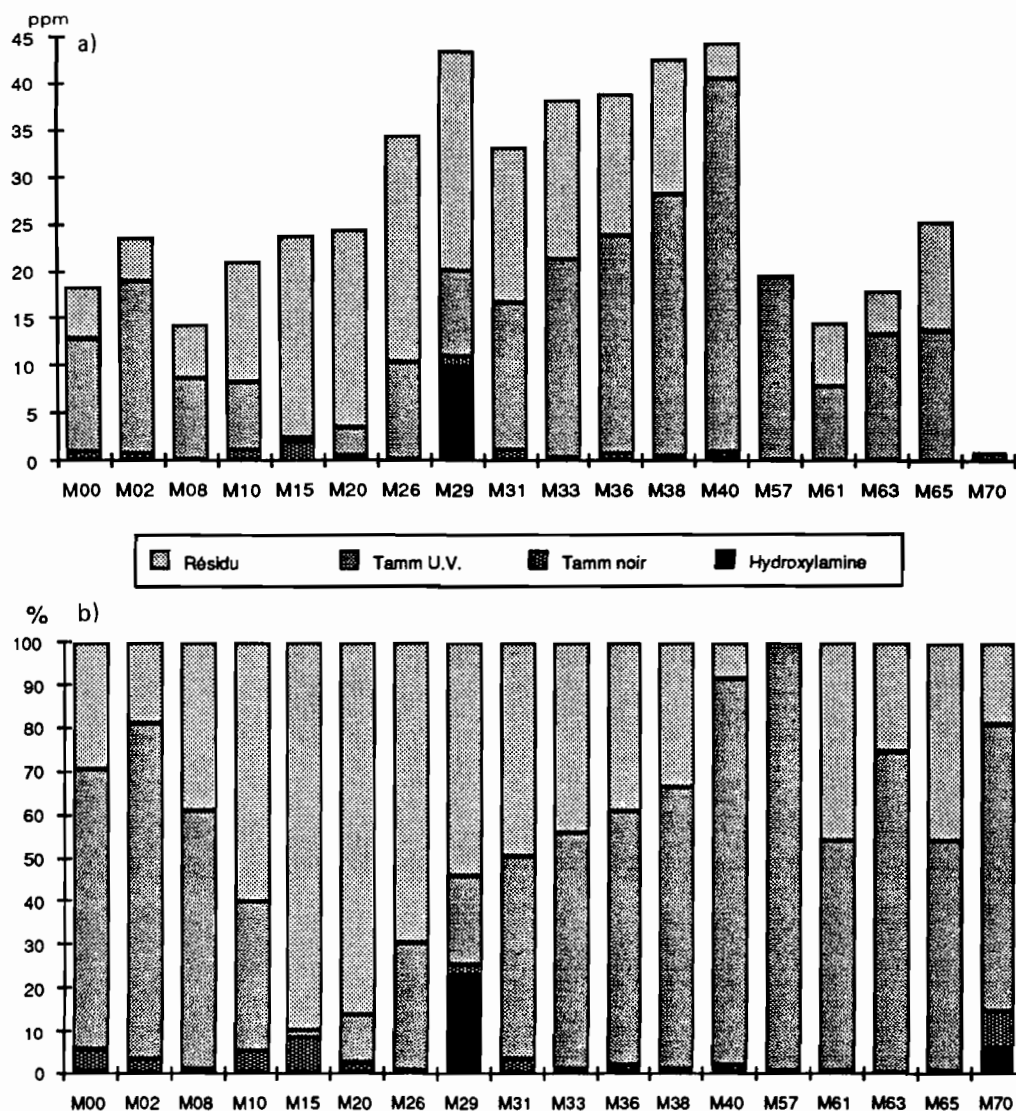


Fig. 3 — Fe extrait par les différents réactifs (a : teneurs absolues ; b : teneurs relatives).  
Fe extracted in each reagent (a : absolute value ; b : relative value).

L'augmentation de la proportion de Fe extraite depuis la base de la cuirasse jusqu'à la base de la saprolite fine est corrélative d'une diminution progressive de la cristallinité de la goethite avec la profondeur. Cet élargissement est bien visible sur la figure 5 qui montre l'allure du pic à 4,2 Å de la goethite entre la surface et environ 40 m de profondeur. Une plus faible cristallinité détermine donc une dissolution plus importante de la goethite par le réactif de Tamm sous U.V. Ainsi que l'a suggéré NALOVIC (1977), il est probable que les teneurs élevées en éléments traces (Ni et Cu principalement) observées dans ce niveau gênent la cristallisation de la goethite qui reste ainsi à l'état cryptocristallin (50 Å). Le diagramme des extractions relatives du Cu (fig. 4) montre également une augmentation sensible des teneurs extraites sous U.V. entre les mêmes niveaux.

Ces observations caractérisent au sein du profil latéritique une évolution des phases ferrifères débutant en surface par l'hématite pauvre en Cu à laquelle succèdent en profondeur des goethites associées à des quantités croissantes de Cu et Ni. Elles confirment les données de BESSET et COUDRAY (1978) suivant lesquelles la structure de l'hématite est moins apte à l'incorporation de Ni que celle de la goethite. Les goethites étant de moins en moins cristallisées en profondeur, il en résulte une extraction de plus en plus aisée de ces éléments par le réactif de Tamm sous U.V.

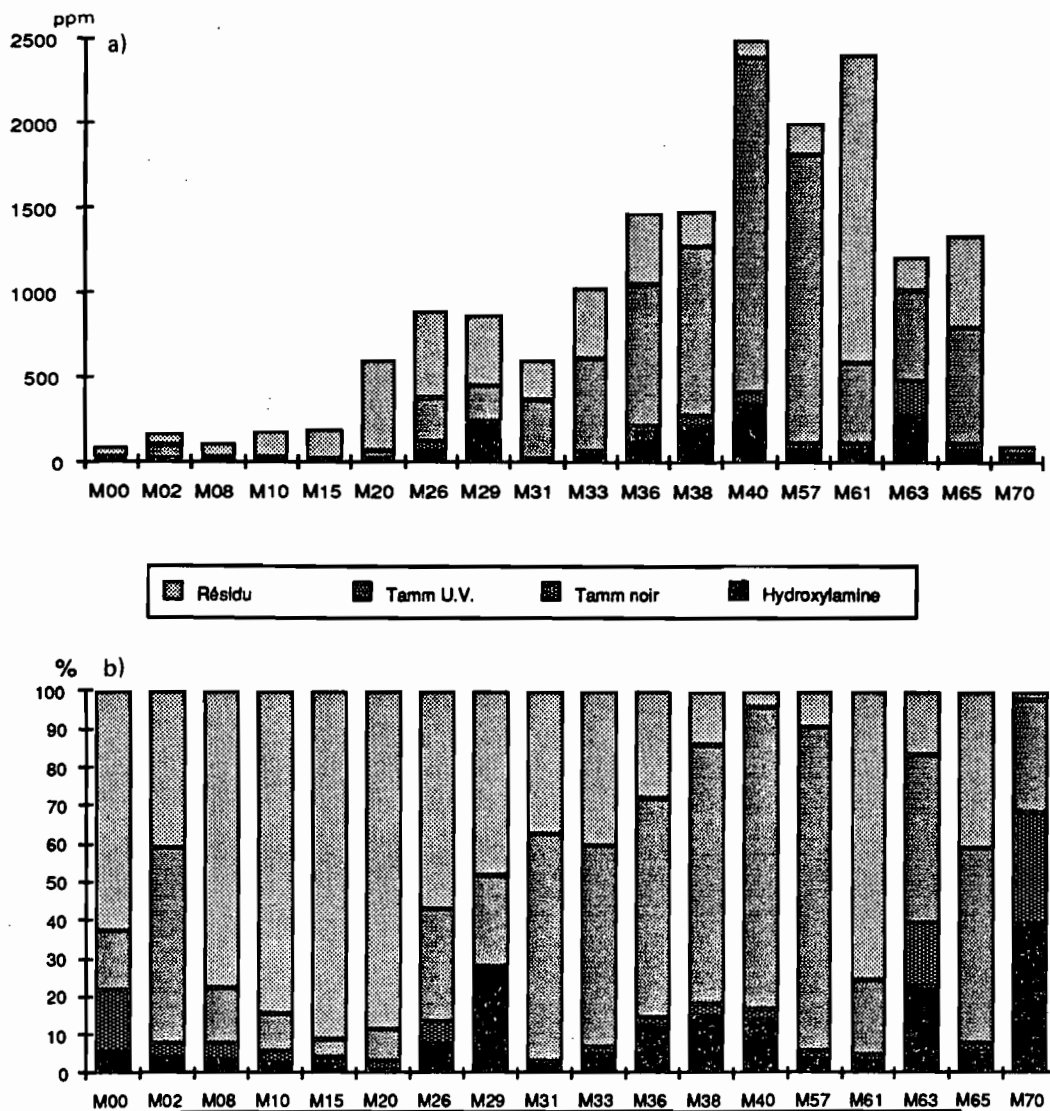


Fig. 4 — Cu extrait par les différents réactifs (a : teneurs absolues ; b : teneurs relatives).  
Cu extracted in each reagent (a : absolute value ; b : relative value).

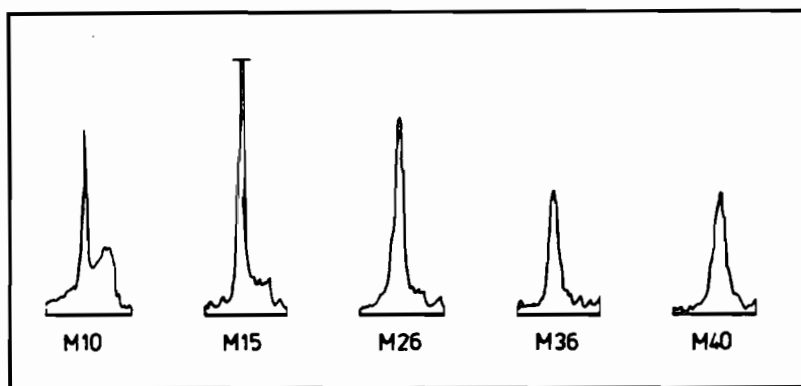
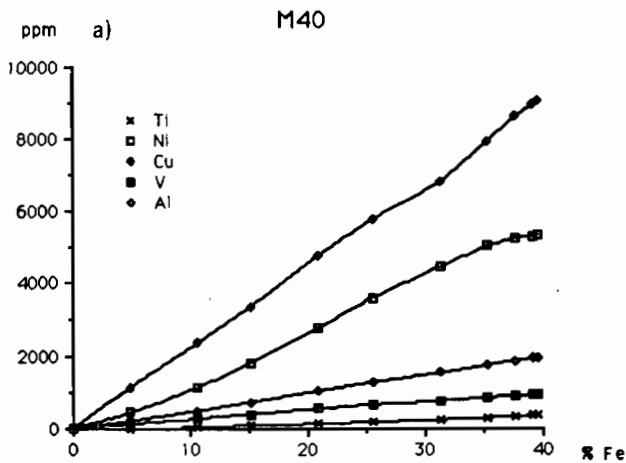
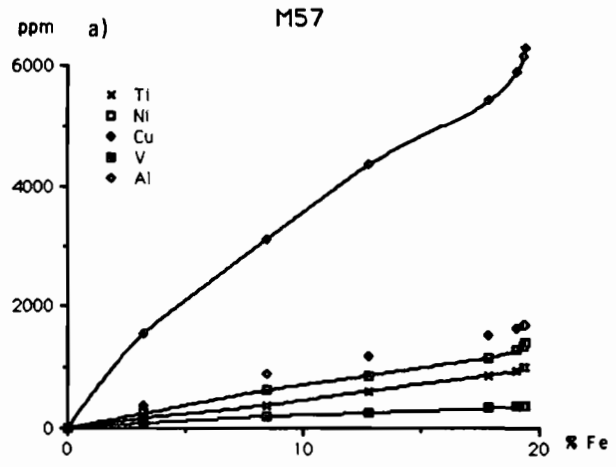
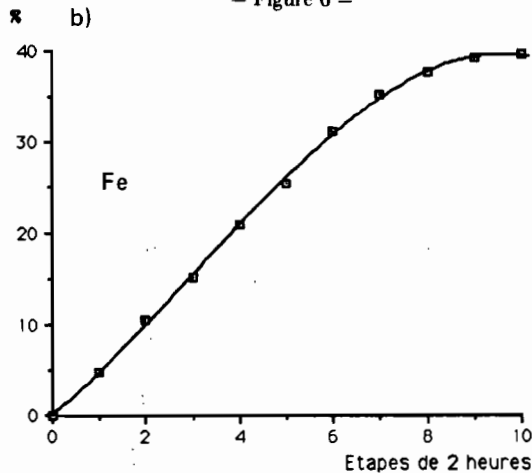


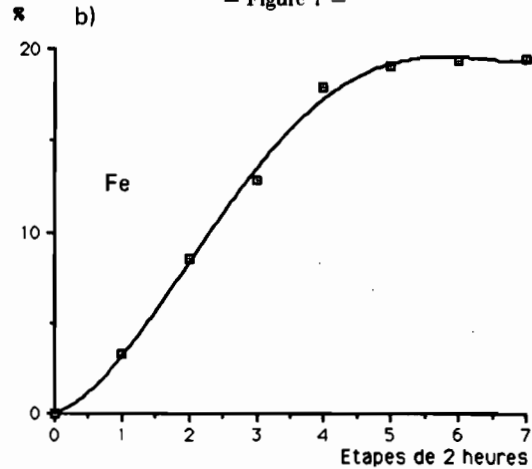
Fig. 5 — Evolution du pic à 4,2 Å de la goéthite avec la profondeur.  
Variation of the goethite 4.2 Å peak with regard to depth.



- Figure 6 -



- Figure 7 -



— Figures 6 à 9 —

a) : régression des teneurs cumulées de Fe extraites dans le réactif de Tamm sous U.V. avec différents éléments. Les différents points représentent les étapes successives de la cinétique adoptée ;  
b) : cinétique d'extraction de Fe dans le même réactif.

M40, M57, M38 : échantillons de saprolite fine ; M00 : échantillon de terres rouges.

### c) Dissolution des phases minérales

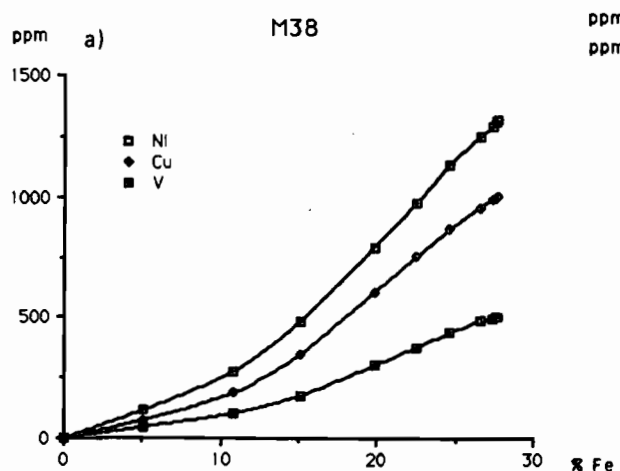
La méthode d'approche utilisée afin d'étudier la nature et le comportement des phases minérales dissoutes par le Tamm sous U.V. est l'établissement de diagrammes de dispersion et de courbes cinétiques cumulées de dissolution sur les teneurs obtenues au cours de l'extraction par ce réactif (fig. 6 à 9).

L'atteinte d'un palier sur une courbe cinétique d'extraction permet d'une part de déterminer le temps optimal d'extraction et de s'assurer de la dissolution complète de la ou des phases minérales que le réactif est susceptible de mettre en solution. La durée de l'extraction dans le Tamm sous U.V. est dès lors variable suivant la nature de l'échantillon dissous (fig. 6 b, 7 b, 8 b et 9 b).

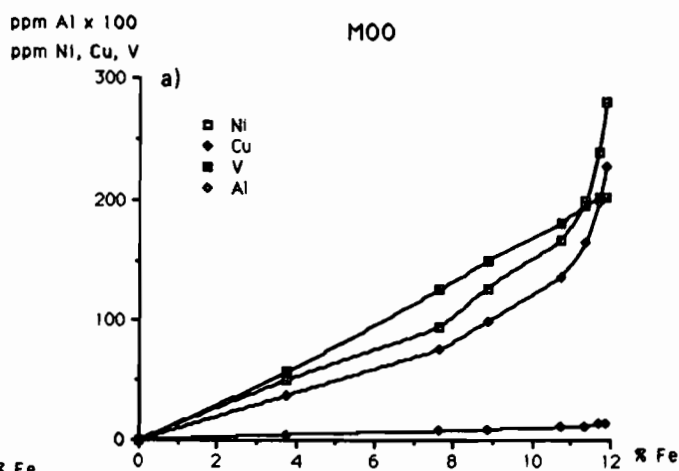
Dans les diagrammes de dispersion (fig. 6 a, 7 a, 8 a et 9 a) l'interpolation entre les teneurs obtenues au cours de l'extraction en mode cinétique par le Tamm sous U.V. permet de visualiser leur évolution en fonction de Fe et de vérifier l'existence de une ou plusieurs phases dans un même échantillon.

Ainsi, pour l'échantillon M40 (fig. 6 a) prélevé dans la latérite jaune, la linéarité des interpolations établies entre Fe et différents éléments durant toute la durée de l'extraction démontre la mise en solution d'une seule et même phase minérale ferrifère : la goethite au sein de laquelle la répartition des éléments traces est homogène. Ceci suggère la substitution de l'élément considéré dans le minéral-hôte (la goethite dans ce cas) et non une

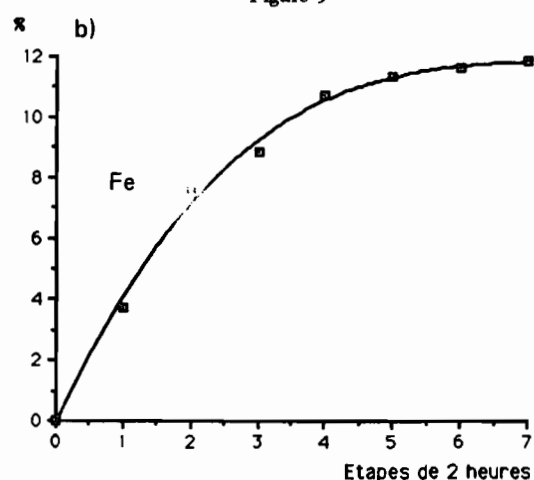
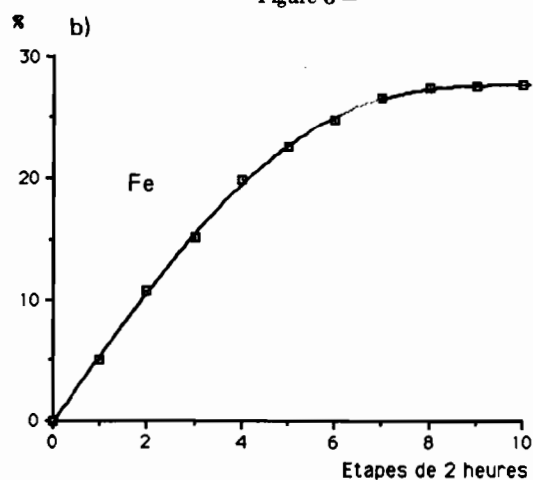




- Figure 8 -



- Figure 9 -



- Figures 6 to 9 -

a) : regression of cumulative Fe values extracted in U.V.-Tamm with different elements ;  
 b) : kinetic of Fe extraction in the same reagent.

Samples M40, M57, M38 : fine-grained saprolite ; sample M00 : granular red laterite (ironshot soil).

fixation sur la surface cristalline (SCHELLMANN, 1978). Cette observation démontre que la kaolinite que contient par ailleurs l'échantillon n'est pas dissoute.

En plus de la goéthite et de la kaolinite, l'échantillon M57 (fig. 7 a) prélevé à la base de la saprolite fine contient de la gibbsite. L'extraction non linéaire de Al par rapport au Fe est remarquable. Cela démontre que la gibbsite est au moins partiellement attaquée par le réactif. Cette attaque est probablement rendue possible par l'élévation de la température dans les tubes de réaction sous rayonnement U.V. (60 °C en fin d'extraction).

L'échantillon du niveau sommital violacé de la saprolite fine M38 contient notamment de la magnétite. La mise en solution de ce minéral dès le début de l'attaque sous U.V. est marquée dans le diagramme de dispersion des teneurs (fig. 8 a) par des segments rectilignes à pente faible pour les différents éléments. Dans la suite de la réaction, une modification importante de la pente des droites suggère la dissolution d'autres phases minérales présentes dans l'échantillon. La prolongation de ces droites vers l'abscisse permet de déterminer la quantité de Fe liée à la magnétite dans l'échantillon, à savoir environ 8 %.

Au sommet du sondage (échantillon M00, fig. 9 a), une relation linéaire très nette entre Fe et V est observable. Pour Al et Ni, la relation avec Fe se traduit par des courbes très similaires. Cette observation résulte de la présence d'hydroxydes de Al, confirmée par diffraction des rayons X, auxquels Ni semble associé préférentiellement dans cet horizon.

## CONCLUSIONS

L'application des méthodes de dissolution chimique sélective a permis de montrer :

(1) que l'utilisation de l'oxalate d'ammonium sous U.V. dans des conditions opératoires rigoureusement contrôlées permet de définir le rôle des principales phases minéralogiques dans la fixation des métaux libérés au cours de l'altération en milieu latéritique. « L'interprétation cinétique est indispensable pour renseigner sur la nature entre les produits constituant un échantillon ... » (JEANROY, 1983) et permet dans le cas présent de distinguer entre eux des minéraux tels que la magnétite, l'hématite, la goethite, les hydroxydes d'aluminium et préciser la proportion des différents métaux associés ;

(2) en ce qui concerne la goethite, il est en plus possible de suivre l'évolution de sa cristallinité tout au long du profil d'altération et de montrer la relation entre certains métaux, tel le cuivre, et l'état de cristallinité de la goethite ;

(3) au point de vue de la prospection géochimique, ainsi que le préconisent WILHELM *et al.* (1985), il importe de « replacer un échantillon dans un contexte altérologique précis [...] et d'apprécier l'impact de cet environnement sur les contenus en traces métalliques ». Les techniques d'extractions chimiques sélectives offrent la possibilité de distinguer les métaux liés aux différents oxydes-hydroxydes de Fe et Al. On aboutit ainsi à une interprétation plus nuancée de la distribution des métaux grâce à la normalisation des teneurs observées par rapport au type d'altération ayant affecté les horizons échantillonnés.

*Manuscrit déposé le 4 septembre 1987 ; accepté le 13 avril 1988*

---

## BIBLIOGRAPHIE

- BESSET F. et COUDRAY J. (1978) — Le comportement du nickel dans les processus d'altération des péridotites de Nouvelle-Calédonie. *Bull. Bur. Rech. géol. min.*, (II), 3, p. 207-223.
- JEANROY E. (1983) — Diagnostic des formes du fer dans les pédogenèses tempérées. Evaluation par les réactifs chimiques d'extraction et apport de la spectrométrie Mössbauer. Thèse Univ. Nancy I, 168 p.
- KUHNEL R.A., ROORDA H.J. et STEENSMA J.J.S. (1978) — Distribution and partitioning of elements in nickeliferous laterites. *Bull. Bur. Rech. géol. min.*, (II), 3, p. 191-206.
- NAHON D., PAQUET H. et DELVIGNE J. (1982) — Lateritic weathering of ultramafic rocks and the concentration of nickel in the western Ivory Coast. *Econ. Geol.*, 77, p. 1159-1175.
- NALOVIC L. (1977) — Recherches géochimiques sur les éléments de transition dans les sols. *Trav. et Doc. ORSTOM*, 66, 235 p.
- ORLOFF O. (1968) — Etude géologique et géomorphologique des massifs d'ultrabasites compris entre Houailou et Canala. Thèse Sci., CERGA-Montpellier, 189 p.
- SHELLMANN W. (1978) — Behaviour of nickel, cobalt and chromium in ferruginous lateritic nickel ores. *Bull. Bur. Rech. géol. min.*, (II), 3, p. 275-282.
- SONDAG F. (1981) — Selective extractions procedures applied to geochemical prospecting in an area contaminated by old mine workings. *J. Geochem. Explor.*, 15, p. 645-652.
- TRESCASES J.J. (1975) — L'évolution géochimique supergène des roches ultrabasiques en zone tropicale. Formation des gisements nickélifères de Nouvelle-Calédonie. *Mém. ORSTOM*, 78, 259 p.
- WILHELM E., ZEEGERS H. et AMBROSI J.P. (1985) — Cuirasses latéritiques et prospection minière. *Acad. roy. Sci. Outre-Mer*, 8, p. 111-126.
- ZEEGERS H. et LEPRUN J.C. (1979) — Evolution des concepts en altérologie tropicale et conséquences potentielles pour la prospection géochimique en Afrique soudano-sahélienne. *Bull. Bur. Rech. géol. min.*, (II), 2-3, p. 229-239.