

LES « LATÉRITES » NICKÉLIFÈRES DU BRÉSIL (1)

Adolpho José MELFI*

Jean-Jacques TRESCASES**

Sonia Maria BARROS DE OLIVEIRA***

* Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo-Brésil.

** O.R.S.T.O.M., Paris-France|Universidade de São-Paulo.

*** Instituto de Geociências-USP e Bolsista do CNPq.

RÉSUMÉ

Les premiers gisements de nickel du Brésil ont été découverts il y a un siècle. L'essentiel des réserves, mises depuis en évidence, est du type latéritique, produit de l'altération météorique de roches ultramafiques. Les gisements se rencontrent entre 8° et 25° de latitude sud, mais l'État de Goiás, au centre du Brésil, renferme la majorité des réserves.

Les massifs ultramafiques brésiliens peuvent être attribués à au moins 3 cycles orogéniques : Pré-Cambrien inférieur, Pré-Cambrien supérieur, et Crétacé. Toutes ces roches ultramafiques sont, au moins en partie, serpentinisées. Il existe en outre quelques autres massifs précambriens, d'âge indéterminé, minéralisés en nickel : *Americano do Brasil* et *Sanclerlândia (GO)* ; *Carajás (PA)*.

Les gisements de nickel du Brésil se situent dans des conditions morpho-climatiques variées. Leur formation peut être mise en corrélation avec le cycle d'aplanissement Sud-Américain (Tertiaire inférieur). Les couvertures d'altération développées sur la surface sud-américaine sont latéritiques, et présentent une concentration résiduelle de fer, mais montrent aussi sur les roches ultrabasiques des accumulations siliceuses du type *silcrete*.

Ce *silcrete*, en général de faciès « *boxwork* », s'est formé à la base des profils d'altération du Tertiaire, et a été découvert par l'érosion au cours du cycle « *Velhas* » (Tertiaire supérieur). Un nouveau profil, latéritique ou saprolitique, s'est alors développé sous le *silcrete*. L'altération a en même temps joué son rôle sur les versants, et surtout sur les nouvelles zones basses. Tous ces nouveaux profils sont contrôlés par des conditions climatiques proches des conditions actuelles : ainsi des latérites ferrugineuses se forment-elles dans le Brésil central, humide, alors que les saprolites silico-ferrugineuses sont caractéristiques du nord-est, aride.

Les réserves de minerai de nickel (4.10⁶ tonnes de Ni contenu en 1975), placent le Brésil au 7^e rang mondial.

Les principales caractéristiques de ces gisements sont :

- stade initial d'altération latéritique au Tertiaire supérieur ;
- silicifications importantes liées à ce cycle ;
- large prédominance du minerai silicaté sur le minerai oxydé, à la suite de l'évolution tecto-morpho-climatique post-tertiaire.

Les gisements de nickel du Brésil diffèrent de ce fait de la plupart des autres gisements latéritiques du monde.

MOTS-CLÉS : Brésil. Nickel. Latérites. Altération météorique. Roches ultrabasiques. Géomorphologie. *Silcrete*. Minéralogie. Géochimie.

(1) Ce travail a été présenté lors du séminaire international sur les mécanismes de latéritisation (P.I.C.G., Projet 129) tenu à Trivandrum (Indes) du 11 au 14 décembre 1979.

RESUMO

AS « LATERITAS » NIQUELÍFERAS DO BRASIL

São conhecidos depósitos de níquel lateríticos no Brasil há aproximadamente um século. Esses minérios são sempre produto de alteração laterítica de rochas ultramáficas. Ocorrem entre 8 e 25° de latitude S, principalmente concentradas no estado de Goiás, no Brasil central.

Os maciços ultramáficos brasileiros podem ser relacionados a pelo menos 3 ciclos orogênicos : Pré-Cambriano inferior, Pré-Cambriano Superior e Cretáceo. São todos parcial ou completamente serpentinizados. Há outros pequenos maciços pré-cambrianos de idade mal estabelecida, mineralizados em Ni : Americano do Brasil, GO ; Sanclerlândia, GO ; Carajás, PA.

Os depósitos niquelíferos brasileiros ocorrem em condições variadas de relevo e clima. Sua formação pode ser relacionada ao ciclo erosivo Sul-Americano do início do Terciário. Os produtos de intemperismo deste ciclo são lateríticos com concentração residual de ferro, mas apresentam acumulação de sílica (quartzo, calcadona) como silcretes sobre as rochas ultramáficas.

Este silcrete, geralmente tipo « boxwork », formou-se aparentemente na base dos perfis terciários e foi exposto pela erosão durante o ciclo Velhas (Terciário superior). Um novo perfil, laterítico ou saprolítico, desenvolveu-se por debaixo do silcrete. As encostas e especialmente as planícies então formadas sofreram intemperismo sob condições climáticas mais recentes, formando lateritas no Brasil central úmido e saprolitas no nordeste árido.

As reservas estimadas de minério de níquel (4.10⁶ ton. Ni, 1975) colocam o Brasil na 7ª posição mundial. As principais feições destes depósitos são :

- estágio inicial de intemperismo laterítico no Terciário inferior
- silicificações importantes relacionadas a este ciclo
- minério do tipo silicático predominando sobre o tipo limonítico, como resultado da evolução tecto-morfo-climática pós terciária.

Os depósitos niquelíferos brasileiros são, portanto, diferentes da maioria dos outros depósitos lateríticos do mundo.

ABSTRACT

NICKELIFEROUS « LATERITES » OF BRAZIL

Nickeliferous deposits have been known in Brazil since about one century ago. These ores are always lateritic weathering products of ultramafic rocks. They occur between 8° and 25° South, but most are in Goiás State, central Brazil.

The Brazilian ultramafic bedrocks can be related to at least three orogenic cycles : Early Precambrian ; Late Precambrian and Cretaceous. All of these ultramafic rocks are partially or completely serpentized. There are other small Precambrian (age not established) mineralized massifs : Americano do Brasil, GO ; Sanclerlândia, GO, Carajás, PA.

Brazilian nickeliferous deposits occur in varied conditions of relief and climate. Their formation can be related to the Early Tertiary « South American erosion cycle ». The weathering products of this cycle are lateritic, with residual concentration of iron, but show silica accumulation (chalcedony, quartz) as silcretes over ultramafic rocks.

This silcrete, often of the « box-work » type, apparently formed at the bottom of Tertiary profiles and were exposed by erosion (« Velhas cycle », Late Tertiary). Beneath the silcrete, a new profile, lateritic or saprolite, formed. Erosion slopes and especially the lower, new-formed plains have weathered according to more recent climatic conditions, forming laterites in humid central Brazil, and saprolites in the arid Northeast.

The estimated reserves of the nickel ore (4.10⁶ tons Ni in 1975) place Brazil 7th worldwide. The main features of these deposits are :

- initial stage of lateritic weathering in Early Tertiary ;
- important silicification related to this cycle ;
- the silicated ore-type predominates by far over the limonitic type, as a result of post-Tertiary tecto-morpho-climatic evolution.

Thus, Brazilian nickeliferous deposits are different from the majority of other lateritic deposits in the world.

KEY WORDS : Brazil. Nickel. Laterites. Meteoric weathering. Ultrabasic rocks. Geomorphology. Silcrete. Mineralogy. Geochemistry.

INTRODUCTION

Deux types d'accumulation économique de nickel peuvent être distingués (LOMBARD, 1956 ; BOLDT, 1967) suivant leurs conditions de formation : gisements *sulfurés*, d'origine hypogène, et gisements *latéritiques*, d'origine supergène et étroitement associés à l'épaisse couverture d'altération des roches ultrabasiques en zone tropicale. Quoique l'existence de sulfures cupro-nickélicifères soit connue au Brésil, et que des travaux de prospection aient été réalisés visant à évaluer le potentiel de ce type de gisement (par exemple, dans le massif de São João — Americano do Brasil, Goiás), la quasi-totalité des réserves brésiliennes de nickel est du type « latéritique ».

Historique

La première découverte de nickel au Brésil remonte à 1889. Elle est due à un Ingénieur des Mines, Gonzaga de CAMPOS, qui eut la curiosité de faire analyser des échantillons verts trouvés dans le massif ultrabasique-alcalin de Jacupiranga (État de São Paulo) (FELICISSIMO, 1968). Les découvertes se sont ensuite succédées tout au long du xx^e siècle. Ainsi du nickel est-il signalé dans le Goiás en 1908, dans la Serra da Mantiqueira, au nord du village de São José do Tocantins (devenu depuis Niquelândia), et les premières recherches y sont entreprises à partir de 1932. De même, dans le Minas Gerais, le nickel est découvert en 1913 à Liberdade, et en 1922 au Morro Pelado, dénommé par la suite Morro do Niquel.

Les travaux de prospection se sont poursuivis par intermittence depuis une cinquantaine d'années, sur les massifs où des indices avaient été trouvés occasionnellement, avec une intensité toute particulière pendant la 2^e Guerre Mondiale (PECORA, 1944). Mais la prospection rationnelle, par campagne de puits et sondages, des couvertures d'altération des massifs ultrabasiques peu à peu mis en évidence dans de nombreuses régions, avec les progrès de la cartographie géologique, date pour l'essentiel des dix dernières années. Le total des réserves (prouvées et probables) serait de l'ordre de 4.10⁶ t de nickel contenu, ce qui placerait le Brésil en 7^e position mondiale (LAGES *et al.*, 1975 et 1976).

L'exploitation minière des gisements découverts n'est en revanche qu'à peine amorcée (M.M.E. 1978). La « Mineração de Niquel do Livramento S.A. » a débuté dès 1927 l'exploitation du gisement de Liberdade (Minas Gerais), vendu au 1935 à la Cia. Niquel do Brasil. Cette société a produit du ferro-nickel (300t/an) jusqu'en 1975. Le gisement de Morro do Niquel (Minas Gerais) est exploité depuis 1962, et produit depuis 1970 environ 10.000 t/an de ferro-nickel (2530 t de Ni contenu, pour 1977).

Sur tous les autres gisements l'exploitation minière n'a pas commencé, quoique la production de nickel électrolytique soit prévue pour bientôt par la Cia. Niquel Tocantins à Niquelândia (Goiás). Le Brésil est autosuffisant (et était même exportateur) pour le ferro-nickel, mais importe du nickel (cathodes et produits semi-finis) : le nickel importé représentait, en 1977, 60 % du total consommé.

Localisation

La figure 1 indique la situation géographique des principaux massifs (ou groupes de massifs) ultrabasique/ultramafiques du Brésil, ainsi que leur type, éventuellement leur âge probable, et la présence de nickel (indice ou gisement) s'il y a lieu.

Ces massifs sont largement distribués à travers un grand nombre d'États brésiliens, pratiquement depuis l'équateur jusqu'à une latitude de 32° S. Leur rareté en Amazonie n'est probablement due qu'au faible niveau de connaissances acquises dans cette région dépeuplée et couverte d'une forêt équatoriale dense.

Trois zones montrent cependant une densité nettement supérieure de roches ultrabasiques (BERBERT, 1977) :

— Une bande centrale NS dans le Goiás (GO), (ANGEIRAS, 1968 ; GODOY, 1968 ; LINDENMAYER et LINDENMAYER, 1971 ; VASCONCELLOS, 1973), se prolongeant au nord dans le Pará (PA), où l'on rencontre à la fois les plus grands massifs (comparables aux plus grands du monde), et les réserves les plus importantes de minerai de nickel.

— L'État de Bahia (BA) au nord-est ;

— et, à un degré moindre, l'État de Minas Gerais (MG) au sud-est.

Des raisons historiques (bon réseau de voies de communications, proximité des grands centres industriels de São Paulo, Rio de Janeiro et du Minas Gerais) font que seuls les petits gisements du Minas Gerais aient été exploités jusqu'à présent. Des raisons d'ordre morpho-climatique, qui seront exposées plus loin, expliquent la rareté des accumulations dans le nord-est, et leur absence au sud. La figure 2 schématise l'environnement géologique des massifs ultrabasiques, des indices, et des gisements, de la zone du Goiás qui représente l'essentiel du potentiel nickélicifère du Brésil. Le tableau I fournit la liste des principaux gisements de nickel connus, avec l'estimation actuelle de leur réserve quand des chiffres ont été publiés.

Objet du travail présenté

A l'exception de quelques synthèses, plus minières que géologiques (ANDRADE et BOTELHO, 1974 ;

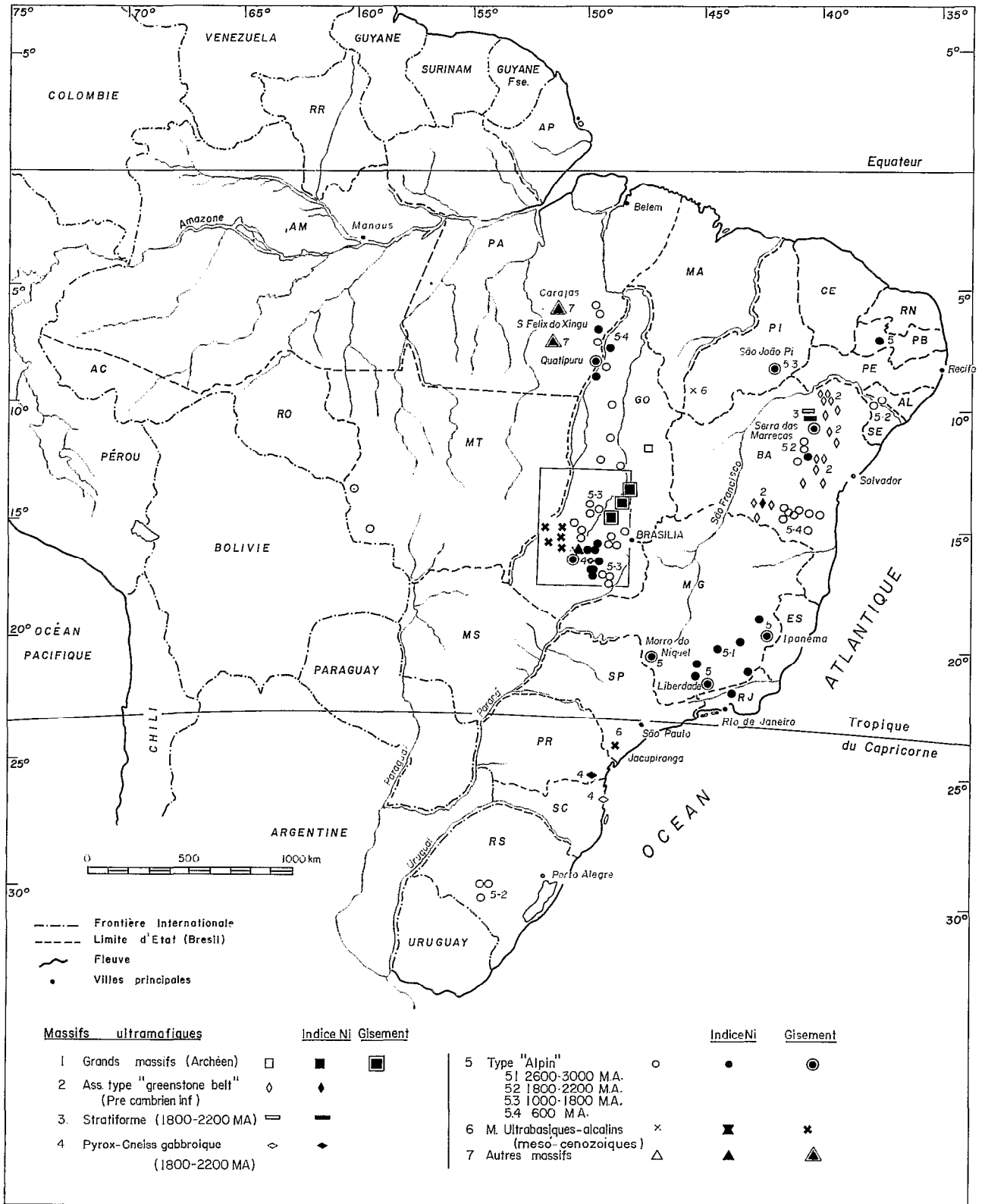


Fig. 1. — Localisation des massifs ultrabasiqes et du nickel au Brésil.

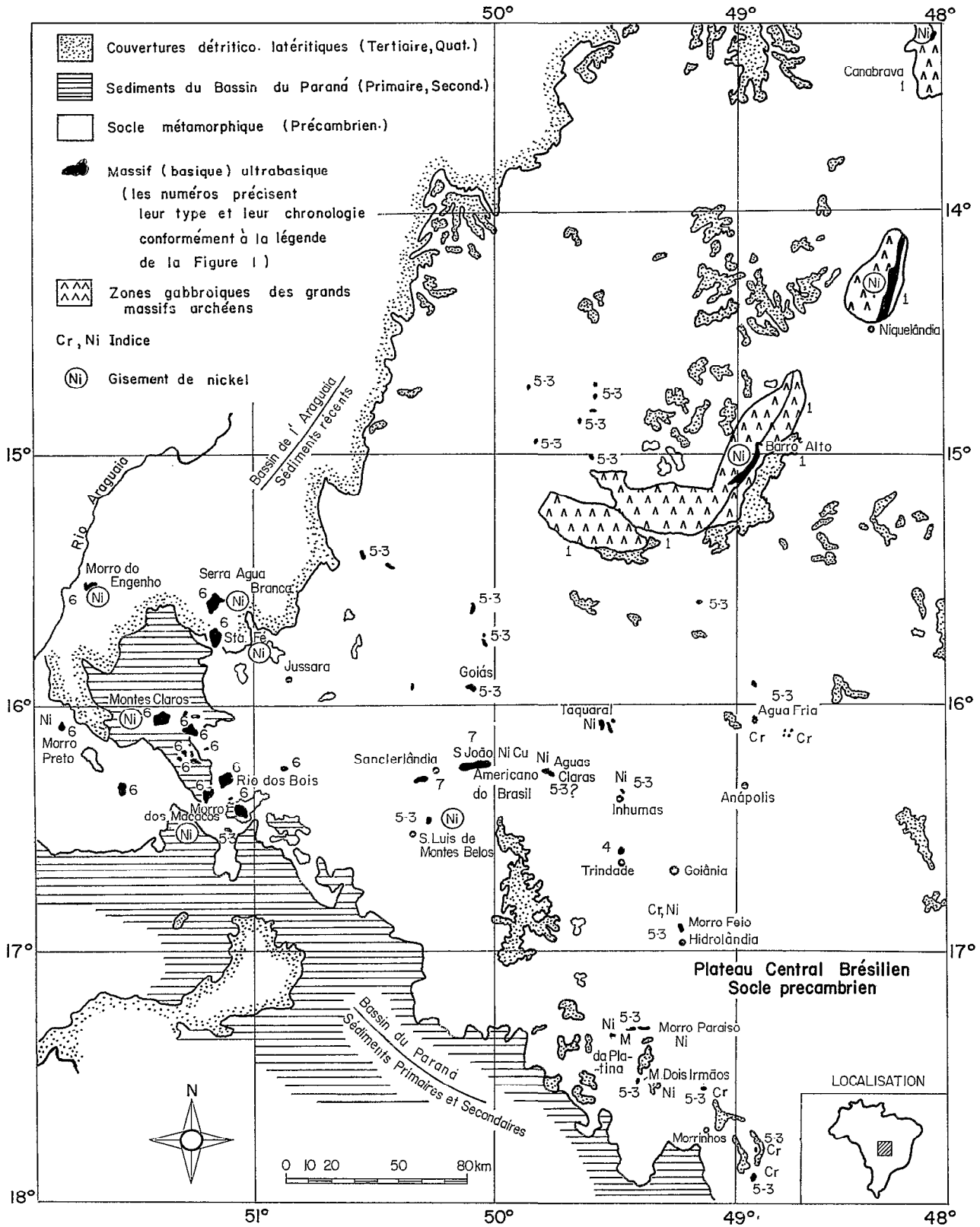


Fig. 2. — Environnement géologique des massifs ultrabasiques du Goiás.

TABLEAU I
Les gisements de nickel du Brésil

État	Gisement	Taille approximative du massif ultrabasique	Réserves — 10% minéral (prouvée et probable)	Teneur % Ni	Source biblio- graphique
Goiás	Niquelândia.....	100 km ² (39 × 2,6 km)	38000	1,40	(1)
	Barro Alto.....	45 km ² (24 × 1,9 km)	73000	1,67	(1)
	Canabrava.....	?	9500	1,3	(3)
	Santa Fé.....	38 km ²	61000	1,5	(2)
	Serra Água Branca.....	35 km ²	60000	1,3	(2)
	Morro do Engenho.....	12 km ²	18000	1,03	(2)
	Morro dos Macacos, Rio dos Bois...	30 km ²	10000	1,3	(3)
	Montes Claros (Salobinha).....	?	15000	1-1,5	(3)
São Luís Montes Belos.....	12 km ²	?	?	—	
Minas Gerais	Morro do Niquel.....	0,5 km ²	2300	1,7	(1)
	Liberdade.....	0,2 km ²	7900	1,7	(1)
	Ipanema.....	4 km ²	7300	1,24-1,59	(1)
São Paulo	Jacupiranga.....	6 km ²	3200	1,47	(1)
Piauí	São João do Piauí.....	6 km ²	20000	1,57	(1)
Bahia	Serra das Marrecas.....	?	900	1,5	(4)
Pará	São Felix do Xingu.....	?	13000	2,1	(2)
	Quatipuru.....	90 km ² (45 × 2 km)	13000	1,3	(5)
	Carajas.....	?	?	?	—

(1) M.M.E., 1978

(2) LAGES *et al.*, 1976.

(3) BERBERT, C.O., 1978 (Conférence à l'Institut de Geociências de Rio Claro).

(4) BRUNI *et al.*, 1976.

(5) CORDEIRO et Mc CANDLESS, 1976.

BERBERT, 1977 ; FERRAN, 1974 ; LAGES *et al.*, 1975, 1976), les travaux détaillés publiés sur l'altération des massifs ultrabasiques du Brésil et la formation de leurs gisements de nickel sont encore peu nombreux. L'étude géochimique comparée de cette altération, dans les différents environnements structuro-morpho-climatiques offerts par le Brésil, fait l'objet de travaux en cours à l'Institut de Geociências de l'Université de São Paulo. Ces recherches sont effectuées dans le cadre d'un accord franco-brésilien entre l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (O.R.S.T.O.M. France) et l'Université de São Paulo (USP-Brésil). Les données présentées ici ne sont donc qu'un premier inventaire des caractères généraux des gisements nickelifères latéritiques brésiliens.

ENVIRONNEMENT DES DIFFÉRENTS GISEMENTS

Les massifs ultrabasiques brésiliens

De nombreux problèmes compliquent l'étude des massifs ultrabasiques brésiliens :

— beaucoup sont encore très mal connus ;

— l'altération météorique masque souvent les faciès de roche saine ;

— et certains massifs paraissent réellement très complexes.

L'utilisation des classifications existantes, définies ailleurs, est assez délicate dans le contexte brésilien. Ainsi les schémas de THAYER (1960), WYLLIE (1967), NALDRETT et GASPARINI (1971) et NALDRETT (1973) ne s'appliquent-ils pas totalement ici, quoiqu'ils fournissent des bases utilisables. BERBERT (1970 et 1977) a proposé une classification des ultramafites du Brésil qui paraît mieux adaptée à notre réalité, et qui sera utilisée ici avec quelques modifications, rendues nécessaires pour une meilleure adéquation à nos objectifs de recherche.

Distribution des massifs (cf. fig. 1 et 2)

Massifs différenciés gabbro-pyroxénite-péridotite associés au Complexe Basal de Goiás (Archéen). Trois massifs, d'âge archéen probable, constituent les plus grands corps basiques-ultrabasiques du Brésil. Ils affleurent dans l'État de Goiás (GO)

suivant un alignement SSW-NNE, comprenant du sud au nord : Barro Alto, Niquelândia et Canabrava ; un quatrième corps, plus petit, situé encore plus au nord, Natividade-Dianópolis, est attribué à ce même groupe par BERBERT (1977). Leurs dimensions peuvent atteindre la centaine de kilomètres de longueur, et plusieurs dizaines de largeur, quoique la zone ultrabasique de chacun d'eux soit de taille beaucoup plus restreinte (tabl. I).

Dans ces massifs (ARAUJO *et al.*, 1972 ; FIGUEIREDO *et al.*, 1972, et 1975 ; SOUZA, 1973), les roches sont disposées en « couches » empilées, présentant un fort pendage vers l'ouest. Quatre « couches », ou « zones », successives ont été reconnues à Barro Alto et Niquelândia :

— *zone basale*, essentiellement noritique, à hypersthène, augite et amphiboles, parfois avec olivine ; quelques sulfures de cuivre et nickel y sont disséminés ;

— *zone ultrabasique*, harzburgitique à Barro Alto (avec un petit niveau de bronzitite à la base) ; subdivisée en un niveau inférieur dunitique et un niveau supérieur rubanné où alternent dunites et pyroxénites (webstérite et hypersthénite) à Niquelândia. Harzburgites et dunites sont toujours serpentinisées, avec des taux très variables (10 à 95 %), la serpentinitisation étant systématiquement plus importante à la base de la zone. Des corps podiformes de chromitite sont rencontrés dans la sub-zone dunitique de Niquelândia (WHITE *et al.*, 1971) ;

— *zone centrale*, constituée surtout de norites à clinopyroxène à Niquelândia, avec quelques sulfures cupronickélifères disséminés, et essentiellement d'anorthosites (70 à 100 % de plagioclases) à Barro Alto ;

— *zone sommitale*, comprenant des gabbros anorthosiques, des orthoamphibolites, et des gabbros à olivine, avec quelques sulfures cupro-nickélifères disséminés à Barro Alto, et des lentilles d'ilménite-magnétite à Niquelândia.

La puissance totale de l'empilement dépasse 20 km, dont 2 km environ pour la seule zone ultrabasique.

Ces massifs présentent à la fois des caractéristiques « alpines » (surtout à la base et au centre) (THAYER, 1972), et stratiformes (vers le sommet) (FLEISCHER et ROUTHIER, 1970). Les mesures d'âge effectuées par CORDANI *et al.* (1973) ont donné quelques résultats très anciens (jusqu'à 3 500 à 4 000 millions d'années), ce qui ferait correspondre ces massifs à quelques fragments de la croûte primitive de la Terre.

Massifs associés au type « greenstone belt » (Pré-cambrien inférieur : cycle Transamazonien). Un grand nombre de petits massifs affleurent dans

la région centro-orientale de l'État de Bahia (BA). Ils ont été associés par MASCARENHAS (1973) à un modèle géotectonique de « greenstone belt ». Les principaux se rencontrent dans la région de Serrinha, mais on en trouve aussi à Licínio de Almeida, Brumado, Contendas-Mirante, etc.

Ces massifs comprennent des hornblendites, des pyroxéniamphibolites, des péridotites serpentinisées, des pyroxénites, des « schistes » à actinote-trémolite-talc, etc. Ces roches ultramafiques ne sont pas encore très bien connues. Les études détaillées des régions de Itiúba et du Vale do Curaçá (province cuprifère la plus importante du Brésil) ont montré que ces corps sont toujours concordants avec la foliation régionale, et peuvent être considérés du type stratiforme.

Ils sont strictement liés au développement du cycle Transamazonien (1 800-2 200 M.A.), et présentent constamment des éléments axiaux de caractère régional, régulièrement orientés NS.

Massifs stratiformes (cycle Transamazonien). Le massif ultrabasique de Campo Formoso (BA), connu depuis le siècle dernier pour ses gisements de chromite, est d'âge comparable aux « greenstone belt ». Ce massif forme un arc d'environ 20 km de long et 1 km de large. HEDLUND (1974) et GONÇALVES *et al.* (1972) interprètent ce complexe (et probablement les serpentinites de Carnaíba) comme les restes érodés d'un massif beaucoup plus grand, faillé et métamorphisé. Ce massif comprend des péridotites serpentinisées, des chromitites, des pyroxénites et des gabbros.

Massifs de pyroxénites et gneiss gabbroïques (cycle Transamazonien). Cette association est constituée de roches à faciès granulite (pyroxénite, péridotite, norite, gneiss basique), ultérieurement talcifiées et serpentinisées. Deux complexes se rattachent à ce groupe : celui de Goianira-Trindade (GO) (LINDENMAYER et OLIVEIRA, 1970) et celui de Piên (PR). GIRARDI (1976 et 1978) attribue à ce dernier un âge Transamazonien, et l'interprète comme résultant de la cristallisation fractionnée d'un magma tholeiitique.

Massifs serpentinisés de type « Alpin » (âges divers). La majorité des massifs ultrabasiques du Brésil présentent des caractères nets du type « Alpin ». Ils sont en général petits (de quelques dizaines de mètres à quelques kilomètres), et sont groupés en longs alignements (serpentine belt). ALMEIDA (1978) les associe à divers cycles orogéniques.

— Un cycle très ancien (2 600-3 000 M.A.) correspond à la ceinture centrale du Minas Gerais, de direction NS.

— Plusieurs ceintures sont d'âge Transamazorien : dans le Rio Grande do Sul (Ceinture du Alto Vacacaí) de direction NE-SW ; dans l'État de Bahia (Jacobina) ; et le long de la limite Alagoas-Sergipe (Ceinture Sergipane) de direction ESE-WNW.

— L'immense « Serpentine belt » du Goiás (ALMEIDA, 1967) est mis en place dans l'intervalle 1 000-1 800 M.A. Il est divisé en deux bandes de direction NNW-SSE et NNE-SSW, et s'étend depuis le sud du Goiás et Minas Gerais jusqu'à Pará.

— Le prolongement nord de cette ceinture, dans le Pará est attribué au cycle Brésilien (600 M.A.). Il en est de même pour la ceinture presque E-W du sud de Bahia.

Enfin quelques massifs de type alpin sont rencontrés hors de ces ceintures, formant de petits corps isolés : Morro do Níquel (MG), São João do Piauí, Catingueira (Paraíba), Mato Grosso.

Quoique dérivés de dunites (ou de harzburgites), tous les massifs « Alpains » se présentent fortement ou totalement serpentinisés, plus rarement talcifiés. Une zonation marquée est souvent visible, autour d'un noyau serpentinique, avec des auréoles plus ou moins complètes de talc-schistes serpentineux à magnésite et trémolite-actinote, et de chloritischistes à trémolite et magnétite. Des gabbros et des amphibolites sont parfois associés à ces massifs, disposés irrégulièrement, ou concentré sur un des côtés. C'est le cas par exemple des massifs de São João do Piauí et de Conceição do Araguaia (PA).

Massifs ultrabasiques-alcalins (mésocénozoïques). Cette classe comprend les petits corps ultrabasiques-alcalins d'âge crétacé supérieur à tertiaire en relation avec le volcanisme basaltique qui affecta le Brésil Méridional après l'ouverture de l'Océan Atlantique. Les plus beaux exemples forment une ceinture qui borde le Bassin sédimentaire du Paraná, depuis le Rio Grande do Sul jusqu'au Goiás et Mato Grosso.

Les uns comprennent un noyau de carbonatite, parfois avec des péridotites à olivine et/ou pyroxène, et une auréole syénitique, parfois à feldspathoïdes : Jacupiranga (SP), Tapira, Serra Negra, Catalão (MG).

Les autres ne présentent pas de carbonatites. On les rencontre surtout dans le Goiás et le Mato Grosso (province d'Iporá et Porto Murinho). De forme plus ou moins circulaire, leur taille peut dépasser la dizaine de kilomètres de diamètre. Leur noyau dunitique est enveloppé dans des auréoles souvent étroites, de péridotites à pyroxènes (ortho ou clino), de pyroxénites, de gabbros, de syénites néphéliniques

(BARBOUR, 1976 ; PENA et FIGUEIREDO, 1973 ; CHABAN et SANTOS, 1973). La serpentinitisation des roches ultrabasiques est variable, et peut atteindre 100 %.

Les pipes kimberlitiques jurassiques du Piauí pourraient également être rattachés à cette classe.

Massifs mal connus, de classification incertaine. Avec les progrès des recherches géologiques, divers complexes mafiques-ultramafiques ont été découverts récemment. En l'absence d'études de détail il est encore difficile de les ranger dans les classes qui viennent d'être énumérées. On peut citer à ce propos les massifs d'Americano do Brasil et Sanclerlândia (GO), ou ceux de la Serra de Carajás (PA).

Considérations économiques sur les différents massifs.

Quoiqu'il ne soit pas possible de faire correspondre strictement la classification des massifs ultramafiques et les types de gisements ou d'indice qu'ils peuvent renfermer, certaines tendances se dégagent.

Les grands massifs archéens associés au Complexe Basal du Goiás portent parmi les plus importants gisements de nickel latéritique du Brésil (Barro Alto et Niquelândia), associés au cuivre et au cobalt dans le second. Le massif de Canabrava renferme de grandes réserves d'amiante-chrysotile.

Les massifs associés au type « Greenstone Belt » représentent un potentiel notable d'indice de sulfures de cuivre, nickel et zinc. Cependant que les grands massifs stratiformes renferment des gisements importants de chromite, et peut-être de sulfures de nickel, cuivre et cobalt.

Les petits massifs de type Alpin, en raison de leur taille réduite, sont porteurs de gisements, petits à moyens, de nickel latéritique (Liberdade, Morro do Níquel-MG, São João do Piauí), de chromite (Morro Feio, Araguacema, Quatipuru), de talc (Santa Rita, Itapaci) et amiante-chrysotile (Pontalina, Uvá, São João do Piauí).

Les massifs ultramafiques-alcalins et les kimberlites sont toujours intéressants, puisque, outre leurs importants gisements de nickel latéritique, pour les uns, et les diamants pour les autres, on peut encore y rencontrer des accumulations de vermiculite, de phosphate, de niobium, de terres rares, et d'uranium.

En conclusion, il apparaît que le nickel a été accumulé économiquement dans les profils d'altération météorique :

— des grands massifs archéens du Complexe Basal du Goiás,

— des petits massifs de type Alpin d'âges précambriens divers (GO, MG, PI...),

— des massifs ultrabasiques-alcalins crétacés (GO, SP).

Les conditions morpho-climatiques actuelles

L'accumulation économique du nickel dans un profil d'altération (« latérites nickélicifères ») n'intervient qu'à la suite de la convergence d'une série de facteurs morphoclimatiques, lithologiques et structuraux. Divers auteurs, parmi lesquels TRES-CASES (1975), LELONG *et al.* (1976) ont mis en évidence les conditions les plus favorables à l'élaboration d'un gisement de nickel latéritique. Outre, bien entendu, la présence d'une roche-mère ultrabasique (de préférence partiellement serpentinisée), ces conditions associent un climat de type tropical ou sub-tropical humide, à saisons contrastées, et un relief plus ou moins aplani (souvent avec drainage karstique) ré-entaillé secondairement (en général à la suite d'un soulèvement tectonique récent). Ce type de climat permet le développement de profils d'altération ferrallitiques profonds, mais respecte transitoirement certains silicates (serpentine), cependant que le rajeunissement du modelé remobilise un premier stock de nickel accumulé dans les anciens profils, améliorant les concentrations.

Toutes ces conditions ne sont pas remplies simultanément aujourd'hui dans l'environnement de tous les gisements de nickel du Brésil. Ces gisements se rencontrent dans diverses zones bioclimatiques, et différents compartiments géomorphologiques. Ainsi, la simple analyse du milieu physique actuel ne suffit-elle pas à expliquer la genèse de toutes les accumulations. Cette analyse n'en est pas moins importante, et nécessaire, car les conditions actuelles ont imprimé des caractéristiques propres à chaque gisement.

Climat

L'extension continentale du Brésil explique la grande variété des climats que l'on y rencontre. D'une façon très générale, et simplifiée, on rencontre des gisements de nickel « latéritique » (fig. 1) dans quatre domaines bio-climatiques, dont la distribution est schématisée sur la fig. 3.

Climat tropical semi-aride, végétation de « caatinga » (nord-est du Brésil). Outre quelques petits indices dans les États de Bahia et de Paraíba, le gisement le plus important en zone semi-aride est celui de São João do Piauí.

Le climat de cette région est caractérisé par une température moyenne comprise entre 24° et 26 °C, avec de très faibles variations annuelles. La pluviosité annuelle est inférieure à 800 mm, concentrée en trois à quatre mois, le reste de l'année étant totalement sec.

La végétation associée à ce climat est caractérisée par une faible densité d'arbres et d'arbustes ligneux, xérophiles et épineux, et par l'absence presque totale de couverture herbacée permanente : c'est la « caatinga », qui confère au sol, durant la majeure partie de l'année, un aspect dénudé.

Climat tropical chaud et humide à sub-humide à saisons contrastées, et végétation de « cerrado » (centre-ouest du Brésil). Les principaux gisements brésiliens, dans le Goiás, sont associés à un climat tropical, caractérisé par une température moyenne comprise entre 22 et 25 °C, avec faibles variations annuelles, et des précipitations de 1 200 à 1 800 mm, réparties sur au moins 6 mois, la sécheresse ne dépassant pas 3 ou 4 mois.

La végétation est du type savane arborée (« Cerrado » ou « Campo Limpo »). Elle comporte une strate arborée, à individus très espacés, et une strate herbacée de graminées, en couverture continue en général. Une forêt galerie occupe les vallées principales.

Climat tropical, sub-chaud et sub-humide, et végétation de forêt tropicale (littoral Atlantique du sud-est du Brésil). Le littoral atlantique du sud-est, est marqué par un climat particulier, qui fait transition entre les climats tropicaux chauds, situés plus au nord, qui viennent d'être décrits, et les climats sub-tropicaux à tempérés du Sud. La température moyenne est autour de 20 °C (mais diminue avec l'altitude et varie sensiblement de l'hiver à l'été), et les précipitations, bien distribuées tout au long de l'année, sont comprises entre 1 500 et 1 900 mm.

La végétation caractéristique est la forêt tropicale humide de versant (ROMARIS, 1974), ou forêt atlantique, avec une grande densité de grands arbres (20 m au moins) et de fougères arborescentes.

Climat équatorial chaud et humide, végétation de forêt équatoriale (Bassin Amazonien, au nord du Brésil). Plusieurs gisements ont été découverts récemment dans le Pará, au sein de la grande forêt équatoriale amazonienne. Le climat y est très humide, avec une pluviosité supérieure à 1 800 mm et souvent à 2 000 mm, avec une petite saison sèche de 1 à 3 mois, et une température moyenne supérieure à 26 °C, à peu près constante toute l'année.

Sud du Brésil. Il n'existe aucun gisement de nickel dans l'extrême-sud du Brésil, à climat subtropical à tempéré, et végétation de forêt à Araucarias (plateaux du Paraná) ou de prairie (Rio Grande do Sul).

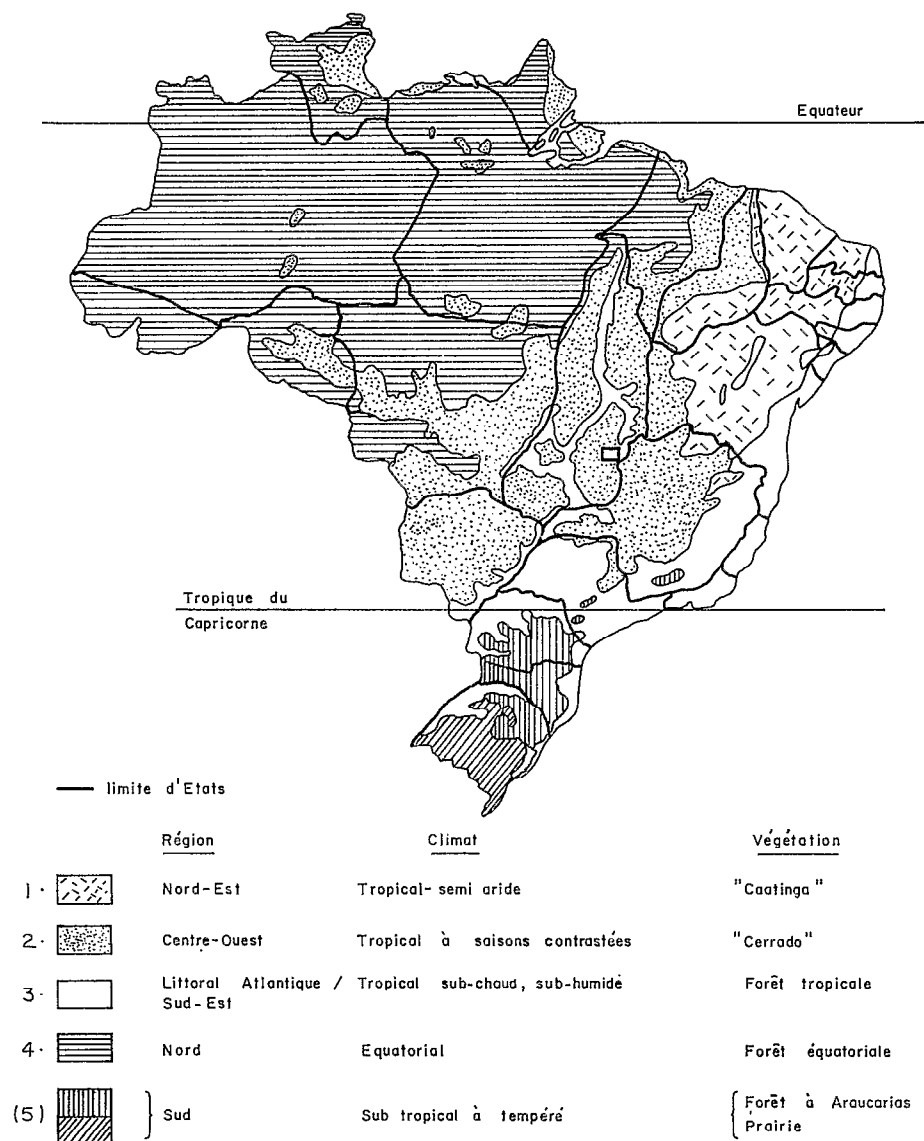


Fig. 3. — Répartition schématique des principales zones bio-climatiques du Brésil (d'après ROMARIS, 1974, modifié).

Relief

Dans la très grande majorité des cas, au Brésil, la présence de roches ultrabasiques se traduit par une modification locale du relief : la plupart des massifs correspondent, suivant leur taille, à des collines, des domes (« morros »), parfois tabulaires, ou à de véritables chaînes de montagnes comme la Serra da Mantiqueira, à Niquelândia. Ces hauteurs dominent les vastes étendues aplanies typiques d'immenses régions du Brésil. Les reliefs ultrabasiques brésiliens se distribuent suivant trois types distincts.

Dômes-plateaux. La forme topographique la plus courante des massifs ultrabasiques est un relief unique, peu incisé, occupant presque toute la surface de l'intrusion ultrabasique. La section horizontale de ces intrusions est souvent plus ou moins elliptique, et le relief correspondant est du type colline, ou dome. La surface sommitale de ces hauteurs est fréquemment tabulaire, «armée» par un niveau siliceux induré qui sera décrit plus loin. Certains massifs correspondent ainsi à de véritables plateaux. Les versants sont en pente forte, et la roche peu altérée y affleure. Ils se raccordent au niveau aplani

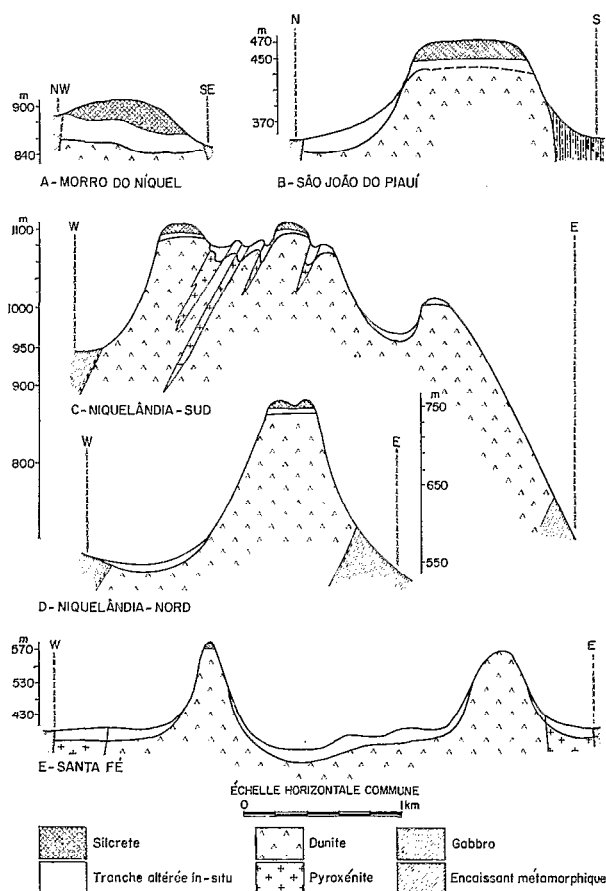


Fig. 4. — Coupes de quelques massifs ultrabasiques.

régional, nivelant l'encaissant, par l'intermédiaire d'une frange colluviale de piedmont rarement très développée.

Ce type morphologique est celui d'un grand nombre de petits massifs considérés comme de type « Alpin », comme les intrusions du Goiás, du Minas Gerais ou du Piauí. Les figures 4a et 4b fournissent par exemple les coupes topographiques des massifs de Morro do Niquel (MG) et de São João (Piauí). Ces coupes montrent l'épaisseur du niveau siliceux superficiel (silcrete) et de la tranche de roche altérée. Le dénivelé entre le plateau sommital et la plaine environnante est souvent de l'ordre de la centaine de mètres.

Les massifs ultrabasiques-alcalins créacés peuvent également présenter cette forme de relief. Ainsi le massif de la Serra Agua Branca (GO) apparaît-il comme un véritable plateau de 10×6 km, recouvert par un niveau très puissant de silcrete (plusieurs dizaines de mètres parfois), dominant de 80 m l'aplanissement environnant (LESSA SOBRINHO *et al.*, 1971 ; JUSTO, 1973).

Les massifs de plus grande taille ont un relief contrasté, avec des zones de hauteur, des piedmonts et des zones basses. Il reste néanmoins possible d'y identifier des plateaux encore extrêmement peu incisés, constituant une partie des zones hautes. Le sud du massif de Santa Fé (GO), ou Morro de Tirapressa, recouvert de lambeaux de silcrete, est un exemple de plateau, avec un dénivelé de 100 à 150 m au-dessus de la plaine. De même, la partie centrale de la zone ultrabasique du massif de Barro Alto (GO) est un plateau de silcrete, en voie de démantèlement, dominant la plaine alluviale environnante de 100 à 150 m. Enfin toute la partie sud de la Zone Ultrabasique du massif de Niquelândia (GO) constitue-t-il une haute pénéplaine (altitude 1 000 à 1 100 m). Dans ce dernier cas, toutefois, les variations de type lithologique se traduisent par des nuances dans le modelé de cette haute « surface ». Les zones dunitiques et harzburgitiques forment des rides en relief, et présentent souvent une chape de silcrete : ces rides constituent les seuls véritables témoins d'un plateau silicifié. Les zones de pyroxénite sont systématiquement déprimées (d'une cinquantaine de mètres), et correspondent à de larges vallées en U, suspendues, parfois mal drainées, sans silcrete (PECORA et BARBOSA, 1944 ; PECORA, 1944 ; BARBOSA, 1968 ; COSTA, 1970). La haute « surface » incluant rides et vallées en U domine de plus de 500 m le niveau de la plaine taillée dans l'encaissant, et est limitée par des versants en pentes très fortes (fig. 4 c).

Collines et bas-fonds. Outre les reliques de plateaux silicifiés qui viennent d'être décrites, les grands massifs montrent en d'autres secteurs un relief beaucoup plus intensément disséqué. Les zones basses prédominent, sous forme de bas-fonds comblés de matériel ferrugineux (« latérites ») colluvial à alluvial, parfois un peu induré en cuirasse à proximité des axes de drainage. Ces bas-fonds sont cernés de collines à versants en pente forte, véritables chicots, où la roche peu altérée affleure. Le sommet des plus hautes collines est chapeauté par un niveau de silcrete. Ce fait, ainsi que la disposition des collines par rapport au réseau de drainage actuel, montrent que ce type de modelé résulte de la dissection avancée d'un ancien plateau silicifié.

Des exemples de ce relief se présentent à Santa Fé (fig. 4 e), à Niquelândia (partie nord) (fig. 4 d), et à Barro Alto (parties sud et nord). Dans ce dernier cas les formations colluviales de piedmont sont exceptionnellement développées.

Massifs arasés. Dans quelques cas, assez rares, l'érosion a presque totalement arasé les massifs ultrabasiques, qui ne se différencient alors plus topographiquement de leur encaissant. C'est

par exemple la situation du massif de serpentinite d'Andorinha (BA), ou du complexe péridotiti-pyroxénique de Piên (PR). On n'observe pas de silcrete dans ces deux massifs, les effets de l'altération météorique y sont très faibles, et il n'y a pas d'accumulation de nickel.

La grande variété *actuelle* des environnements morpho-climatiques des différents gisements nické-lifères « latéritiques » du Brésil montre que des conditions favorables à leur élaboration ont du être offertes à diverses époques, postérieurement à la mise en place de la dernière génération de massifs ultrabasiques, au Crétacé.

Interprétation de l'évolution du modelé : place de la latérisation dans l'histoire géologique de la plateforme brésilienne

C'est au Crétacé supérieur qu'a commencé le soulèvement de tout le continent sud-américain, et que la mer s'est retirée à peu près totalement. Une longue période d'érosion s'est établie, attaquant les roches les plus variées, et nivelant le paysage brésilien sous forme d'une immense pénéplaine. KING (1957) a donné le nom de cycle sud-américain à cet épisode. Le relief actuel fut ensuite sculpté à partir de la surface sud-américaine, dont il subsiste de nombreux témoins.

Au Tertiaire inférieur, durant la phase d'agradation de la surface sud-américaine, l'altération météorique a conduit à la formation d'immenses couvertures ferrugineuses, latéritiques (BRAUN, 1971). D'une façon très générale la *base des profils* d'altération des roches ultrabasiques fut marquée par des silicifications sporadiques (SANTOS, 1974; TRESCASES et OLIVEIRA, 1978), dont la fréquence et l'intensité pourraient être expliquées par un épisode climatique assez sec (MOREIRA, 1977). Ainsi les plateaux couverts de silcrete décrits ci-dessus représentent des lambeaux témoins peu remaniés de la surface sud-américaine, décapés de leurs anciens profils d'altération latéritiques, mais ayant conservé la base silicifiée de ces anciens profils (cf. paragr. II). Aux latitudes supérieures à 25 °C, toutefois, les massifs ultrabasiques ne montrent pas de traces de ces anciennes silicifications. Et la latitude 25° S constitue par ailleurs l'extrême limite sud des gisements nické-lifères brésiliens. Il paraît donc douteux que, même au Tertiaire, la latérisation ait été un processus dominant dans les régions les plus méridionales du Brésil.

Un nouveau soulèvement du continent, par bombement, s'est produit au Tertiaire Supérieur, et un nouveau cycle érosif a alors commencé : le cycle Velhas (KING, 1957). La surface sud-américaine fut en grande partie démantelée. Mais une fois dégagé de sa couverture d'altérites sud-américaines, le

niveau silicifié formé sur les roches ultrabasiques a eu un rôle protecteur vis à vis de l'érosion. Ainsi, alors qu'au Quaternaire inférieur la phase d'agradation du cycle « Velhas » élabore une nouvelle surface d'aplanissement, une bonne part des massifs ultrabasiques échappe au nivellement et subsiste comme reliefs sud-américains témoins, plus ou moins incisés. Ces buttes témoins ont néanmoins rétréci tout au long du Quaternaire, en particulier à Niquelândia (nord) et à Santa Fé, au profit des zones basses appartenant à la surface « Velhas ». L'altération météorique a permis le développement de nouveaux profils sur roches ultrabasiques durant le Quaternaire, *simultanément* à deux niveaux topographiques :

— Sur les restes de la surface sud-américaine, où l'altération a repris sa progression, soit *sous* la chape silicifiée, soit dans les fenêtres dépourvues de cette protection comme dans les vallées en U du sud du Massif de Niquelândia, allongées sur les bandes de pyroxénite ;

— Sur le nouveau niveau de base constitué par la surface Velhas, où les altérations semblent être nettement plus profondes (cf. paragr. II).

Dans l'un comme dans l'autre site, l'altération est contrôlée par les conditions climatiques sub-actuelles ou actuelles. Ainsi les profils qui vont être décrits sont-ils ferrallitiques dans le centre-ouest brésilien (climat tropical à saisons contrastées), mais non dans le nord-est semi-aride.

Le réseau de drainage actuel entaille à son tour la surface « Velhas », où les profils continuent de se développer, cependant que les reliques de relief « Sud-Américains » sont peu à peu disséquées par des versants en pente forte où affleure la roche à peu près saine.

LES DIFFÉRENTS TYPES DE PROFIL D'ALTÉRATION

L'association minéralogique et chimique présente dans les profils d'altération est un état d'équilibre, résultant de l'action du climat (par l'intermédiaire de l'eau et de la végétation) sur la roche mère, dans les conditions locales de topographie (qui contrôlent l'ablation mécanique superficielle et le drainage).

Puisque plusieurs facteurs indépendants jouent simultanément, plusieurs types de classements sont possibles pour présenter les différentes catégories de profils d'altération des gisements nické-lifères. Nous avons retenu ici en premier chef la *situation topographique* (zones hautes ou zones basses), car elle est associée à la notion de temps : les zones hautes (plateaux) correspondent au cycle d'aplanissement sud-américain, alors que les zones basses appartiennent au cycle Velhas. Quoique les profils des plateaux continuent à évoluer en même temps

que leurs correspondants aval de piedmont et bas-fond, les premiers ont commencé à se développer plus tôt, et conservent des vestiges d'une évolution antérieure, comme le chapeau de silcrete, qui n'apparaissent jamais dans les seconds.

Les profils des zones hautes, plateaux et buttes, témoins de la surface Sud-Américaine

Régions à climat tropical à saisons contrastées (Goiás, Minas Gerais)

Un climat tropical humide, à saisons contrastées, est un des facteurs favorables à la formation d'un profil latéritique épais avec accumulation de nickel (TRESCASES, 1975). C'est effectivement dans cette zone climatique que se rencontrent les plus gros gisements brésiliens.

Massifs à olivine et/ou serpentine dominante (Dunites, harzburgites..., plus ou moins serpentinisées). Les roches ultrabasiques les plus courantes dans les massifs brésiliens sont les *dunites* (à Niquelândia et dans les massifs ultrabasiques-alcalins en particulier), plus rarement les harzburgites (à Barro Alto), les unes et les autres, partiellement serpentinisées, et les serpentinites (dans la plupart des petits corps de type « Alpin »).

a) Profils d'altération

Deux profils, portés sur la figure 5, peuvent être considérés comme les types extrêmes susceptibles d'être rencontrés dans ce cadre morpho-climatique : Morro do Niquel (MG) (GRIFFON et RICHTER, 1976 ; LANGER, 1969 ; SANTIVANEZ, 1965 ; TRESCASES et OLIVEIRA, 1978) et Barro Alto (GO) — zone centrale (ce dernier en position de haut de versant, en léger contrebas du plateau silicifié).

Comme cela a été schématisé sur les coupes de la figure 4, on y distingue deux zones : une zone d'altération *in-situ* à la base, et une zone silicifiée et/ou remaniée au sommet.

Zone d'altération in-situ

L'altération de la roche mère, dure, sombre, et dense (densité 2, 4 à 3) est toujours très progressive. A la base des profils elle se traduit uniquement par une modification rapide de la couleur, la teinte

passant au beige ou au gris-jaunâtre, alors que la roche reste dure, compacte et de densité supérieure à 2. Quelques îlots sains décimétriques subsistent en général dans la masse de roche un peu altérée.

Puis cohésion et densités diminuent (cette dernière de 2 à 1,5). La roche altérée n'est d'abord que friable, et les teintes dominantes sont jaunes à orangées : c'est le faciès saprolite grossière (SG). L'intercalation d'îlots de roche fraîche ou peu altérée est fréquente dans ce niveau, de même que la présence de quartz, de calcédoine, et de filonnets garniéritiques (1) en tapissage des fractures. Puis la cohésion disparaît, et la roche n'est plus qu'une masse essentiellement argileuse, où ne subsistent que des fragments centimétriques à millimétriques de roche altérée, cependant que la teinte d'ensemble est le plus souvent brun-verdâtre : on *tend* ainsi vers le faciès saprolite fine (SF), mais ce niveau n'est encore qu'une transition entre la saprolite grossière et la saprolite fine (transition symbolisée SG-SF).

Le stade saprolite fine *sensu stricto* n'est atteint qu'ensuite : la structure de la roche est encore conservée, mais le matériau est très argileux, humide de teinte brun-jaune à brun-rouge, la densité apparente (à sec) est inférieure à 1,5, et peut même descendre en dessous de 1. Ce niveau de roche très altérée est quelquefois décrit sous le nom de « latérite jaune ». Nous verrons plus loin qu'il est essentiellement ferrugineux.

Les puissances respectives de chacun de ces horizons sont très variables, d'un profil à l'autre dans un massif donné, et *a fortiori* d'un gisement à un autre. L'horizon de roche un peu altérée (symbolisé R-SG) atteint au maximum quelques mètres d'épaisseur. Ensuite, les faciès saprolitiques rocheux (du type R-SG à SG) peuvent représenter l'essentiel du profil, comme à Morro do Niquel, où leur puissance dépasse 30 m. Dans ce cas les faciès saprolitiques argileux (SG-SF à SF) sont quasi inexistantes, et n'apparaissent que sous forme de poches ou lentilles, décimétriques à métriques, au-dessus de la roche altérée friable. Dans d'autres cas, comme à Barro Alto (zone centrale), au contraire, les faciès rocheux cèdent très rapidement la place aux faciès saprolitiques argileux, essentiellement brun-verdâtres (SG-SF), dont la puissance peut atteindre une quinzaine de mètres. Des intermédiaires entre le type « rocheux » et le type « argileux » peuvent aussi se présenter. Quelquefois enfin l'épaisseur totale de la tranche altérée *in-situ*, surtout dans les types « rocheux », n'atteint pas la dizaine de mètres (Niquelândia-Sud, fig. 5 ; Barro Alto-Nord).

(1) La garniérite n'est pas une espèce minéralogique, mais un mélange de silicates nickélifères, ou nickéliféro-magnésiens : du type talc hydraté, serpentine, et plus rarement montmorillonite, chlorite, sépiolite, calcédoine, etc. (FAUST, 1966 ; BRINDLEY et PHAN THI HANG, 1973).

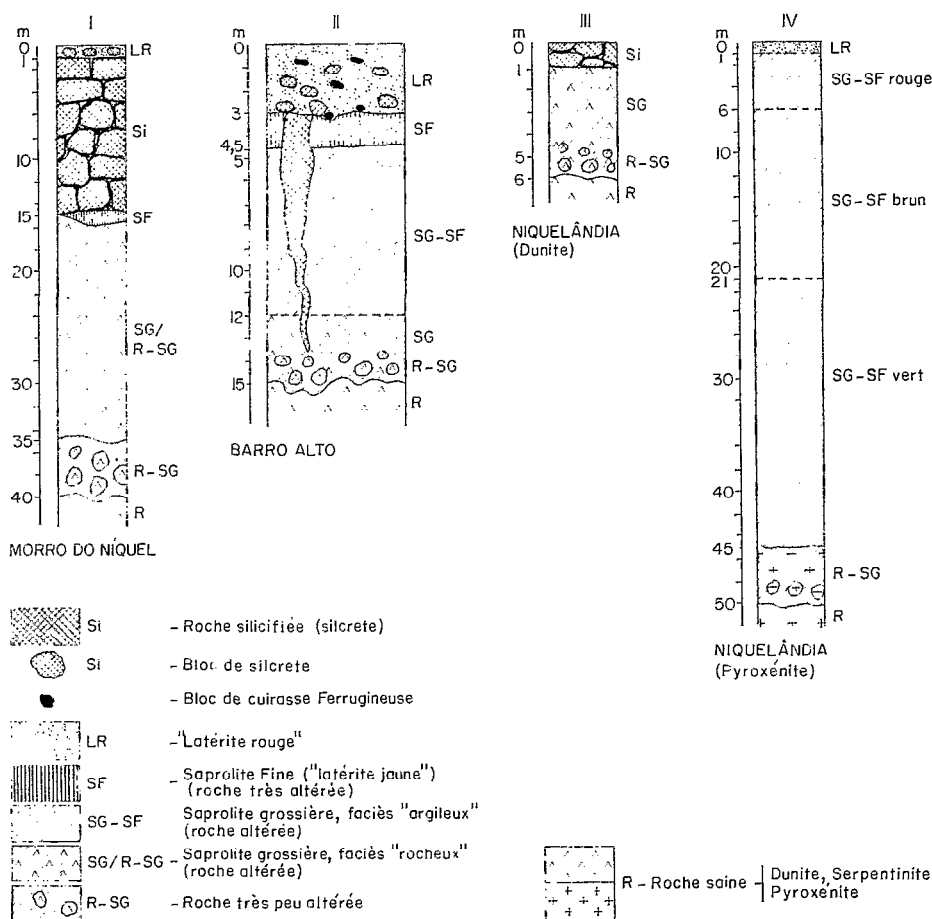


Fig. 5. — Profils d'altération des zones hautes (climat tropical à saisons contrastées).

Une caractéristique constante de tous ces profils est la minceur de l'horizon de saprolite fine (ou « latérite jaune »), qui ne dépasse pas 1 à 2 m d'épaisseur, et peut même être totalement absent. Ces profils brésiliens sont donc très différents des profils « classiques » décrits par exemple à Cuba (DE VLETTER, 1955) où en Nouvelle-Calédonie (TRESCASES, 1975), où l'horizon (ferrugineux) de « latérite jaune », ou saprolite fine, a plusieurs dizaines de mètres de puissance, contre quelques mètres seulement pour les niveaux (silicatés) de saprolites plus ou moins rocheuses.

Zone sommitale silicifiée et/ou remaniée

Au-dessus de la tranche de roche altérée *in-situ*, où la texture de la roche est conservée (ou peu modifiée, car des tassements peuvent intervenir dans la « latérite jaune »), la partie supérieure des profils est remaniée. Sur la plupart des profils des

zones hautes, comme cela a déjà été évoqué, cet horizon supérieur est très siliceux et induré : c'est un silcrete.

Ce silcrete se présente en règle à peu près générale comme composé de blocs, plus ou moins anguleux, de taille variable (décimétrique à métrique), jointifs, emballés dans une petite quantité d'un matériau pulvérulent brun-rouge, ferrugineux, comblant les interstices. Les blocs sont de deux types principaux :

— le plus fréquent est une roche très cavernueuse, constituée d'un enchevêtrement de cloisons siliceuses (quartz et calcédoine), blanches à brunes, répliques, pour les plus épaisses, des fissures de la roche ultrabasique initiale, et pour les plus fines de son maillage serpentiniteux. Les cavités sont partiellement remplies par le matériau ferrugineux emballant les blocs, ou par des noyaux de roche ultrabasique altérée. La densité apparente est très basse, souvent inférieure à 1.

— le *second*, plus rare, est une roche massive, très dure, à aspect de silex, de teinte brun-jaune à rouge, constituée de calcédoine.

L'un comme l'autre type peuvent être traversés par des filonnets blancs de petits cristaux de quartz géodique, secondaire. Ces filonnets peuvent en outre se poursuivre sous le silcrete, et pénétrer dans les horizons altérés *in-situ*.

Chaque bloc résulte de la silicification, par épigénie, de la roche mère ultrabasique, mais le silcrete dans son ensemble n'est qu'une accumulation de blocs silicifiés, puis remaniés. Des roches en place silicifiées sont toutefois observables :

— soit à la base des profils, mais de façon beaucoup plus discrète ;

— soit sous forme de grandes cheminées, ou filons, plus ou moins verticaux, comme cela a été observé à Barro Alto (fig. 5). Dans ce dernier cas les zones silicifiées semblent correspondre à des failles à fort pendage, et traversent tout le profil d'altération ; elles sont tronquées au sommet par l'horizon supérieur remanié, qui, ici, n'est plus un silcrete, étant donnée la position topographique du profil décrit.

L'épaisseur du niveau de silcrete est souvent de quelques mètres, mais atteint 20 m (ou plus) dans quelques cas : Morro do Níquel (MG), Serra da Agua Branca (GO). Cet horizon est présent avec une constance remarquable sur tous les sommets tabulaires. Mais lorsque le plateau est disséqué par l'érosion le silcrete cède la place à un horizon remanié elluvial à colluvial, brun-rouge, pulvérulent, renfermant de nombreux fragments millimétriques à décimétriques de silcrete, et éventuellement des gravillons ferrugineux. Cet horizon de « latérite rouge » recouvre alors directement les niveaux altérés *in-situ*. Ce type de matériau se rencontre aussi bien sur les hauts des versants entaillant les plateaux chapeautés par le silcrete (cas du profil choisi comme type à Barro Alto), que sur les croupes convexes (petits plateaux dégradés dégagés de ce chapeau), mais il recouvre encore, sur les plateaux eux-mêmes, avec une épaisseur réduite à quelques décimètres, la « dalle » de silcrete : c'est un sol résiduel, dérivé du silcrete.

b) Évolution minéralogique lors de l'altération

L'évolution minéralogique de ce type de profil d'altération a, pour l'instant, été surtout étudiée dans le massif de Morro do Níquel (TRESCASES et OLIVEIRA, 1978). La figure 6 fournit la séquence évolutive des différents minéraux constitutifs de la roche mère (serpentinite) de ce massif : maillage de rubans serpentineux bien cristallisés (serpentine I), noyaux de serpentine microcristalline (serpentine II, occupant la place d'ancien noyaux d'olivine),

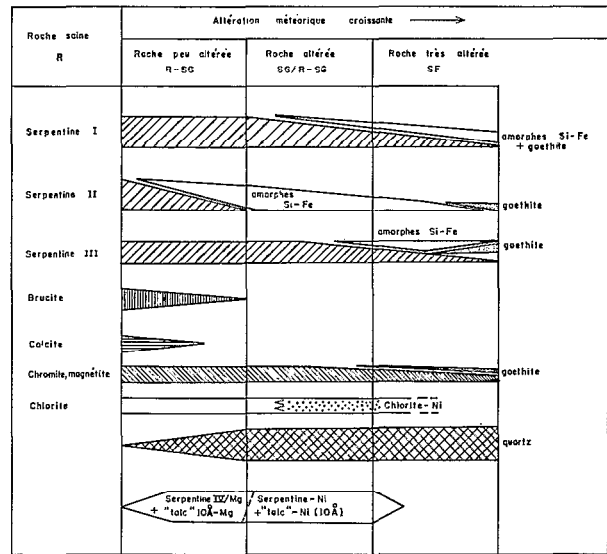


Fig. 6. — Évolution minéralogique dans la zone d'altération *in situ* du gisement de Morro do Níquel.

filons secondaires de serpentine fibreuse bien cristallisée (serpentine III), et, comme minéraux accessoires, brucite, calcite, chlorite, opaques (chromite et magnétite). Cette séquence paraît constante dans tous les profils où dominent les faciès d'altération « rocheux », comme à Níquelândia, ou dans certaines zone du nord de Barro Alto (MELFI, 1974) :

— Disparition rapide, dès les premiers stades d'altération, des noyaux d'olivine (ou de la serpentine II microcristalline qui remplace les péridots dans les serpentinites), laissant un résidu amorphe silico-ferrugineux-nickélicifère, qui évolue plus tard en goethite.

— Disparition rapide, également, de la brucite et de la calcite.

— Précipitation d'hydroxydes de fer et de nickel dans les clivages des rubans du maillage serpentineux (serpentine I). Cette serpentine « ferruginisée » ne disparaît que très progressivement dans le niveau de saprolite fine (latérite jaune), quand il existe ; les rubans sont alors totalement épigénisés par des hydroxydes de fer et de nickel (goethite).

— Adsorption de nickel par les chlorites (ou les vermiculites) ; ces minéraux disparaissent souvent dans l'horizon de saprolite fine.

— Oxydation et corrosion très lente des opaques, partiellement transformés en goethite (alumineuse et chromifère).

— Précipitation de quartz, calcédoine, opale, et parfois chrysoprase, dans les fissures de la roche en voie d'altération. A ces silicifications sont souvent

TABLEAU II

Composition chimique moyenne des deux types de profils d'altération des zones hautes

A) Profil de type « rocheux »: Morro do Niquel (d'après TRESCASES et OLIVEIRA, 1978)

	H ₂ O+	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃ *	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	NiO**	CoO	CuO
LR.....	3,9	74,3	0,3	17,2	3,79	0,84	0,26	0,042	0,003
Si.....	2,8	85,7	2,4	6,8	0,95	0,19	0,44	0,034	0,002
SF.....	10,1	50,3	22,7	10,4	0,99	0,24	3,37	0,078	0,003
R/SG-SG.....	13,2	41,5	30,6	9,8	0,78	0,18	2,40	0,033	0,003
R-SG.....	13,3	45,2	35,2	4,15	0,62	0,053	1,08	0,016	0,003
R.....	16,6	35,7	38,5	5,7	0,75	0,052	0,41	0,015	0,002

B) Profil de type « argileux »: Barro Alto (d'après STACHE, 1974)

	H ₂ O+	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃ *	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	NiO**	MnO ₂	CoO	CuO
LR.....	9,2	17,0	1,5	51,7	14,2	3,19	1,18	0,91	0,092	0,037
SF.....	10,8	20,3	12,1	41,5	7,9	2,68	2,58	0,67	0,059	0,041
SG-SF.....	14,8	34	25,8	16,8	4,1	1,04	2,51	0,40	0,030	0,026
R-SG.....	16,3	34	31,1	13,6	2,9	0,86	1,56	0,27	0,027	0,021

* Fe total compté comme Fe₂O₃.

** Les variations de teneur en Ni peuvent être grandes d'un échantillon à l'autre.

LR : Latérite rouge, remaniée, en partie développée aux dépens du silcrete. Si : Silcrete. SF : Sapolite fine (= latérite jaune). SG-SF : Sapolite essentiellement argileuse, brun verdâtre (type « argileux »). R/SG-SG : Roche altérée friable dominante (type « rocheux »). R-SG : Roche un peu altérée, dure. R : Roche saine.

associés des dépôts de minéraux phylliteux à structure voisine du talc, à feuillet de 10 Å : ce sont les constituants essentiels, mais non exclusifs, des « garniérites » (BRINDLEY et PHAN THI HANG, 1973 ; TRESCASES, 1975 ; BRINDLEY et SOUZA, 1975 ; ESSON et CARLOS, 1978). Dans ces silicates les octaédres sont occupés par du magnésium et du nickel : il semble, au Brésil, que ces minéraux à 10 Å soient surtout magnésiens à l'extrême base des profils, et que le nickel ne devienne l'élément dominant de ces silicates que dans l'horizon de sapolite grossière. Les « garniérites » disparaissent dans le niveau de sapolite fine, mais les filonnets siliceux y subsistent.

Lorsque la roche renferme du talc et/ou de la vermiculite, ces minéraux résistent à peu près intacts dans tous les horizons d'altération *in-situ*. Lorsque la roche renferme des pyroxènes, les profils tendent vers le type « argileux » (Barro Alto), et ces minéraux se transforment en argiles montmorillonitiques (nontronite).

Au total, l'altération *in-situ*, transforme essentiellement la roche silicatée magnésienne en goéthite, avec individualisation d'un peu de quartz et de

calcédoine. Dans le silcrete sus-jacent, en revanche, quartz et calcédoine prédominent très largement sur la goéthite, cependant que dans les « latérites rouges » remaniées, les produits ferrugineux (goéthite, hématite) l'emportent souvent sur les produits siliceux (Barro Alto, Niquelândia), mais pas toujours (Morro do Niquel).

c) Évolution chimique des profils

Le tableau II fournit la composition chimique moyenne des deux types de profil de zones hautes : type « rocheux » (Morro do Niquel) et type « argileux » (Barro Alto). Les deux types montrent une même tendance évolutive dans la tranche d'altération *in-situ*.

Le magnésium est l'élément le plus rapidement exporté, lors de l'hydrolyse de ses hôtes : péridot et serpentine. Avec la densité apparente, la teneur en MgO est ainsi le meilleur critère pour classer les différents horizons des profils d'altération. Au sommet de la sapolite fine l'essentiel des silicates magnésiens de la roche mère a disparu. Cette lixiviation progressive du magnésium s'accompagne d'une

concentration *relative* du fer, ainsi que des autres éléments peu solubles : Al, Cr, Mn, Co. La silice est partiellement lessivée dans les horizons d'altération de Barro Alto, et paraît légèrement concentrée (en valeur relative) à Morro do Níquel. En fait, même dans ce dernier cas, le rapport $\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ décroît avec l'altération. Le nickel est fortement enrichi vers le *haut* de la tranche d'altération *in-situ*.

Le niveau de silcrete est, bien entendu, très riche en silice, mais aussi lessivé à peu près totalement en magnésium, et pauvre en nickel, alors que les autres éléments résiduels (Fe, Al, Cr, Co) y sont (relativement) plus concentrés que dans la roche initiale. Quant à l'horizon remanié superficiel de « latérite rouge », sa composition peut être encore proche de celle du silcrete, lorsqu'il lui est directement superposé comme à Morro do Níquel (mais avec un début de lessivage de la silice, accompagné de la concentration relative du fer, de l'aluminium, et du chrome). Lorsque ce niveau recouvre directement les horizons d'altération, comme à Barro Alto, il comprend essentiellement les éléments résiduels (Fe, Al, Cr, Co), sa teneur en nickel est encore appréciable (1 %), et sa teneur en silice un peu plus faible que dans la saprolite fine.

Le raisonnement isovolumétrique, qui permet d'estimer le bilan de l'altération en valeur absolue, confirme que le magnésium, et à un degré moindre la silice, sont *évacués* de la tranche d'altération *in-situ*, alors que les éléments résiduels (Fe, Al, Cr, Co) y sont en gros strictement conservés, sans gains ni pertes, cependant que le nickel y est accumulé en valeur absolue. Dans le silcrete en revanche, aujourd'hui en haut de profil, il y a encore conservation des éléments résiduels, mais avec perte de nickel, et *apport absolu de silice*.

Variations possibles suivant la nature de la roche mère. Le degré de serpentinisation ne semble pas introduire de grandes modifications dans le schéma d'évolution décrit ci-dessus. Des roches totalement serpentinisées peuvent porter des gisements (Morro do Níquel) tout comme celles dont la serpentinisation n'est que partielle.

La présence de pyroxènes (ortho et/ou clino) est un facteur plus important de variation par rapport au type décrit. Les profils à prédominance de saprolite argileuse, avec formation de smectites ferrifères, semblent associés aux péridotites à pyroxène (Barro Alto). Lorsque la roche mère est une pyroxénite (webstérite ou hypersthénite), comme à Niquelândia (partie sud), le profil d'altération est différent (fig. 5 et PECORA, 1944) :

— il est beaucoup plus épais, et atteint jusqu'à une cinquantaine de mètres de puissance ;

— la roche mère est rapidement transformée en une saprolite verte très argileuse, constituée de

montmorillonite ferrifères (nontronites), riches en nickel (2 à 4 % Ni) ;

— vers le haut cette argile verte est rubéfiée, et la teneur en nickel baisse (≤ 1 %) ;

— et au sommet des profils, toujours situés dans les vallées creusées dans le plateau couvert de silcrete, cet horizon silicifié est absent : le sol est couvert de concrétions ferro-mangano-cobalto-nickélicifères.

La teneur en nickel de la roche mère pyroxénitique (0,08 %) ne suffit pas à expliquer les fortes concentrations rencontrées dans les saprolites : celles-ci piègent le nickel qui migre obliquement des profils développés sur les crêtes dunitiques (PECORA, 1944).

Variations suivant le degré d'érosion du plateau. Comme cela a été décrit à propos du relief et de son évolution, les plateaux couverts de silcrete se présentent plus ou moins incisés et démantelés. Le profil de Morro do Níquel serait plus typique des zones les mieux conservées, avec modelé de plateau, et présence de l'horizon supérieur silicifié. Les profils sont alors en général du type « rocheux », et rarement très profonds (Barro Alto, zone nord ; Niquelândia-Sud, zone dunitique).

Sur le pourtour de ces lambeaux de plateaux et sur les hauts des versants, déjà débarrassés de la couverture siliceuse, les profils sont plus profonds, plus argileux (surtout si la roche mère renferme des pyroxènes), moins siliceux, et sont couverts par un niveau remanié (latérite rouge) essentiellement ferrugineux, mais aussi nickélicifère : c'est le cas du profil-type décrit plus haut à Barro Alto, zone centrale.

Lorsque l'érosion a disséqué les anciens plateaux en collines et chicots, comme à Niquelândia-Nord, les sommets de chaque colline montrent encore un profil comparable à celui que présentent les plateaux, avec tranche d'altération *in-situ* (surtout type « rocheux ») et silcrete, mais sur les versants, ce niveau altéré, peu épais, est tronqué (la saprolite fine n'apparaît jamais), et est toujours recouvert par quelques décimètres de « latérite rouge ».

Les collines du massif de Santa Fé représentent le cas extrême d'érosion, puisque, même au sommet, le silcrete a disparu, et l'altération est très faible. La roche peu altérée, parfois un peu silicifiée, est recouverte directement par quelques décimètres de « latérite rouge ».

Interprétation de l'évolution des profils des zones hautes, en climat actuellement tropical à saisons contrastées. L'évolution actuelle de la tranche d'altération *in-situ*, peut être schématisée ainsi : disparition progressive, rarement complète, des silicates primaires, au profit d'un résidu goéthitique. Cette évolution est donc bien à *tendance latéritique* (la

latéritisation est le phénomène qui transforme, par hydrolyse, la totalité des silicates primaires en hydroxydes de fer, d'aluminium, etc.). Mais, dans le cadre morphoclimatique présent, cette évolution :

- abandonne aussi de la silice libre résiduelle ;
- et ne permet pas le développement d'un horizon puissant de saprolite fine, ferrugineux (« latérite jaune »).

Dans les profils latéritiques typiques, sur roche ultrabasique, comme ceux de Nouvelle-Calédonie (TRESCASES, 1975), les silicifications, transitoires, sont limitées à l'extrême base des profils, cependant que le stade purement goethitique de saprolite fine est atteint très vite, et constitue l'horizon le plus puissant.

L'évolution a tendance latéritique se poursuit également dans la zone remaniée des profils, dans les cavités du silcrete, où les restes de roches sont latéritisés, et encore aux dépens du silcrete lui-même, dont la silice est en partie dissoute, puis évacuée ou reprécipitée dans le profil sous-jacent.

La présence du niveau de silcrete en sommet de profil est en contradiction avec cette tendance évolutive latéritisante. Le bilan de l'altération montre en outre dans ce niveau un apport absolu de silice, sans source actuelle possible. Ce niveau ne peut donc pas dériver de la saprolite sous-jacente, et doit au contraire être interprété comme la base des anciens profils développés sur la surface d'aplanissement Sud-Américaine. Les racines de ce niveau silicifié, *in-situ*, pénétrant autrefois très bas dans la roche saine à la faveur des zones broyées, subsistent encore quelquefois au sein d'une masse en voie de latéritisation, comme dans le profil décrit à Barro Alto. Cette silicification basale était beaucoup plus intense que la silicification qui intervient, à la base des profils actuels : comme aujourd'hui elle prenait souvent la forme d'un box-work de quartz et calcédoine englobant des noyaux de roche peu altérée, mais l'altération conservait sur place à peu près la totalité de la silice libérée, sans évacuation en solution, et la roche finissait par être profondément silicifiée. Le modelé très aplani de l'époque (Tertiaire inférieur à moyen), et probablement un climat assez sec doivent expliquer ce phénomène.

Au-dessus de ce silcrete, un profil d'altération devait exister. Il renfermait probablement encore de nombreux fragments de roche peu altérée. Ces niveaux supérieurs ont été les premières victimes de la latéritisation, lorsque le climat est devenu plus humide, et ont ensuite été déblayés par l'érosion du cycle « Velhas ». Ce sont ces niveaux altérés qui ont alimenté le colluvionnement des « latérites rouge » sur les versants et, nous le verrons plus loin, dans les zones basses, sur le nouveau niveau aplani « Velhas ». Sa dureté, et sa résistance à l'altération, ont permis

la conservation du silcrete, qui a de ce fait préservé, sous forme de plateaux, des témoins de la surface Sud-Américaine. Sur ces plateaux, le silcrete actuel n'est en fait qu'une accumulation des blocs silicifiés au Tertiaire, et plus ou moins remaniés.

L'altération actuelle continue de s'attaquer à ce silcrete, mais elle est beaucoup plus efficace en-dessous, sur la roche ultrabasique. La tendance latéritique de cette altération y est néanmoins en partie contrariée par l'apport de silice dissoute à partir du silcrete. Il est d'autre part probable que la durée totale de formation de ces profils ait été encore trop brève pour former de véritables latérites. En revanche, l'enrichissement absolu en nickel noté dans la zone d'altération est très probablement consécutif à une migration *per descensum* du premier stock de nickel constitué dans les altérites de la surface sud-américaine, lors de leur latéritisation. Cette pré-concentration explique aussi la teneur (1 % Ni) des « latérites rouges » colluviales, anormalement élevée par rapport à celle du niveau superficiel de latérite rouge en Nouvelle Calédonie (0,3 - 0,6 % — TRESCASES, 1975).

Intérêt minier des horizons de ces profils de zone haute. L'horizon de silcrete est pauvre en nickel, et est donc considéré comme stérile par les mineurs. L'horizon de « latérite rouge » peut être faiblement minéralisé (1 % Ni), s'il ne dérive pas exclusivement du silcrete. En zone haute, toutefois, hormis le cas de quelques croupes ou rebords de plateaux, son épaisseur est faible : ce minerai, qui constitue typiquement un minerai « oxydé » ou « latéritique », ne représente donc que peu de réserves de nickel. Dans un même ordre d'idée, les concrétions ferromangano-cobalto-nickélicifères du sommet des profils développés à partir de pyroxénite (Niquelândia) sont des minerais de nickel (2-3 % Ni) et de cobalt (jusqu'à 4 % Co).

Mais l'intérêt minier essentiel de ces profils de zone haute est présenté par la zone d'altération *in-situ*, où l'on rencontre les plus fortes teneurs. Il s'agit de minerais silicatés : nontronites un peu nickélicifères (saprolite argileuse de pyroxénite), serpentine primaire fixant du nickel par adsorption, ou silicates nickélicifères secondaires (garniérites). La particularité de ces minerais est que, dans l'ensemble, la teneur est d'autant plus élevée que l'altération est plus complète. Alors qu'en Nouvelle-Calédonie, par exemple, le nickel est massivement concentré au contact de la roche fraîche, au Brésil, au contraire, il est, progressivement, de plus en plus abondant vers le haut de la tranche d'altération *in-situ*.

La présence de cuivre peut enfin gêner l'utilisation de ces minerais. Cet élément est présent en quantités très variables suivant les massifs. Ainsi, dans les profils d'altération, les teneurs ne dépassent pas

quelques dizaines de ppm à Morro do Níquel et à Santa Fé, atteignent quelques centaines de ppm à Barro Alto, et peuvent dépasser plusieurs milliers de ppm à Niquelândia (où existent des sulfures cupronickélifères disséminés. SCHMALTZ *et al.*, 1976).

Régions semi-arides (Piauí)

Situé dans le domaine semi-aride, le gisement de São João do Piauí (DINO et TRESCASES, travaux en cours) comporte en son centre un plateau couvert de silcrete. Le profil d'altération suivant peut être proposé pour cette zone de plateau (malgré le petit nombre de puits forés en zone haute) : de haut en bas,

— Silcrete, remanié, analogue à celui qui a été décrit pour les profils du Goiás et du Minas Gerais : puissance 2 à 6 m.

— Roche très altérée, faciès saprolite fine, rosée à orange, toute imprégnée de silice (filonnets, boxwork), qui conserve la cohésion de l'ensemble : puissance 5 à 8 m.

— Roche altérée, friable à argileuse, faciès saprolite grossière, de teinte brun-verdâtre, également très imprégnée de silice : puissance 6 à 8 m.

— Roche altérée, friable à argileuse, faciès saprolite grossière, verte, avec quelques veinules de garniérite : puissance 5 m au moins, la roche fraîche (serpentinite), ou même peu altérée, n'ayant pas été atteinte.

Minéralogiquement, la serpentine disparaît très vite dans l'horizon de saprolite grossière, transformée massivement en montmorillonite. Cette montmorillonite diminue dans la saprolite fine, pendant qu'apparaît un peu de goéthite. Quartz et calcédoine prédominent dans le silcrete, mais aussi dans les niveaux saprolitiques sous-jacents, à l'exception du plus profond.

Chimiquement, une part du magnésium est déjà exportée de l'horizon de saprolite grossière verte, le plus profond, qui est aussi enrichi en nickel (0,7 à 2 % Ni), alors que le fer et la silice sont à peu près conservés. Le magnésium est presque entièrement évacué de tout le reste du profil, cette perte étant compensée par l'accumulation du fer et de la silice ; le nickel ne dépasse plus guère 1 % dans la saprolite grossière silicifiée, 0,5 % dans la saprolite fine silicifiée, et disparaît presque totalement dans le silcrete.

Sur les hauts versants, en pente forte, la roche peu altérée et partiellement silicifiée affleure, et n'est masquée que par quelques décimètres de colluvions bruns-rouges emballant de nombreux blocs et débris de silcrete.

Comme dans les profils de plateaux aujourd'hui situés en climat tropical à saisons contrastées, le profil de São João do Piauí en zone sub-aride, est couronné par un silcrete. Ici comme là-bas ce

silcrete est un témoin de la base des anciens profils d'altération (SANTOS, 1974). L'extension géographique des silcifications au Tertiaire, sur la surface sud-américaine, est ainsi démontrée.

Comme dans le Goiás et le Minas Gerais, un nouveau profil est développé sous le silcrete. *Mais*, dans le Piauí, son évolution n'a pas de tendance latéritique. Si le magnésium est encore un élément mobile, silice et fer ont un comportement résiduel et la smectitisation est le mécanisme dominant, accompagné de silcifications. Quant à la partie supérieure de la zone d'altération *in-situ*, fortement silicifiée, elle pourrait représenter, soit la racine encore en place des silcifications du Tertiaire, reprise maintenant dans l'altération actuelle, soit plus probablement une silcification ultérieure *per descensum* des profils actuels à partir du silcrete sus-jacent. Ce type de silcification secondaire a été évoqué dans le Goiás, mais il y reste très discret. L'aridité du nord-est brésilien freine en revanche l'exportation de la silice, n'autorisant qu'une lente migration vers le bas de toute la tranche silicifiée. C'est probablement dans des conditions de sécheresse comparables que le silcrete avait du se constituer au Tertiaire. Ici encore le nickel accumulé dans le profil actuel doit provenir en partie de la redistribution du stock élaboré dans les altérites Tertiaires. Le minerai est, bien entendu, du type silicaté.

Un climat semi-aride favorise en général les actions mécaniques (érosion) par rapport aux processus chimiques d'altération. C'est ce qui explique que la plupart des autres massifs de roche ultrabasique du nord-est ne portent ni altérites ni gisements de nickel. Ainsi au centre de Bahia, le petit gisement de Serra das Marrecas (BRUNI *et al.*, 1976) n'est-il qu'une relique très démantelée d'une accumulation comparable à celle du Piauí. De même à Catingueira (Paraíba), les roches ultrabasiques ne présentent qu'un profil d'altération très tronqué, où un boxwork siliceux avec un peu de garniérite (ici serpentine et sépiolite nickélifère) recouvre directement la serpentinite (FARINA, 1976). L'érosion peut être encore plus achevée, comme à Andorinha (Bahia) par exemple, où le massif ultrabasique est totalement arasé au niveau de l'aplanissement actuel et ne montre que quelques silcifications (veinules) et montmorillonitisation, limitées à quelques décimètres de profondeur. Par conséquent, même si des altérations avaient concentré du nickel au début du Tertiaire dans le nord-est brésilien, l'érosion consécutive au cycle Velhas a fait disparaître la plupart des accumulations.

Régions humides en permanence

Les gisements récemment découverts dans la grande forêt équatoriale amazonienne sont encore

très mal connus. CORDEIRO et McCANDLESS (1976) parlent de silicifications, de latéritisation et de pénéplanation à propos du massif de Quatipuru (Pará), qui semblerait ainsi présenter pas mal d'analogie avec les massifs du Goiás.

Mais le tout petit gisement de Jacupiranga, au sud de l'État de São Paulo, permet d'évaluer le rôle du climat sub-chaud et sub-humide, sans saison sèche marquée (végétation de forêt tropicale humide) du littoral atlantique, dans le sud-est du Brésil. Le noyau dunitique du massif ultrabasique-alkalin de Jacupiranga forme un bas plateau, coupé en deux par la rivière du Joelho. Le profil d'altération peut y être schématisé ainsi à proximité de l'entaille de la rivière :

— Au sommet, couverture remaniée de « latérite rouge », ferrugineuse : puissance très variable, de quelques mètres à plus de 30 m ;

— Avec éventuellement présence de blocs de silcrete à la base ;

— Roche très altérée, jaune-rouge, très ferruginisée (saproлите fine), mais traversée de lames, filons et filonnets siliceux blancs, enduits d'oxydes de cobalt et de manganèse : puissance 5 à 10 m ;

— Passage à roche altérée, brun-verdâtre, friable à plastique (saproлите grossière) montrant un réseau dense de lamelles siliceuses dans toutes les diaclases, accompagnées parfois de veinules de garniérite, verte : puissance 2 à 4 m ;

— Plus bas, la roche est plus dure, grise à jaune, et présente encore des silicifications.

L'horizon supérieur, remanié, est très ferrugineux et pauvre en nickel (0,2 %). La teneur en nickel est également très basse (0,2 %) à la base du profil, dans les premiers stades d'altération. Seule la zone médiane, plus altérée (MgO 7,5 % ; Fe₂O₃ 22 %) est localement un peu plus enrichie en nickel ($t \leq 1,5$ %), mais toujours très siliceuse (SiO₂ 50 %). Dans l'ensemble il n'y a pas à Jacupiranga de forte concentration de nickel correspondant à l'altération. La séparation mécanique des blocs et plaquettes siliceuses peut permettre malgré tout d'améliorer la teneur en nickel du minerai jusqu'à 2 % environ (FERRAN, 1974).

Le massif ultrabasique-alkalin de Jacupiranga est situé au fond d'un graben, ce qui explique peut-être que les altérites couvrant la surface sud-américaine, quoique remaniées, et probablement ré-altérées, n'y aient pas disparu comme sur les autres massifs : elles pourraient correspondre à la latérite rouge, souvent épaisse recouvrant les blocs de silcrete. Sous cette couverture, l'altération actuelle est forte, à tendance latéritique accentuée (bon développement de l'horizon de saproлите fine), quoique ici encore l'évacuation de la silice reste partielle.

La caractéristique principale de ce type d'altération est de n'avoir pas encore permis un véritable enrichissement économique du nickel. Il faut noter qu'il n'existe pas d'autres gisements aux latitudes plus méridionales. Dans le Paraná, le Santa Catarina, le Rio Grande do Sul, non seulement l'altération actuelle ne développe que des profils peu épais, où les mécanismes de vermiculitisation et smectitisation dominant, mais en outre, il semble que, même au Tertiaire, l'altération n'ait pas atteint, dans le sud, l'ampleur qu'elle présente dans les autres régions : silcrete et vestiges de latérites manquent sur les massifs ultrabasiques. Il est donc possible qu'à Jacupiranga l'altération ancienne n'ait pas été suffisante pour constituer un stock de nickel résiduel dans les altérites de la surface sud-américaine, ce qui expliquerait la faiblesse des teneurs des profils d'altération actuels.

Les profils des zones basses, piedmonts et bas-fonds, éléments de la Surface « Velhas »

Seuls les massifs de plus grande taille, qui ne se limitent pas à une butte isolée, ont un modèle différencié avec développement de zones basses : Barro Alto, Niquelândia, Santa Fé, et même São João do Piauí. Comme pour les zones hautes, nous examinerons le cas des régions à climat tropical à saisons contrastées (Goiás), puis celui de la zone semi-aride (Piauí).

Régions à climat tropical à saisons contrastées (Goiás)

La figure 7 montre les profils caractéristiques des zones basses des gisements de Niquelândia (zone nord) et Santa Fé. Ces profils sont très voisins, et les zones basses latéritiques de Barro Alto, au sud en particulier, présentent à peu près la même succession. Comme sur les hauteurs, les profils comprennent deux parties : zone d'altération *in-situ* à la base et zone remaniée au sommet.

La zone d'altération *in-situ* est très comparable à celle qui a été décrite dans les profils de zone haute, ce qui est logique puisque ces deux profils sont contemporains :

— La roche saine (densité 2,7 à 3) n'apparaît qu'à une profondeur importante (20 m à Santa Fé) ;

— A plus d'une dizaine de mètres de profondeur en moyenne, l'altération est encore très faible (densité ≥ 2) et la roche reste dure, mais de teinte grise ;

— L'horizon de saproлите grossière, épais de 5 à 8 m, montre un passage graduel des types « rocheux », friables, aux types « argileux » (en bordure des

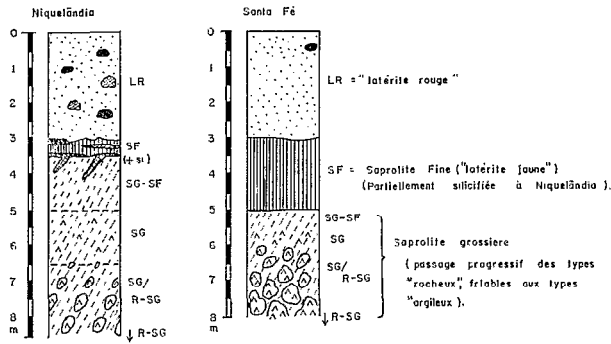


Fig. 7. — Profils d'altération des zones basses (climat tropical à saisons contrastées).

blocs friables, et vers le haut des profils), avec une teinte dominante jaune :

— L'horizon de saprolite fine (latérite jaune) est presque toujours présent; son épaisseur atteint couramment 2 m à Santa Fé, mais il est peu épais et partiellement silicifié à Niquelândia.

Le niveau superficiel est constitué par une « latérite rouge ». C'est un matériau colluvial à alluvial, pulvérulent, brun-rouge, qui renferme très souvent des concrétions et gravillons ferrugineux, ou ferromangano-cobaltifères. A proximité des ruisseaux ces concrétions sont cimentées par des hydroxydes de fer, la « latérite rouge » s'indurant en cuirasse. A l'exception de quelques blocs effondrés des hauteurs, sur les bas de pente, ces profils ne présentent jamais le chapeau de silcrete caractéristique des zones hautes.

Le tableau III fournit la composition minéralogique des différents niveaux, dans le massif de Santa Fé. L'évolution de chacun des minéraux de la roche mère dans la tranche d'altération est en tous points comparable à celle qui a été décrite dans les profils de zone haute. Il en est de même pour les éventuels pyroxènes, qui s'altèrent en nontronite.

La composition chimique moyenne de chaque horizon, dans le massif de Santa Fé, figure dans le tableau IV (1). Ici encore l'analogie est grande, mis à part l'horizon remanié superficiel ici ferrugi-

TABLEAU III

Composition minéralogique des profils de zone basse à Santa Fé

Latérite rouge	goethite, hematite, magnétite, chromite, vermiculite.
Saprolite fine	(serpentine), magnétite, chromite, amorphes Si-Fe, goethite, vermiculite.
Saprolite grossière	serpentine, magnétite, chromite, amorphes Si-Fe (goethite), vermiculite (smectite) (quartz, garniérites).
Roche dure peu altérée	serpentine (olivine), magnétite, chromite, amorphes Si-Fe, vermiculite (smectite) (quartz, garniérites).
Roche saine	serpentine, olivine, magnétite, chromite, vermiculite, carbonates.

TABLEAU IV

Composition chimique moyenne de chaque horizon dans le massif de Santa Fé

	H ₂ O+	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃ *	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	NiO	CoO	CuO
LR.....	5,2	10,1	1,6	70,8	3,5	6,2	1,19	0,145	0,011
SF.....	8,9	32,9	9,9	39,0	2,4	4,1	1,40	0,063	0,010
SG.....	12,2	40,8	28,3	15,5	0,7	0,64	1,0 (0,3-1,9)	0,028	0,005
R-SG.....	12,8	41,0	33,4	10,4	0,5	0,44	0,33**	0,024	0,004
R.....	7,4	36,3	41,1	13,2	0,2	0,35	0,23	0,020	0,003

* Fe total compté comme Fe₂O₃ (sauf pour la roche saine : FeO).

** Exclusion faite des veinules garniéritiques.

LR : Latérite rouge. SF : Saprolite fine (= latérite jaune). SG : Roche altérée = saprolite grossière. R-SG : Roche dure peu altérée. R : Roche saine.

(1) Les analyses ponctuelles publiées à propos de la zone nord de Niquelândia (SANTIVANEZ, 1972) concordent en gros avec les moyennes calculées dans le tableau IV.

neux, avec les profils de zone haute. Une partie du nickel accumulé dans les zones basses est résiduelle, et vient de la roche altérée sur place. Mais une partie doit provenir aussi des zones hautes, soit par voie mécanique, avec les colluvions de « latérite rouge », soit par voie chimique, par migration oblique, soit par une combinaison des deux phénomènes, le nickel introduit avec les colluvions pouvant ensuite être légèrement lessivé vers les niveaux silicatés d'altération, où les conditions de pH se prêtent mieux à son immobilisation, et où les pièges offerts sont nombreux (serpentine encore peu altérée, produits amorphes silico-ferrugineux, nontronites, ou neogenèses garniéritiques).

Au total, dans les régions à climat tropical à saisons contrastées, les tranches d'altération sont très ressemblantes en zones hautes et basses : leur développement se fait en équilibre avec les conditions actuelles de climat. La zone altérée *in-situ* n'est en général pas plus épaisse dans les zones basses, mais son évolution latéritique y est plus complète que sur les hauteurs, comme le montre le plus grand développement de l'horizon de saprolite fine. Cette plus grande altération doit être la conséquence du microclimat plus humide induit sur les piedmonts et bas-fonds par l'eau ruisselée sur les versants.

La différence fondamentale entre les profils des deux sites topographiques est dans la nature de l'horizon supérieur remanié : silcrete en haut, latérite rouge en bas. Ceci démontre encore que le silcrete est une formation fossile, héritée d'un aplanissement antérieur. Quant à la latérite rouge ennoyant les zones basses, elle est en partie elluviale, dérivant du remaniement sur place de la saprolite fine totalement ferruginisée ; mais elle est aussi en partie colluviale à alluviale, et représente probablement l'évolution ultime des anciennes altérites des hauteurs (silcrete et matériaux qui le recouvraient). Son accumulation dans les zones basses contribue à augmenter, parfois considérablement, la puissance totale des profils (15 m de latérite rouge à Barro Alto).

Trois horizons constituent des minerais de nickel : saprolite grossière, saprolite fine, latérite rouge. Le premier est silicatée, à teneur moyenne (1 à 2 % Ni) ; le troisième oxydé, à basse teneur (1 % Ni) ; la saprolite fine (latérite jaune) constitue au Brésil une transition entre les types silicatés et oxydés, du fait du non achèvement de l'évolution latéritique (voir plus haut), les teneurs y sont les meilleures (jusqu'à 4 % Ni) mais les épaisseurs limitées. En terme de réserves, le type silicaté l'emporte de très loin : ainsi à Barro Alto (de ANDRADE et BOTELHO, 1974) le minerai silicaté représente près de 70 % des réserves, contre 20 % pour le minerai « de transition » (saprolite fine), et 10 % pour le minerai oxydé, latéritique.

En conclusion, dans les régions centrales du Brésil, à climat tropical à saisons contrastées, qui renferment le plus gros potentiel nickélique, les zones basses montrent une évolution latéritique plus complète, et elles sont enrichies en nickel, de façon absolue, à partie des zones hautes. En même temps, ce qui reste de ces zones hautes est quelquefois très démantelé par l'érosion. Au Brésil, les gisements sont ainsi souvent associés de préférence à l'aplanissement le plus récent.

Régions semi-aride (Piauí)

Une frange de piedmont est développée tout autour du plateau central du massif de São João do Piauí, en particulier à l'est, au nord et à l'ouest. La figure 8 présente la disposition schématique des horizons successifs sur l'ensemble d'un bas versant : de haut en bas,

— Niveau remanié, colluvial, de blocs de silcrete éboulés, emballés dans un matériau brun-rouge pulvérulent : la puissance varie progressivement, de quelques décimètres sur le versant proprement dit, à près de 10 m lorsque la pente s'annule ;

— Inclus dans cet horizon, à une profondeur variable, en amont immédiat de la zone plane, un niveau métrique discontinu à apparence de cuirasse ferrugineuse ; il s'agit en fait de blocs de silcrete à cortex ferrugineux centimétrique, plus ou moins cimentés entre eux par des hydroxydes de fer ;

— Horizon de roche très altérée, à constitution plus ou moins argileuse (saprolite grossière « argileuse » à saprolite fine), de teinte rosée, jaune ou verte ; cet horizon n'apparaît qu'en bas de pente, à peu près en même temps que le niveau de pseudo-cuirasse précédent, son épaisseur croît très vite vers l'aval, et semble passer par un maximum (10 m) lorsque la pente devient nulle ;

— Roche altérée, peu friable à argileuse (saprolite grossière, des termes « rocheux » à « argileux »), jaune, brune à brun-verdâtre : cet horizon apparaît déjà à mi-pente (donc bien en amont du précédent), son épaisseur croît rapidement vers l'aval, et atteint près de 10 m au bout de la séquence ; dans sa partie amont, ce niveau est très imprégné de silice ;

— Roche peu altérée (serpentinite), dure, grise à beige.

Cette toposéquence avait déjà été proposée, dans ses grandes lignes, par SANTOS (1974).

L'évolution minéralogique est comparable à celle qui a été décrite sur le plateau : smectitisation de la serpentine dans la saprolite grossière, de plus en plus intense vers l'aval, et apparition discrète de la goëthite dans la saprolite fine. Quartz et calcédoine prédominent en bas de versant, épigénisant la sapro-

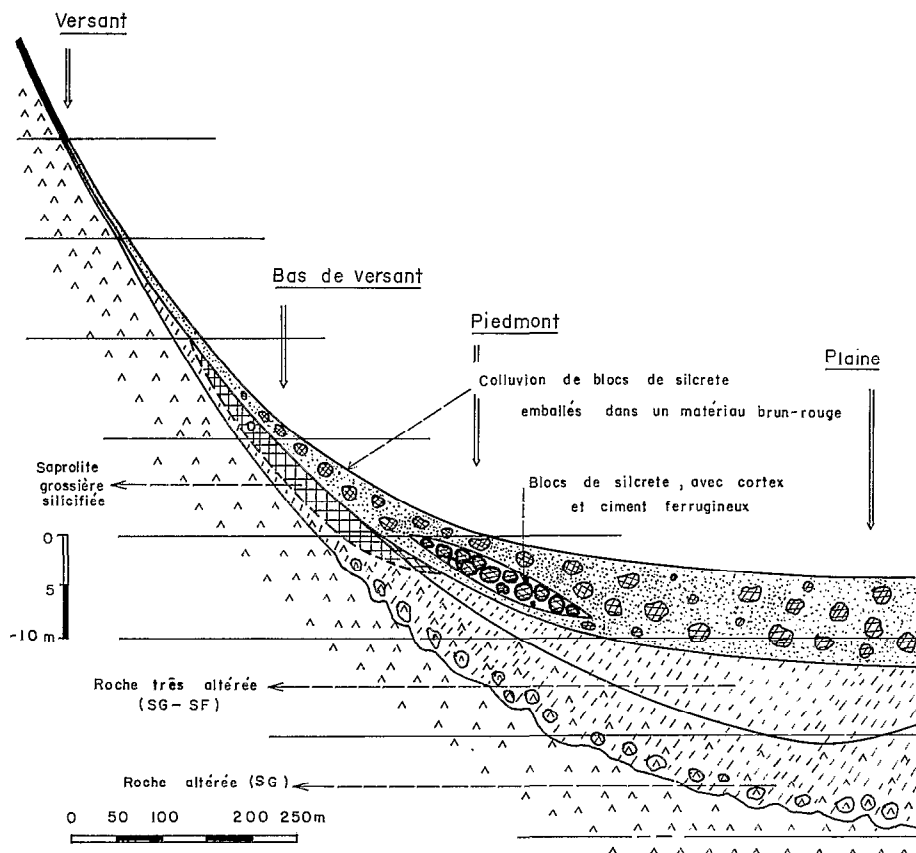


Fig. 8. — Toposéquence schématique des zones de piedmont (Piauí-climat semi-aride).

lite grossière, de même que dans toute la couverture colluviale. Le ciment et le cortex ferrugineux des blocs de silcrete, en position de piedmont, est goethitique et hématitique.

L'évolution chimique lors de l'altération est caractérisée par la conservation sur place du fer et de la silice, et souvent par l'importation de silice, probablement dissoute du silcrete en amont : cette importation est particulièrement forte en bas des versants. Le magnésium est rapidement évacué, dès que la serpentine disparaît. Le nickel migre latéralement à partir du plateau, à travers la totalité de la toposéquence. La partie aval des piedmonts, au-delà de la zone très silicifiée des bas-versants, et la zone aplanie qui lui fait suite, sont ainsi enrichies en nickel, soit dans le niveau de saprolite grossière (0,8 - 1 %, et jusqu'à 3 % par endroits), soit plus généralement dans le niveau de saprolite fine (1,2 - 1,5 %). Les solutions nickélifères peuvent même sortir du domaine ultrabasique, et aller imprégner les roches altérées (séricito-schistes) encaissant le massif. La couverture colluviale en revanche,

directement issue du silcrete, est toujours très pauvre en nickel (0,2 - 0,3 % Ni).

L'évolution des zones basses est donc encore une fois en tous points comparable à celle des zones hautes : même type d'altération (smectitisation, ici, en zone semi-aride), avec des profils profonds dans les points les plus bas du modelé. Ce type d'altération se révèle favorable à la concentration du nickel (minerai silicaté), sous réserves qu'une pré-concentration ait été élaborée lors d'une première phase d'aplanissement : l'altération directe de la serpentine en montmorillonite, sans apport complémentaire de nickel, ne provoquerait pas en effet d'accumulation économique de nickel résiduel à la suite du départ du seul magnésium.

CONCLUSION

Presque entièrement situé dans la zone inter-tropicale, possédant de nombreux massifs de roches ultrabasiques, et ayant subi plusieurs cycles d'aplanissement généralisé, le Brésil présente *a priori* de

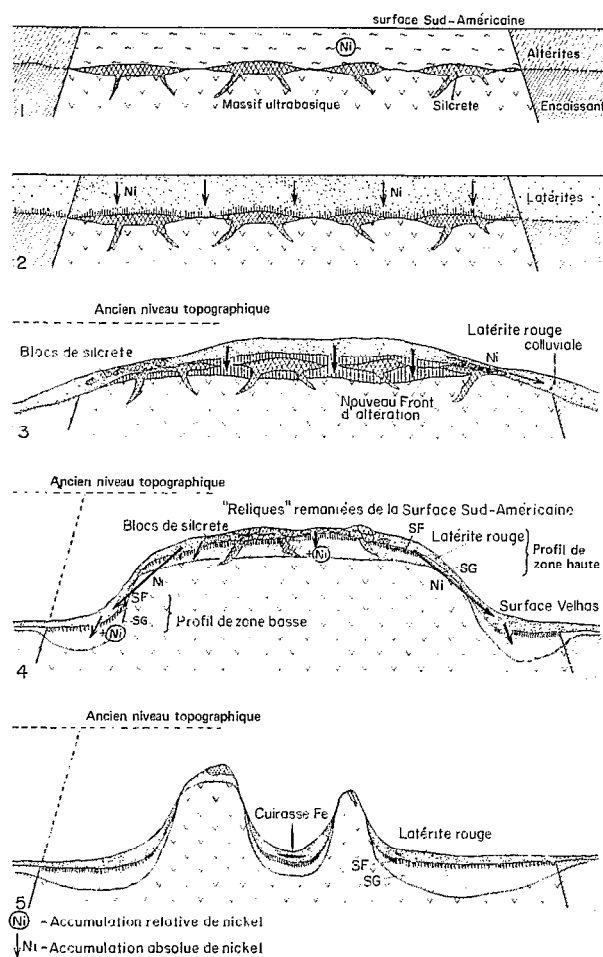


Fig. 9. — Les phases d'évolution successives des gisements de nickel du Brésil. 1. *Tertiaire inférieur* : modelé aplani (Surface sud-américaine). Climat sec. Silicifications à la base de profils peu évolués. 2. *Tertiaire inférieur à moyen* : évolution du climat vers des conditions plus humides. Latéritisation des profils. Concentration du nickel dans la partie moyenne des profils. 3. *Tertiaire supérieur* : cycle d'érosion Velhas. Remaniement des latérites de la surface sud-américaine, et dégagement progressif du silicrete. Progression du front d'altération sous le silicrete. Migration du nickel. 4. *Quaternaire* : état actuel des massifs type « plateaux et dômes », avec profils de zone haute et zone basse. 5. *Quaternaire* : stade d'érosion plus avancé : état actuel des massifs type « collines et plaines » ; prédominance des zones basses avec début de cuirassement ferrugineux.

bonnes conditions pour avoir des gisements de nickel latéritique. Diverses accumulations économiques d'origine supergène ont de fait été mises en évidence au Brésil, le total des réserves étant aujourd'hui estimé à 4 millions de tonnes de nickel contenu, ce qui situe ce pays au 7^e rang dans le monde.

Le caractère commun à tous les gisements brésiliens est d'avoir connu une première phase de développement au Tertiaire, lors de l'élaboration de la surface d'aplanissement sud-américaine. Il est impossible de reconstituer tous les mécanismes qui sont intervenus à l'époque. Deux traits majeurs ressortent cependant, dont la chronologie n'est d'ailleurs pas tout à fait établie : silicification et latéritisation.

Au Tertiaire inférieur, ou moyen, dans des conditions de modelé déjà très aplani, une période climatique semi-aride a provoqué par épigénie, l'individualisation d'un niveau très silicifié. Ce niveau s'est formé à la base des profils d'altération couvrant la Surface Sud-Américaine. Ces profils devaient alors renfermer de nombreux fragments de roche peu altérée.

Une évolution du climat vers des conditions plus humides a provoqué la latéritisation de ces paléo-profils sud-américains, et une première concentration (résiduelle) du nickel. Ces mécanismes de silicification et de latéritisation ne semblent toutefois pas avoir joué au sud d'une latitude de 25° S.

Au Tertiaire supérieur, un nouveau cycle d'aplanissement a commencé à démanteler la surface sud-américaine, le cycle Velhas. Les anciens profils d'altération, latéritisés, ont été progressivement déblayés, mais le silicrete mis à nu a protégé du nivellement les massifs ultrabasiques. Ceux-ci ont ainsi peu à peu émergé sous forme de plateaux dominant le niveau aplani Velhas.

Au cours du cycle Velhas, et jusqu'à nos jours, l'altération s'est poursuivie simultanément sur les plateaux (sous le silicrete) et sur la plaine Velhas. Les nouveaux profils ont été différenciés en fonction des climats sub-actuels à actuels, avec une tendance latéritique dans les régions de climat tropical à saisons contrastées, probablement plus nettement latéritique en climat tropical humide, et une évolution de type smectitique dans les régions semi-arides.

Avec les progrès de l'érosion actuelle, les buttes témoins de la surface sud-américaine disparaissent peu à peu. Dans le Centre-Ouest brésilien, où le climat à saisons contrastées induit l'altération latéritique, le nickel est ainsi progressivement transféré des zones hautes vers les zones basses où il vient enrichir les nouveaux profils. En région semi-aride, en revanche, l'érosion l'emporte sur l'altération, et de nombreux massifs ont été arasés, sans que l'altération ait pu préparer un réceptacle pour le nickel antérieurement accumulé.

La figure 9 schématise les étapes successives de la formation des gisements brésiliens, telles qu'elles viennent d'être évoquées.

Les caractéristiques principales de ces gisements peuvent ainsi s'énumérer :

— Corrélation avec deux cycles d'aplanissement, début-Tertiaire, puis fin-Tertiaire ;

— Silicification importante sur les hauteurs ;

— Latéritisation (ferruginisation) encore très limitée, surtout sensible en zone basse, ou même absence d'évolution latéritique comme à São João do Piauí ;

— Tailles et teneurs en général modestes, soit parce que le climat n'est plus assez agressif (Nord-Est), soit parce que la latéritisation n'agit pas depuis un temps suffisant (Goiás) ;

— Accumulation souvent préférentielle du nickel dans les piedmonts et les zones basses plutôt que sur les hauteurs ;

— Accumulation préférentielle du nickel dans la partie médiane des profils d'altération, plutôt qu'à leur base ;

— Énorme prédominance des minerais de type silicaté (nickel adsorbé sur les serpentines hypogènes, fixé par les montmorillonites d'altération, où constituant structural des garniérites) sur les minerais latéritiques oxydés (où le nickel est essentiellement dans la goethite).

A l'exception de l'association avec des phases d'aplanissement, les caractéristiques des gisements brésiliens sont assez différentes de celles des principaux gisements nickélicifères latéritiques du Monde, de type « oxydé », ou même « silicaté ».

Les gisements « oxydés » ne présentent qu'un horizon silicaté de saprolite grossière très mince, à la base des profils, dont l'essentiel est ferrugineux (goethitique), d'abord à texture conservée (saprolite fine), puis remaniés et gravillonnaires (latérite rouge, cuirasse ferrugineuse). Les silicifications sont rares, limitées aux fissures du bedrock, sous le niveau moyen du front d'altération. Les teneurs en Ni (1 - 2 %) peuvent rester constantes sur la plus grande partie du profil, ou, plus généralement, montrer un enrichissement vers le bas (≤ 2 %) (SCHELLMANN, 1971), mais dans tous les cas le nickel est essentiellement associé à la goethite. Les latérites nickélicifère de Cuba (DE VLETTER, 1955), de Guinée (BONIFAS, 1953 ; PERCIVAL, 1965), des Philippines (SANTOS YNIGO, 1964) du Venezuela (JURKOVIC, 1963) sont de ce type. Tous ces gisements sont situés dans l'Hémisphère Nord, et dans des conditions climatiques aujourd'hui humides.

Dans les gisements à la fois « oxydés » et « silicatés », comme ceux de Nouvelle-Calédonie (TRESCASES, 1975), ou de l'Ouest des États-Unis (HOTZ, 1964), l'horizon silicaté de saprolite grossière est présent, épais de quelques mètres, surmonté de puissants niveaux goethitiques décimétriques (saprolite fine et latérite rouge). Le nickel est présent en fortes teneurs (2-5 %) à la base silicatée des profils, où des silicifications et des garniérites existent dans les fissures de la roche saine à peu altérée ; la saprolite fine renferme aussi du nickel

(minerai oxydé à 1-2 % Ni), mais non la latérite rouge (0,2 - 0,3 % Ni). La latéritisation est intense, surtout en zone haute, et les meilleurs gisements, en Nouvelle-Calédonie, se situent plutôt sur les hauteurs. L'essentiel des réserves de Nouvelle-Calédonie, aussi bien en tonnage de minerai qu'en tonnage de nickel contenu, est constitué par le minerai oxydé, même si l'exploitation n'intéresse pour l'instant que la tranche silicatée plus riche. Ces gisements à la fois oxydés et silicatés sont situés dans l'hémisphère Sud (Nouvelle-Calédonie) ou au nord de la zone intertropicale actuelle (USA).

En revanche, il existe aussi dans l'Hémisphère Sud quelques petits gisements assez comparables à ceux que nous avons étudiés au Brésil. DE WAAL (1971) décrit en Afrique du Sud l'altération d'une serpentinite en « birbirite », assemblage de quartz-calcédoine et d'hydroxydes de fer nickélicifères ; le nickel est faiblement concentré en valeur relative vers le haut du profil (0,7 %).

En Australie, ZEISSINK (1969) montre que l'altération des serpentinites de Greenvale est du type latéritique (transformation en goethite). Mais le paysage ultrabasique comprend des hauteurs en voie d'érosion, avec silicifications, et des « plaines » où le développement latéritique est mieux achevé. Dans les profils latéritiques l'altération élimine le magnésium, mais conserve longtemps une part importante (1/3 environ) de la silice de la roche mère sous forme de quartz. Strictement associé à la goethite, le nickel est concentré, en valeur relative, vers le haut des profils (2 à 2,5 %). Il y a donc de nombreuses analogies entre ces profils d'Australie et d'Afrique du Sud, et ceux du Brésil, quoique dans les deux premiers cas le nickel soit une fois de plus associé à une phase oxydée : les gisements brésiliens sont les seuls de type véritablement silicaté.

L'évolution supergène sensiblement différente des massifs ultrabasiques de l'Hémisphère Sud et de l'Hémisphère Nord pourrait être attribuée aux variations climatiques mondiales liées à la dérive de l'axe des poles, et au déplacement des masses continentales, au Tertiaire et au Quaternaire.

REMERCIEMENTS

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

Nos remerciements sont aussi adressés aux Compagnies : Morro do Niquel, CODEMIN, MONTITA, VALE DO RIO DOCE e BAMINCO-Mineração e Siderurgia S/A, pour les facilités offertes pour la visite de leurs gisements et leur échantillonnage.

*Manuscrit reçu au Service des Publications de l'O.R.S.T.O.M.
le 31 janvier 1980.*

BIBLIOGRAPHIE

- ALMEIDA (F. F. M.) de, 1967. — Origem e evolução da plataforma brasileira. Brasil, *Div. Geol. Mineral.*, Bol. 241, 36 p.
- ALMEIDA (F. F. M.) de, 1978. — Tectonic map of South America 1/5.000.000 and explanatory note. M.M.E.-D.N.P.M. Brasília, 23 p.
- ANDRADE (M. R.) de et BOTELHO (L. C.), 1974. — Perfil analítico do Níquel. D.N.P.M. Bol. n° 33. Rio de Janeiro, 90 p.
- ANGEIRAS (A. G.), 1968. — A faixa de serpentinitos da região central de Goiás. *Anais Acad. Bras. Ciênc.*, vol. 40. Rio de Janeiro : 129-136.
- ARAUJO (V. A.) de, MELLO (J. C. R.) de et OGUINO (K.), 1972. — Projeto Niquelândia. Relatório final. Convênio D.N.P.M./C.P.R.M. Goiânia, 224 p.
- BARBOSA (A. L. M.), 1968. — Ambiente geológico das jazidas níquelíferas de Niquelândia, GO. VI Semana de estudo, S.I.C.E.G. Ouro Preto. Bol. n° 6 : 79-89.
- BARBOUR (A. P.), 1976. — Geologia do maciço ultramáfico de Santa Fé, Goiás. Tese USP, Inst. de Geociências, 138 p., *multigr.*
- BERBERT (C. O.), 1970. — Geologia geral dos complexos básicos e ultrabásicos de Goiás. XXIV Congres. Bras. Geol. Brasília. Resumos.
- BERBERT (C. O.), 1977. — Rochas básico-ultrabásicas no Brasil e suas potencialidades econômicas. IIª Semana de est. geol. do Paraná. CEGEP-U.F. Parana : 1-51.
- BOLDT (J. R. Jr.), 1967. — The winning of nickel. Longmans Canada Ltd. Toronto, 487 p.
- BONIFAS (M.), 1959. — Contribution à l'étude géochimique de l'altération latéritique (Thèse). *Mém. Serv. Carte Géol. Als. Lor.*, Strasbourg, n° 17, 159 p.
- BRAUN (O. P. G.), 1971. — Contribuição à geomorfologia do Brasil Central. *Rev. Bras. Geogr.*, n° 3 : 3-39.
- BRINDLEY (G. W.) et PHAN THI HANG, 1973. — The nature of garnierites. *Clays and clay mineral.* Vol. 21 : 27-57.
- BRINDLEY (G. W.) et SOUZA (V.) de, 1975. — Nickel-containing montmorillonites and chlorites from Brazil with remarks on schuchardtite. *Mineral. Mag.*, GB, vol. 40 : 141-152.
- BRUNI (M. A. L.) et al., 1976. — Carta geológica do Brasil ao milionésimo. Folha Aracaju, 226 p. D.N.P.M. Brasília.
- CHABAN (N.) et SANTOS (J. F.) dos, 1973. — Intrusivo do Morro do Engenho (Goiás) : considerações sobre geologia e pesquisa. XXVII Congresso Bras. de Geol., Aracaju. Bol. n° 1 : 57-58.
- CORDANI (U. G.), DELHAL (J.) et LEDENT (D.), 1973. — Orogêneses superposées dans le Précambrien du Brésil sud-oriental (États de Rio de Janeiro et de Minas Gerais). *Rev. Bras. Geoc.*, 3 (1) : 1-22.
- CORDEIRO (A. A.) et McCANDLESS (G.), 1976. — Maciço ultramáfico de Quatipuru. XXIX Congres. Bras. Geol. Ouro Preto. Belo Horizonte, resumos p. 238.
- COSTA (J. L. G.), 1970. — Nickel deposits of the São João do Tocantins massif. Notes on economic geology and on exploration by C.N.T. XXIV Congres. Bras. Geol., Brasília, resumos : 142-143.
- ESSON (J.) et CARLOS (L.), 1978. — The occurrence, mineralogy and chemistry of some garnierites from Brazil. Colloque sur la minéralogie, géochimie, géologie des minéraux et minerais nickéifères latéritiques. IAGC-IGCP-BRGM. Orléans, Bull. BRGM (2) II, 3 : 263-274.
- FARINA (M.), 1969. — Ultrabásitos níquelíferos de Catingueira, Paraíba. Considerações sobre a geoquímica e a geologia econômica. Sup. Des. Nordeste. Depart. de recursos naturais. *Secr. Geol. Econ.* n° 7, 53 p.
- FAUST (G. T.), 1966. — The hydrous nickel-magnesium silicates. The garnierite group. *Am. Mineral. Blacksburg, Va, USA.* Vol. 51 : 279-238.
- FELICÍSSIMO (J. Jr.), 1968. — Distritos ultrabásico-alcálicos da bacia tectônica do Baixo Ribeira e seus aspectos econômicos. Est. de São Paulo. SICEG. Ouro Preto. Bol. n° 6 : 90-134.
- FERRAN (A.) de, 1974. — Panorama do níquel no Brasil. Geol. e Metalurgia. IV Simpósio de Mineração (1ª Parte), n° 35 : 103-124.
- FIGUEIREDO (A. N.) de, SOUZA (E. P.) de et MELLO (J. C. R.) de, 1972. — Projeto Goianésia. Barro Alto. Relatório Final. Convênio DNPM/CPRM. Goiânia, 129 p.
- FIGUEIREDO (A. N.) de, MOTTA (J.), MARQUES (V. J.), 1975. — Estudo comparativo entre os complexos de Barro Alto e do Tocantins, Goiás. *Rev. Bras. de Geoc.*, vol. 5 : 15-29.

- FLEISCHER (R.) et ROUTHIER (P.), 1970. — Quelques grands thèmes de la géologie du Brésil. Miscellanées géologiques et métallogéniques sur le Planalto. *Sci. de la Terre*. Tome XV, n° 1 : 45-102.
- GIRARDI (V. A. V.), 1975. — Geologia e petrologia do complexo básico-ultrabásico de Piên, PR, *Rev. Bras. Geoc.*, São Paulo 6 (2) : 109-124.
- GIRARDI (V. A. V.) et ULBRICH (H. H. G. J.), 1978. — Origin and evolution of the Piên mafic-ultramafic complex, Southern Brazil. *Bull. Geol. Soc. America* (in press).
- GODOY (A. C.), 1968. — Mapa das ocorrências minerais do Estado de Goiás, com localização dos principais maciços básicos e/ou ultrabásicos. XXII Congr. Bras. Geol., Belo Horizonte. Anais.
- GONCALVES (J. C. V.) MOREIRA (J. F. C.), HEDLUND (D. C.) et al., 1972. — Projeto Cromo DNPM/CPRM, Relat. Final Inédito, 181 p. Brasil.
- GRIFFON (J. C.) et RICHTER (H.), 1976. — Geologia, mineração e tratamento do minério de níquel do Morro do Níquel, MG. VI Simp. Bras. de Mineração : 386-398.
- HEDLUND (D. C.), COUTO MOREIRA (J. F.) de et al., 1974. — Stratiform chromite at Campo Formoso, Bahia, Brazil. U.S. Geol. Survey, *Jour. Res.*, Denver, Co, 2 (5) : 551-562.
- HOTZ (P. E.), 1964. — Nickeliferous laterites in southwestern Oregon and northwestern California. *Econ. Geol. Urbana II. USA*. Vol. n° 59, n° 3 : 355-396.
- JURKOVIC (I.), 1963. — Some geochemical aspects about the genesis of the nickel deposit Loma de Hierro (Venezuela). *Geolos. Vjesnik. Zagreb-YU*. 17 : 103-112.
- JUSTO (L. J. E. C.), 1973. — Maciço ultramáfico de Água Branca, Goiás : um corpo tabular. XXVII Congr. Bras. Geol. Aracajú. Bol. n° 1 : 56-57.
- KING (L. C.), 1956. — A geomorfologia do Brasil Oriental. *Rev. Bras. Geogr.* n° 2. Ano XVIII : 147-265.
- LAGES (S. M.), ANDRADE (M. R.) de, OLIVA (L. A.), 1975. — « Níquel ». Encontro Nacional sobre minérios de metais não ferrosos. Goiânia-GO. Rel. DNPM para XXIX Congr. Bras. Geol. Belo Horizonte, 48 p.
- LAGES (S. M.), ANDRADE (M. R.) de, OLIVA (L. A.), 1976. — Economia mineral do níquel. Rel. DNPM para XXIX Congr. Bras. Geol. Belo Horizonte, 32 p.
- LANGER (E.), 1969. — Die Nickellagerstätten des Morro do Níquel in Minas Gerais, Brasilien. Ihr Aufschluss, ihre Bemusterung und Bewertung. Clausthaler Hefte zur Lagerstättenkunde und Geochemie des Miner. Rohstoffe Heft 8. Gebrüder Barntraeger-Berlin-Stuttgart, 64 p.
- LELONG (F.), TARDY (Y.), GRANDIN (G.), TRESCASES (J. J.), BOULANGÉ (B.), 1976. — Pedogenesis, chemical weathering and processes of formation of some supergene ore deposits. Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits. K. H. Wolf edit, Elsevier-Amsterdam. Vol. 3 : 93-173.
- LESSA SOBRINHO (M.), ANDRADE (R. S.) de, BERBERT (C. D.), 1971. — Projeto Jussara. Geologia dos Quadriculos de Britânia, Santa Fé, Araguapez e Jussara (Goiás). DNPM/CPRM. Goiânia, 86 p.
- LINDENMAYER (D. M.) et OLIVEIRA (C. C.) de, 1970. — Relatório de viagem às regiões de Inhumas e Serra de Santa Rita, Goiás. DNPM, 6° Distrito, Relat. Inedito/s. ident./Goiânia. Brasil.
- LINDENMAYER (D. H.) et LINDERNMAYER (Z. G.), 1971. — Intrusões ultrabásicas-alcálicas e suas mineralizações a níquel. XXV Congr. Bras. Geol. São Paulo. Bol. esp. n° 1 (resumo), p. 35.
- LOMBARD (J.), 1956. — Sur la géochimie et les gisements du nickel. *Chronique des mines d'Outre-Mer*. Paris, n° 244, 20 p.
- MASCARENHAS (J. F.), 1976. — Estruturas do tipo « greenstone belt » no Leste da Bahia. In : Congr. Bras. Geol., 29, Ouro Preto. Belo Horizonte, Resumos dos Trabalhos, p. 185.
- MELFI (A. J.), 1974. — Características geoquímicas e mineralógicas dos estádios iniciais da alteração superficial das rochas ultrabásicas de Barro Alto (GO). Bol. Inst. Geociências USP. V-5 : 117-128.
- Ministério das Minas e Energia (M.M.E.) da República Federativa do Brasil, 1978. Balanço Mineral Brasileiro. Brasília, 212 p.
- MOREIRA (A. A. N.), 1977. — Relevô, in Geografia do Brasil. Região Centro-Oeste. Fundação I.B.G.E. Vol. 4, 364 p.
- NALDRETT (A. J.) and GASPARINI (E. L.), 1971. — Archean nickel sulfide deposits in Canada. Their classification, geological setting, and genesis with some suggestions as to exploration. *Geol. Soc. Australia*, Spec. Publ., 3 : 201-226.
- NALDRETT (A. J.), 1973. — Nickel sulphide deposits. Their classification and genesis, with special emphasis on deposits of volcanic association. CIM Transactions, Bull. 76 : 183-201.
- PECORA (W. T.), 1944. — Nickel silicate and associated nickel-cobalt-manganese oxide deposits near São José dos Tocantins, Goiaz, Brazil. *U.S. Geol. Surv. Bull.* 935 E. : 247-305.
- PECORA (W. T.) et BARBOSA (A. L. M.), 1944. — Jazidas de níquel e cobalto de São José do Tocantins. Estado de Goiaz. DNPM. Bol. n° 64.
- PENA (G. S.) et FIGUEIREDO (A. J.) de, 1973. — Geologia da quadrícula de Iporá (Goiáz). XXVII Congr. Bras. Geol. Aracajú. resumos : 106-108.
- PERCIVAL (F. G.), 1965. — The lateritic iron deposits of Conakry. Trans. Inst. Min. and Metall. London. GB. Vol. 74, part 8 : 429-462.
- ROMARIS (D. A.), 1974. — Aspectos da vegetação do Brasil. Inst. Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro, 60 p.
- SANTIVÁÑEZ (A. O.), 1965. — As serpentinitas níquelíferas do Morro do Níquel em Pratápolis. *Eng. Mineração e Metalurgia*. Vol. XLII, n° 248 : 61-64.

- SANTIVANEZ (A. O.), 1972. — Níquel no Brasil. Região do Oco-Goiás, *Eng. Mineração e Metalurgia*, nº 323 : 64-73.
- SANTOS (J. F.) dos, 1974. — Fatores de controle na concentração de níquel laterítico condicionado pela evolução geológica e geomorfológica do complexo básico-ultrabásico de São João do Piauí (PI). XXVIII Congr. Bras. Geol. Porto Alegre : 25-32.
- SANTOS-YNIGO (L.), 1964. — Distribution of iron, alumina and silica in the Pujada Laterite of Mati, Davao Province, Mindanao Island (Philippines). XXII Intern Geol. Congr. New Dehli. Sect. 14 (laterite) : 126-141.
- SCHELLMANN (W.), 1971. — Über Beziehungen lateritischer Eisen- Nickel-Aluminium-und Manganerze zu ihren Ausgangsgesteinen. *Mineral Deposita*, Berlin. Vol. 6, nº 4 : 275-291.
- SCHMALTZ (W. H.), FIGUEIREDO (A. M.) de, CUNHA (C. A. B. R.) da, 1976. — Pesquisa de sulfetos de Cu-Ni no maciço de Niquelândia. XXIX Congres. Bras. Geol. Belo Horizonte, resumos, p. 263.
- SOUZA (A.) de, 1973. — Geologia e geocronologia do complexo Barro Alto, Goiás. Tese Dout. FFCL. Rio Claro (SP).
- STACHE (G. A.), 1974. — Untersuchungen zur Geologie, Petrographie, Metamorphose und Genese des basisch-ultrabasischen Massivs von Barro Alto, Goiás (Brasilien). These. Techn. Univ. Clausthal, 198 p.
- THAYER (T. P.), 1960. — Some critical differences between alpine-type and stratiform peridotite-gabbro complexes. *In* : International Geological Congress, 21. Copenhagen, 1960, Rept. pt. 13 : 247-259.
- THAYER (T. P.), 1972. — Some observations and problem concerning the peridotites and peridotite-gabbro complexes of the Goiás belt. XXVI Congr. Brasil. Geol., Belém, vol. I, p. 37.
- TRESCASES (J. J.), 1975. — L'évolution géochimique supergène des roches ultrabasiqes en zone tropicale. Formation des gisements nickélifères de Nouvelle-Calédonie. *Mém. O.R.S.T.O.M.*, nº 78. Paris, 259 p.
- TRESCASES (J. J.) et OLIVEIRA (S. M. B.) de, 1978. — Alteração dos serpentinitos do Morro do Níquel (MG). XXX Congres. Bras. Geol., Recife, vol. 4 : 1655-1670.
- VASCONCELLOS (J. B.) *et al.*, 1973. — Ocorrências minerais das folhas Goiás e Goiânia. DNPM 6º Distr. Goiânia.
- VLETTER (D. R.) de, 1955. — How Cuban ore was formed ; a lesson in laterite genesis. *Eng. and Min. Journ.*, New-York, vol. 156, nº 10 : 84-87.
- WAAL (S. A.) de, 1971. — South African nickeliferous serpentinites. *Minerals Sci. Eng. Petrol.* ZA, vol. 3, nº 2 : 32-45.
- WHITE (R. W.), MOTTA (J.), ARAUJO (V. A.) de, 1971. — Platiniferous chromitite in the Tocantins complex, Niquelândia, Goiás, Brazil. *U.S. Geol. Surv. Prof. paper*, 750D : D26-D33.
- WYLLIE (P. J.), 1967. - - Ultramafic and ultrabasic rocks-Petrography and petrology. *In* : *Ultrama. and related rocks*. John Wiley e Sons, Inc. New York : 1-7.